ISBN 84-8320-283-2

P.V.P.: 24,00 €
(I.V.A. incluido)

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC)
Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no Férreos

Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC).

Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no Férreos

Documento BREF

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

Comisión Europea

Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)

Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no Férreos

Documento BREF

Comisión Europea

2005

Versión: Diciembre 2001

Traducción al español realizada por el
Ministerio de Medio Ambiente

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Medio Ambiente ©

I.S.B.N.: 84-8320-283-2
NIPO: 310-04-068-7
Depósito legal: M. 51.369-2004
Imprime: Neografis, S. L.

Impreso en papel reciclado

NOTA INTRODUCTORIA

El 1 de julio de 2002 se aprobó la Ley 16/2002 de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, que incorpora a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 96/61/CE.

La ley exige un enfoque integrado de la industria en su entorno y el conocimiento, por parte de todos los implicados -industria, autoridades competentes y público en general- de las Mejores Técnicas Disponibles con el fin de reflejar todos estos aspectos en la Autorización Ambiental Integrada, que otorgan las CC.AA.

En el marco de la Unión Europea, se establece un intercambio de información entre los EE.MM. y las industrias para la elección de estas MTDs, que deben servir de referencia común para los Estados miembros a la hora de marcar el objetivo de mejora tecnológica de las diferentes actividades.

A tal efecto, la Comisión Europea a través de la Oficina Europea de IPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau) ha organizado una serie de grupos de trabajo técnico, que por epígrafes y actividades proponen a la Comisión los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (**BREF**).

Los BREF informarán a las autoridades competentes sobre qué es técnica y económicamente viable para cada sector industrial en orden a mejorar sus actuaciones medioambientales y consecuentemente lograr la mejora del medio ambiente en su conjunto.

El Grupo de Trabajo correspondiente a la Industria de Procesos de Metales No Férreos comenzó sus trabajos en el año 1998, y el documento final fue aprobado por la Comisión el 16 de enero de 2002: *Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industry*. Está disponible, exclusivamente en versión inglesa, en la *web* de la Oficina Europea de IPPC (http://eippcb.jrc.es.), y en la *web* de la Comisión Europea (http://europa.eu.int/comm/environment/pubs/industry.htm).

El Ministerio de Medio Ambiente ha asumido la tarea, de acuerdo con los mandatos de la Directiva IPPC y de la Ley 16/2002, de llevar a cabo un correcto intercambio de información en materia de Mejores Técnicas Disponibles, para ello, ha iniciado una serie de traducciones de los documentos BREF europeos.

Se pretende dar un paso más en la adecuación progresiva de la industria española a los principios de la Ley 16/2002, cuya aplicación efectiva debe conducir a una mejora del comportamiento ambiental de las instalaciones afectadas que las haga plenamente respetuosas con el medio ambiente.

La versión española de este documento está disponible en la *web* de EPER España (www.eper-es.com).

RESUMEN GENERAL

Este Documento de Referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales no Férreos refleja el intercambio de información realizado conforme al Artículo 16(2) de la Directiva del Consejo 96/61/CE. El documento debe contemplarse a la luz del prefacio, en el que se describen sus objetivos y su uso.

Para afrontar el complejo campo de la producción de metales no férreos, se adoptó el enfoque de cubrir la producción de los metales a partir de materias primas primarias y secundarias conjuntamente en un documento, y abordar los metales en 10 grupos. Estos grupos son:

- Cobre (Sn y Be inclusive) y sus Aleaciones.
- Aluminio.
- Zinc, Plomo y Cadmio, (+ Sb, Bi, In, Ge, Ga, As, Se, Te).
- Metales Preciosos.
- Mercurio.
- Metales Refractarios
- Ferroaleaciones.
- Metales Alcalinos y Alcalinotérreos
- Níquel y Cobalto.
- Carbono y Grafito.

La producción de carbono y grafito se incluyó asimismo como proceso separado, ya que muchos de dichos procesos están asociados con las fundiciones primarias de aluminio. Los procesos de tostación y sinterización de los minerales y concentrados para la producción de alúmina también se han incluido en estos grupos cuando procede. La minería y el tratamiento de los minerales en la mina no se cubren en el documento.

En el documento, la información se presenta en doce capítulos que cubren: Información general en el Capítulo 1, procesos comunes en el Capítulo 2 y luego los procesos de producción metalúrgica para los diez grupos de metales en los Capítulos 3 a 12. El Capítulo 13 presenta las conclusiones y recomendaciones. También se incluyen anexos que cubren costes y reglamentos internacionales. Los procesos comunes del Capítulo 2 se dividen del modo siguiente:

- Uso del capítulo - instalaciones complejas.
- Uso y comunicación de datos de emisión.
- Gestión, diseño y formación.
- Recepción, almacenamiento y manipulación de materias primas.
- Preproceso y pretratamiento de materias primas y transferencia a procesos de producción.
- Procesos de producción de metales: Tipos de hornos y técnicas de control de procesos.
- Recogida de gases y técnicas de eliminación de aire.
- Tratamiento de efluentes y reutilización del agua.
- Minimización, reciclaje y tratamiento de los residuos de los procesos (incluidos subproductos y desechos).
- Efectos sobre otros medios.
- Ruido y vibración.
- Olor.
- Aspectos de seguridad.
- Desmantelamiento.

Cada uno de los Capítulo del 2 al 12 incluye secciones sobre procesos y técnicas aplicadas, niveles actuales de emisiones y consumos, técnicas a considerar en la determinación de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y conclusiones sobre MTD. Para el Capítulo 2, sólo se extraen conclusiones sobre MTD para manipulación y almacenamiento de materiales, recogida y

eliminación de gases, eliminación de dioxinas, recuperación de dióxido de azufre, eliminación de mercurio y tratamiento de efluentes y reutilización del agua. Las conclusiones sobre MTD contenidas en todos los capítulos deben consultarse para tener una comprensión completa.

1. Industria de Metales No Férreos

En la UE se producen al menos 42 metales no férreos más ferroaleaciones y carbono y grafito, que se utilizan en una variedad de aplicaciones en las industrias metalúrgica, química, de construcción, transporte y producción/distribución de energía. Por ejemplo, el cobre de alta pureza es esencial para la producción y distribución de electricidad, y pequeñas cantidades de níquel o metales refractarios mejoran la resistencia a la corrosión y otras propiedades del acero. También se utilizan en muchos desarrollos de alta tecnología, en particular en los sectores de defensa, informática, electrónica y telecomunicaciones.

Los metales no férreos se producen a partir de una serie de materias primas primarias y secundarias. Las materias primas primarias se derivan de minerales que se extraen en minas y son tratados antes de su proceso metalúrgico para producir metal bruto. El tratamiento de los minerales es se realiza normalmente cerca de las minas. Las materias primas secundarias son la chatarra y residuos indígenos, que también pueden ser sometidos a algún pretratamiento para eliminar los materiales de recubrimiento.

En Europa, los depósitos de minerales que contienen metales en concentraciones viables se han agotado progresivamente y quedan pocas fuentes indígenas. La mayor parte de concentrados se importan pues de una serie de procedencias de todo el mundo.

El reciclaje constituye un importante componente de los suministros de materia prima de una serie de metales. Cobre, aluminio, plomo, zinc, metales preciosos y metales refractarios, entre otros, pueden der recuperados desde sus productos o residuos, pudiendo ser devueltos al proceso de producción sin pérdida de calidad en el reciclaje. Globalmente, las materias primas secundarias representan un elevado porcentaje de la producción, lo que sirve para reducir el consumo de materias primas y energía.

El producto de la industria es metal refinado o lo que se conoce como semis o semifabricados, como lingotes moldeados de metal y aleaciones metálicas o formas forjadas, extrusionadas, papel metálico, chapa, bandas, barras, etc.

La estructura de la industria varía de un metal a otro. No hay ninguna empresa que produzca todos los metales no férreos, aunque hay algunas empresas paneuropeas que producen varios metales, como cobre, plomo, zinc, cadmio, etc.

El tamaño de las empresas que producen metales y aleaciones metálicas en Europa va desde unas pocas empresas con más de 5.000 empleados hasta gran número de empresas que tienen entre 50 y 200 empleados. La propiedad varía entre grupos metalúrgicos paneuropeos y nacionales, holdings industriales, empresas públicas y compañías privadas.

Algunos metales son esenciales como elementos a nivel de trazas, pero a concentraciones mayores se caracterizan por la toxicidad del metal o de sus iones o compuestos, y muchos de ellos están incluidos en diversas listas de materias tóxicas. El plomo, el cadmio y el mercurio son los que suscitan mayor preocupación.

2. Temas Medioambientales del Sector

Los principales temas medioambientales para la producción de la mayoría de metales no férreos a partir de materias primas primarias son el potencial de emisión a la atmósfera de polvo y de compuestos metal/metal, así como de dióxido de azufre al tostar o fundir concentrados de sulfuros o al utilizar combustibles u otros materiales con azufre. La captura del azufre y su

conversión o eliminación es por consiguiente un factor importante en la producción de los metales no férreos. Los procesos pirometalúrgicos son posibles fuentes de polvo y de metales de hornos, reactores y de la transferencia de metales fundidos.

El consumo de energía y la recuperación de calor y energía son factores importantes en la producción de los metales no férreos. Dependen del uso eficaz del contenido energético de los minerales sulfurosos, de la demanda energética de las etapas del proceso, del tipo y método de suministro de la energía empleada y del uso de métodos eficaces de recuperación del calor. En el Capítulo 2 del documento se presentan ejemplos prácticos.

Los principales aspectos medioambientales de la producción de metales no férreos a partir de materias primas secundarias están también relacionados con los gases emitidos de los diversos hornos y transferencias que contienen polvo, metales y, en algunos pasos de proceso, gases ácidos. También hay potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias; la destrucción y/o captura de dioxinas y/o COVs es un objetivo a conseguir.

Los principales temas medioambientales del aluminio primario son la producción de hidrocarburos polifluorados y de fluoruros durante la electrolisis, la producción de residuos sólidos de las células de producción y la generación de residuos sólidos durante la producción de alúmina.

La producción de residuos sólidos es también un tema importante para la producción de zinc y otros metales durante las etapas de eliminación de hierro.

Otros procesos utilizan a menudo reactivos peligrosos como HCl, HNO_3, Cl_2 y disolventes orgánicos para la lixiviación y la purificación. Las técnicas avanzadas de proceso permiten contener estos materiales y recuperarlos y reutilizarlos. El sellado del reactor es un tema importante a este respecto.

En la mayoría de los casos, estos gases de proceso de limpian mediante filtros de tejido, por lo que las emisiones de polvo y compuestos metálicos se ven reducidas. La limpieza de gases mediante lavadores húmedos y precipitadores electrostáticos húmedos es particularmente eficaz para los gases de proceso que son sometidos a recuperación de azufre en una planta de ácido sulfúrico. En algunos casos, en los que el polvo es abrasivo o difícil de filtrar, los lavadores húmedos son también eficaces. El sellado de los hornos y la transferencia y almacenamiento en recintos cerrados son importantes para evitar las emisiones fugitivas.

En resumen, los temas principales para los procesos de producción para uno de los grupos de metales incluyen los siguientes componentes:

- Para la producción de cobre: SO_2, polvo, compuestos metálicos, compuestos orgánicos, agua residual (compuestos metálicos), residuos como revestimientos de los hornos, lodo, polvo de los filtros y escorias. La formación de dioxinas durante el tratamiento de las materias secundarias de cobre es también un tema importante.
- Para la producción de aluminio: Fluoruros (inca. HF), polvo,compuestos metálicos, SO_2, COS, PAH, COVs, gases de efecto invernadero (CFCs y CO_2), dioxinas (secundarias), cloruros y HCl. Los residuos como los de bauxita, revestimientos de crisol consumidos, polvo de filtros y escorias salinas y aguas residuales (aceite y amoniaco).
- Para la producción de plomo, zinc y cadmio: polvo, compuestos metálicos, COVs (incluidas dioxinas), olores, SO_2, otros gases ácidos, aguas residuales (compuestos metálicos, residuos como lodos, residuos ricos en hierro, polvo de filtros y escorias.
- Para la producción de metales preciosos: COVs, polvo, compuestos metálicos, dioxinas, olores, NOx, otros gases ácidos como cloro y SO_2. Residuos como lodo, polvo de filtros y escorias y aguas residuales (compuestos metálicos y orgánicos).
- Para la producción de mercurio: Vapor de mercurio, polvo, compuestos metálicos, olores, SO_2, otros gases ácidos, aguas residuales (compuestos metálicos), residuos como lodo, polvo de filtros y escorias.

- Para la producción de metales refractarios, polvo de metal duro y carburos metálicos: polvo, metal duro sólido y compuestos metálicos, aguas residuales (compuestos metálicos), residuos como polvo de filtros, lodo y escorias. Algunos productos químicos como fluoruro de hidrógeno (HF) que se emplean para el proceso de tántalo y niobio son altamente tóxicos. Esto debe tenerse en consideración para la manipulación y almacenamiento de estos materiales.
- Para la producción de ferroaleaciones: Polvo, compuestos metálicos, CO, C_6O_2, SO_2, recuperación de energía, aguas residuales (compuestos metálicos), residuos como polvo de filtro, lodo y escorias.
- Para la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos: cloro, HCl, dioxinas, SF_6, polvo, compuestos metálicos, CO_2, SO_2, aguas residuales (compurestos metálicos), residuos como polvo, aluminato, polvo de filtro y escorias.
- Para la producción de níquel y cobalto: COVs, CO, polvo, compuestos metálicos, olores, SO_2, cloro y otros gases ácidos, aguas residuales (compuestos metálicos y orgánicos), residuos como lodo, polvo de filtro y escorias.
- Para la producción de carbono y grafito: PAHs, hidrocarburos, polvo, olores, SO_2, prevención de aguas residuales, residuos como polvo de filtro.

3. Procesos Aplicados

La gama de materias primas a disposición de las distintas instalaciones es amplia y esto significa el uso de gran variedad de procesos de producción metalúrgica. En muchos casos, la elección del proceso viene dada en función de las materias primas. Las siguientes tablas resumen los hornos empleados para la producción de metales no férreos:

Horno	Metales Usados	Materiales Usados	Comentarios
Secador de serpentín de vapor Secador de lecho fluido Secador incandescente.	Cu y otros	Concentrados	
Kiln Rotativo.	Secado de la mayoría de metales. Vaporización de ZnO. Calcinación de alúmina, Ni y ferroaleaciones. Combustión de película fotográfica para producción de metales preciosos. Desengrase de chatarra de Cu y Al.	Minerales, concentrados y chatarras y residuos diversos.	Aplicaciones de secado, calcinación y vaporización. Uso como incinerador.
Lecho fluidizado.	Cobre y zinc. Al_2O_3	Concentrados. $Al(OH)_3$	Calcinación y tostación.
Horno de sinterización con tiro superior.	Zinc y plomo	Concentrados y secundarios.	Sinterización.
Horno de sinterización con tiro inferior.	Zinc y plomo	Concentrados y secundarios.	Sinterización.
Horno de sinterización con correa de acero.	Ferroaleaciones, Mn, Nb.	Mineral.	Otras aplicaciones posibles.
Herreshoff.	Mercurio. Molibdeno (recuperación de renio).	Minerales y concentrados.	Tostación, calcinación.

Hornos de secado, de tostación, de sinterizado y de calcinación

Hornos	Metales Usados	Materiales Usados	Comentarios
Hornos de crisol cerrados con revestimiento refractario.	Metales refractarios, ferroaleaciones especiales.	Oxidos metálicos.	
Hornos Pit abiertos	Metales refractarios, ferroaleaciones especiales	Oxidos metálicos.	
Baiyin.	Cobre.	Concentrados.	
Hornos de Arco Eléctrico.	Ferroaleaciones.	Concentrados, minerales.	
Contop/Ciclón.	Cobre.	Concentrados.	
Hornos de Arco Eléctrico Sumergido.	Metales preciosos, cobre, ferroaleaciones.	Escoria, materiales secundarios, concentrados.	Para la producción de ferroaleaciones se utilizan los tipos abiertos, semicerrados y cerrados.
Rotatorios.	Aluminio, plomo, cobre, metales preciosos.	Chatarra y otros secundarios, cobre negro, metales preciosos.	Oxidación y reacción con substrato.
Hornos rotatorios basculantes.	Aluminio.	Chatarra y otros secundarios.	Minimiza el uso de fundente salino.
Hornos de reverbero.	Aluminio, cobre, otros.	Chatarra y otros secundarios, cobre negro.	Fundición de concentrados de Cu en el resto del mundo.
Vanyucov.	Cobre.	Concentrados.	
ISA Smelt/Ausmelt.	Cobre, plomo.	Materiales intermedios, concentrados y secundarios.	
QSL.	Plomo.	Concentrados y secundarios.	
Kivcet.	Plomo Cobre.	Concentrados y secundarios.	Concentrados.
Noranda.		Cobre.	
El Teniente.	Cobre.	Concentrados.	
TBRC TROF.	Cobre (TBRC), Metales preciosos.	La mayoría de secundarios, incl. limos.	
Hornos de Fundición Mini.	Cobre/plomo/estaño.	Chatarra.	
Alto Horno e ISF.	Plomo, plomo/zinc, cobre, metales preciosos, ferromanganeso alto en carbono.	Concentrados, la mayoría de secundarios.	Para producción de ferromanganeso se utiliza sólo junto con recuperación de energía.
Hornos de Incandescencia Inco.	Cobre, níquel.	Concentrados.	
Hornos de Fundición por Incandescencia Outokumpu.	Cobre, níquel	Concentrados.	
Hornos de proceso Mitsubishi.	Cobre.	Concentrados y chatarra anódica.	
Peirce Smith.	Cobre (convertidor), Ferroaleaciones, Producción de óxidos metálicos.		
Hoboken.	Cobre (convertidor).	Mata y chatarra anódica.	
Hornos Convertidores de Incandescencia Outokumpu.	Cobre (convertidor).	Mata y chatarra anódica. Mata.	
Hornos Convertidores Noranda.	Cobre (convertidor).		
Hornos Convertidores Mitsubishi	Cobre (convertidor).	Mata. Mata.	

Hornos de fundición y refinado

Hornos	Metales Usados	Materiales Usados	Comentarios
Hornos de inducción.	La mayoría.	Metal y chatarra limpios.	La agitación por inducción facilita la aleación. Puede aplicarse vacío para algunos metales.
Hornos de haz de electrones.	Metales refractarios.	Metal y chatarra limpios.	
Hornos rotatorios.	Aluminio, plomo.	Varias calidades de chatarra.	Se utilizan fundentes salinos para matrices complejas.
Hornos de reverbero.	Aluminio (primario y secundario).	Varias calidades de chatarra.	La configuración del baño o de la solera puede variar. Fusión o fijación.
Contimelt.	Cobre.	Cobre anódico, chatarra limpia y cobre negro.	Sistema de horno integral.
Hornos de cuba.	Cobre.	Cobre anódico y chatarra limpia.	Condiciones reductoras.
Hornos de tambor (Thomas).	Cobre.	Chatarra de cobre.	Fusión, refinado por combustión.
Hornos de crisol con calentamiento indirecto (caldera indirecta).	Plomo, zinc.	Chatarra limpia.	Fusíón, refinado, aleación.
Hornos de crisol con calentamiento directo.	Metales preciosos.	Metal limpio.	Fusión, aleación.

Hornos de Fusión

También se utilizan procesos hidrometalúrgicos. Se utilizan ácidos y álcalis (NaOH, a veces también Na_2CO_3) para disolver el contenido metálico de una serie de calcinas, minerales y concentrados antes de su refinado y electrorrecuperación. El material a lixiviar está normalmente en forma de óxido, bien como un mineral oxídico o un óxido producido por tostación. La recuperación directa de algunos concentrados o matas se realiza también tanto a presión elevada como a presión atmosférica. Algunos minerales de sulfuro de cobre pueden lixiviarse con ácido sulfúrico u otros medios, en ocasiones utilizando bacterias naturales para promover la oxidación y disolución, pero se requieren tiempos de estancia muy largos.

Es posible agregar aire, oxígeno o soluciones que contienen cloruro férrico a los sistemas de lixiviación para obtener las condiciones apropiadas para la disolución. Las soluciones producidas se tratan en distintas formas para refinar y recuperar los metales. Una práctica común es devolver las soluciones consumidas a la etapa de lixiviación, si procede, para conservar los ácidos y soluciones alcalinas.

4. Emisiones y Consumos Actuales

La gama de materias primas es también un factor significativo y afecta el uso de la energía, la cantidad de residuos producidos y la cantidad de otros materiales utilizados. Un ejemplo es la eliminación de impurezas como hierro en escorias; la cantidad de impurezas presentes determina la cantidad de escoria producida y la energía utilizada.

Las emisiones al medio ambiente dependen de los sistemas de recogida o eliminación utilizados. Las gamas actuales notificadas para una serie de procesos de eliminación durante el intercambio de información se resumen en la tabla siguiente:

Técnica de eliminación	**Emisiones reportadas**			**Emisión Específica** (cantidad por t de metal producido)
	Componente	**mínimo**	**máximo**	
Filtro de tejido, EP en caliente y ciclón	Polvo (metales según composición)	< 1 mg/Nm^3	100 mg/Nm^3	100 - 6.000 g/t
Filtro de carbón	Total C	< 20 mg/Nm^3		
Postcombustión (incl. enfriamiento para dioxinas)	Total C	< 2 mg/Nm^3	100 mg/Nm^3	10 - 80 g/t
	Dioxinas (TEQ)	< 0,1 ng/Nm^3	5 ng/Nm^3	5 - 10 µg/t
	PAH (EPA)	< 1 µg/Nm^3	2.500 µg/Nm^3	
	HCN	< 0,1 mg/Nm^3	10 mg/Nm^3	
Lavador húmedo o semiseco	SO_2	< 50 mg/Nm^3	250 mg/Nm^3	500 - 3.000 g/t
	Hidrocarburos	<10 mgC/Nm^3	200 mgC/Nm^3	
	Cloro	< 2 mg/Nm^3		
Lavador de alúmina	Polvo	< 1 mg/Nm^3	20 mg/Nm^3	
	Hidrocarburos	< 1 mgC/Nm^3	50 mgC/Nm^3	
	PAH (EPA)	< 20 µg/Nm^3	2.000 µg/Nm^3	
Recuperación de cloro	Cloro	< 5 mg/Nm^3		
Combustión Quemador bajo en NOx	NOx	10 mg/Nm^3	500 mg/Nm^3	
Lavador oxidante	NOx		< 100 mg/Nm^3	
Planta de ácido sulfúrico reportada como conversión de SO_2	contacto doble	99,3 %	99,7%	
	contacto simple	95%	99,1%	1 - 16 kg/t
Enfriador, EP, adsorción con cal/carbón y filtro de tejido	PAH (EPA)	0,1 mg/Nm^3	6 mg/Nm^3	
	Hidrocarburos	20 mgC/Nm^3	200 mgC/Nm^3	

Rango notificado de las emisiones actuales

Los gases de proceso se capturan y se limpian en filtros de tejido para reducir las emisiones de polvo y compuestos metálicos como los del plomo. Los filtros de tejido modernos ofrecen considerables mejoras en cuanto a prestaciones, fiabilidad y vida útil. Se utilizan sistemas de poscombustión y de absorción con carbón para eliminar las dioxinas y COVs.

No obstante, los gases no capturados o emisiones fugitivas no son tratados. También se producen emisiones de polvo del almacenamiento, manipulaciópn y pretratamiento de materias primas, en las que las emisiones fugitivas de polvo también desempeñan un importante papel. Esto es particularmente cierto para la producción primaria y secundaria, ya que su importancia puede ser mucho mayor que la de las emisiones capturadas y eliminadas. Se requiere un minucioso diseño de las plantas y de los procesos para capturar y tratar los gases de proceso cuando las emisiones fugitivas son significativas.

La siguiente tabla muestra que las emisiones fugitivas no capturadas son temas importantes:

	Emisión de polvo kg/a	
	Antes de la recogida adicional de gas secundario (1992)	**Después de la recogida adicional de gas secundario (1996)**
Producción anódica t/a	220.000	325.000
Emisiones fugitivas Total Fundición	66.490	32.200
Fundición con línea de techo	56.160	17.020
Emisiones de fundición en chimenea primaria Fundición/planta ácida	7.990	7.600
Chimenea-campanas secundarias	2.547	2.116

Comparación de las cargas de polvo eliminadas y fugitivas en una fundición primaria de cobre

Muchos procesos utilizan sistemas herméticos de refrigeración y de agua de proceso, pero todavía existe la posibilidad de emitir metales pesados en el agua. Los métodos empleados para reducir el uso de agua y la producción de aguas residuales se estudian en el Capítulo 2.

La producción de residuos es un factor significativo en este sector, pero los residuos contienen a menudo cantidades recuperables de metales y es práctica común utilizar los residuos in situ o en otras instalaciones para recuperar los metales. Muchas escorias que se producen son inertes y no lixiviables, y se utilizan en muchas obras de ingeniería civil. Otras escorias, como la escoria salina, pueden ser tratadas para recuperar otros componentes para uso en la industria, pero la industria debe asegurarse de que estas operaciones de recuperación se realicen con un alto estándar medioambiental.

5. Conclusiones Clave sobre MTD

El intercambio de información durante la preparación del BREF para la producción de metales no férreos ha permitido alcanzar conclusiones sobre MTD para la producción y procesos asociados. Por consiguiente, es necesario hacer referencia a las secciones de cada uno de los capítulos que describen las MTD para una comprensión completa de las MTD y de los procesos y emisiones asociados. A continuación se resumen los hallazgos clave.

• Actividades preliminares

La gestión del proceso, la supervisión y el control del proceso y de los sistemas de eliminación son factores muy importantes. Una buena práctica de formación y la instrucción y motivación de los operarios son también importantes, especialmente para prevenir la contaminación medioambiental. Las buenas técnica de manipulación de materias primas pueden prevenir la emisiones fugitivas. Otras técnicas importantes son:

- La consideración de las implicaciones medioambientales de un nuevo proceso o materia prima en las etapas preliminares del proceso, que se revisen a intervalos regulares posteriormente.
- Diseño del proceso para aceptar la gama prevista de materia prima. Pueden producirse problemas importantes si, por ejemplo, los volúmenes de gas son demasiado grandes o el

uso de energía del material es mayor del previsto. La fase de diseño es el momento más eficaz desde el punto de vista económico para introducir mejoras en el comportamiento medioambiental global.
- Uso de un registro de control del proceso de diseño y de toma de decisiones para mostrar el modo en que han sido considerados los distintos procesos y opciones de eliminación.
- Procedimientos de planificación y de puesta en funcionamiento para la planta nueva o modificada.

La siguiente tabla resume las técnicas de almacenamiento y manipulación de materias primas sobre la base del tipo y las características del material.

Materia prima	Grupo de metales	Método de manipulación	Método de almacenamiento	Comentarios
Concentrados:	Todos, si forman polvo	Transportadores o sistemas neumáticos cerrados	Recinto cerrado	Prevención de la contaminación del agua.
	Todos, si no forman polvo	Transportadores cubiertos	Almacén cubierto	
Material de grano fino (ej. polvo de metal):	Metales refractarios	Transportadores o sistemas neumáticos cerrados Transportadores cubiertos	Bidones, silos y tolvas cerrados	Prevención de la contaminación del agua y de las emisiones fugitivas a la atmósfera.
Materias primas secundarias:	Todos - elementos grandes	Cargador mecánico	Abierto	Prevención de la contaminación del agua y de reacciones con el agua. Drenaje de aceite de las virutas.
	Todos - elementos pequeños	Skips de carga	Tramos cubiertos	
	Todos - material fino	Cerrado o aglomerado	Cerrado si es polvoriento	
Fundentes:	Todos - si forman polvo	Transportadores o sistemas neumáticos cerrados	Recinto cerrado	Prevención de la contaminación del agua.
	Todos - si no forman polvo	Transportador cubierto	Almacén cubierto	
Combustible sólido y coque:	Todos	Transportadores cubiertos si no forma polvo	Almacén cubierto si no forma polvo	
Combustibles líquidos y LPG	Conductos elevados	Almacenamiento certificado, zonas compartimentadas	Retroventilación de las líneas de suministro	
Gases de proceso:	Todos	Conductos elevados, conductos de presión reducida (Cloro, CO)	Almacenamiento certificado. Alarmas para gases tóxicos	
Disolventes:	Grupo de Cu, Ni, Zn, PM, Carbono	Conductos elevados Manual	Bidones, depósitos	Retroventilación de las líneas de suministro.
Productos – Cátodos, alambrón, palanquillas, lingotes, aglomerados, etc.	Todos	Según las condiciones	Area de cemento abierta o almacén cubierto.	Sistema de desagüe apropiado.
Residuos de proceso para recuperación	Todos	Según las condiciones	Abierto, cubierto o cerrado según la formación de polvo y la reacción con agua.	Sistema de desagüe apropiado.
Residuos para desecho (ej. revestimientos de hornos)	Todos	Según las condiciones	Recipientes abiertos, cubiertos o cerrados o herméticos (bidones) según la formación de polvo y la reacción con agua.	Sistema de desagüe apropiado.

Resumen de técnicas de gestión y manipulación de materias primas

El diseño del horno, el uso de métodos de pretratamientos adecuados y el control de los procesos se identificaron como importantes características de la MTD.

El uso de mezclas de materias primas para optimizar el proceso impide el uso de materias inadecuadas y potencia al máximo la eficacia del proceso. El muestreo y el análisis de los materiales de entrada y la segregación de algunos materiales son factores importantes en esta técnica.

Un buen diseño, mantenimiento y control son importantes para todas las etapas de proceso y eliminación. El muestreo y el control de las emisiones al entorno deben realizarse de acuerdo con métodos estandarizados nacionales o internacionales. Deben regularse los parámetros importantes que deben usarse para el control del proceso o la eliminación. La regulación continua de los parámetros claves debe realizarse si es práctico.

- **Control de procesos**

Las técnicas de control de proceso que están diseñadas para medir y mantener parámetros óptimos como la temperatura, la presión, la composición de los gases y otros parámetros de proceso críticos, etc. se consideran como MTD.

Muestreo y análisis de las materias primas para controlar las condiciones en la planta. Debe conseguirse una buena mezcla de las materias de entrada para obtener una óptima eficacia de conversión y reducir las emisiones y los productos rechazados.

El uso de sistemas de pesaje y medida de los materiales de entrada, el uso de microprocesadores para controlar la velocidad de alimentación de los materiales, las condiciones de los procesos críticos y de combustión y las adiciones de gas permiten la optimización de las operaciones de proceso. Para ello pueden medirse varios parámetros y disponer de alarmas para parámetros críticos, como pueden ser:

- El control en línea de la temperatura, de la presión (o depresión) del horno y del volumen o caudal del gas.
- El control de los componentes gaseosos (O_2, SO_2, CO, polvo, NOx etc).
- El control en línea de las vibraciones para detectar bloqueos y posibles fallos del equipo.
- El chequeo en línea de las emisiones para controlar los parámetros de proceso críticos.
- El chequeo y control de la temperatura de los hornos de fusión para evitar la producción de vapores de metales y de óxidos metálicos por sobrecalentamiento.

Los operarios, técnicos y demás deben recibir formación y evaluación continua en el empleo de las instrucciones de uso, el uso de las modernas técnicas de control y la importancia de las alarmas y las acciones a tomar cuando aparecen alarmas.

La optimización de los niveles de supervisión para aprovechar lo anterior y mantener la responsabilidad de los operarios.

- **Recogida y eliminación de gases**

Los sistemas de recogida de humos utilizados deben servirse de sistemas de sellado de hornos o reactores y estar diseñados para mantener una presión reducida que evite fugas y emisiones fugitivas. Deben utilizarse sistemas que mantengan la hermeticidad del horno o instalar campanas extractoras. Ejemplos de ellos son: La adición de material a través de electrodos; adiciones a través de toberas o lanzas y el uso de válvulas giratorias robustas en los

sistemas de alimentación. La recogida secundaria de humos es cara y consume mucha energía, pero se necesita en el caso de algunos hornos. El sistema utilizado debe ser un sistema inteligente capaz de ajustar la extracción de humo al origen y la duración de cualquier humo

En general, para la eliminación del polvo y de los metales asociados, los filtros de tejido (tras la recuperación de calor o enfriamiento de los gases) pueden ofrecer las mejores prestaciones siempre que se utilicen tejidos modernos y resistentes al desgaste, las partículas sean adecuadas y se utilice un chequeo continuo para detectar fallos. Los filtros de tejido modernos (ej. filtro de membrana) ofrecen mejoras significativas en características, fiabilidad y vida útil, y por consiguiente permiten ahorros de costes a medio plazo. Pueden utilizarse en las instalaciones existentes y pueden montarse durante el mantenimiento. Disponen de sistemas de detección de rotura de la bolsa y de métodos de limpieza en línea.

Para polvos pegajosos o abrasivos, los precipitadores electrostáticos húmedos pueden ser útiles siempre que estén debidamente diseñados para la aplicación.

El tratamiento de los gases para la fase de fusión o de incineración debe incluir una etapa de eliminación de dióxido de azufre y/o postcombustión si la misma se considera necesaria para evitar problemas de calidad del aire a nivel local, regional o a largo plazo, o si puede haber dioxinas.

Puede haber variaciones en las materias primas que influyan en la gama de componentes o en el estado físico de algunos componentes como el tamaño y las propiedades físicas del polvo producido. Estas variaciones deben evaluarse localmente.

- **Prevención y destrucción de dioxinas**

La presencia de dioxinas o su formación durante un proceso debe ser tenida en consideración para muchos de los procesos pirometalúrgicos utilizados para la producción de metales no férreos. Se informa sobre ejemplos concretos en los capítulos específicos de los distintos metales, y en estos casos las siguientes técnicas se consideran como MTD para la prevención de la formación de dioxinas y la destrucción de las que pueda haber presentes. Estas técnicas pueden usarse en combinación. Algunos metales no férreos se sabe que catalizan síntesis de novo y en ocasiones es necesario disponer de un gas limpio antes de proceder a una ulterior eliminación.

- El control de calidad de la chatarra de entrada según el proceso utilizado. El uso del material de alimentación correcto para el horno o proceso particular. La selección y clasificación para evitar la adición de material contaminado con materia orgánica o precursores puede reducir el potencial de formación de dioxinas.
- El uso de sistemas de postcombustión debidamente diseñados y utilizados y el rápido enfriamiento de los gases calientes hasta < 250°C.
- El uso de condiciones de combustión óptimas. Par ello es necesario el uso de inyección de oxígeno en la parte superior del horno para asegurar la combustión completa de los gases del horno.
- La absorción sobre carbón activado en un reactor de lecho fijo o móvil o mediante inyección en la corriente de gas, y su eliminación como polvo de filtro.
- Eliminación de polvo de alta eficacia, como por ejemplo filtros cerámicos, filtros de tejido de alta eficacia o tren de limpieza de gases antes de una planta de ácido sulfúrico.
- El uso de una etapa de oxidación catalítica o de filtros de polvo que incorporen un recubrimiento catalítico.
- El tratamiento de los polvos recogidos en hornos de alta temperatura para destruir dioxinas y recuperar metales.

Las concentraciones de las emisiones asociadas con las técnicas arriba indicadas van desde <0,1 a 0.5 ng/Nm^3 TEQ según la alimentación, el proceso de fusión y las técnicas o combinación de técnicas empleadas para la eliminación de dioxinas.

- **Procesos Metalúrgicos**

La gama de materias primas a disposición de las diversas instalaciones es amplia y significa que hay necesidad de incluir una serie de procesos de producción metalúrgica en las secciones de MTD de la mayoría de los grupos de metales. En muchos casos la elección del proceso está regida por las materias primas, por loq ue el tipo de horno tiene sólo un efecto menor en la MTD, siempre que el horno hay sido diseñado para las materias primas utilizadas y se utilice recuperación de energía cuando sea viable.

Hay excepciones. Por ejemplo, el uso de alimentación multipunto de alúmina a células de precocción activadas centralmente se identificó como MTD para aluminio primario, así como el uso de hornos herméticos en la producción de algunas ferroaleaciones para permitir la recogida de gases de alto valor calorífico.

Para cobre primario, el horno de reverbero no se considera MTD. Las otras principales influencias son la mezcla de las materias primas, el control del proceso y la gestión y recogida de vapores. La jerarquía en la elección de un proceso nuevo o modificado se identificó como:

- Pretratamiento térmico o mecánico de la materia secundaria para minimizar la contaminación del material de entrada.
- El uso de hornos u otras unidades de proceso herméticos para para evitar las emisiones fugitivas, permitir la recuperación de calor y hacer posible la recogida de los gases de proceso para otros usos (ej. CO como combustible y SO_2 como ácido sulfúrico) o para eliminación.
- El uso de hornos u otras unidades de proceso semi-herméticos cuando no haya disponibles hornos herméticos.
- En algunos casos, la limitación a las técnicas que evitan la transferencia de materias fundidas puede evitar la recuperación de algunos materiales secundarios que luego pasarán al caudal residual. En estos casos, el uso de sistemas de recogida de vapores secundarios o terciarios es apropiada para poder recuperar dichos materiales.
- Diseño de campanas y conductos para capturar los humos derivados de las transferencias en caliente de metal, matas o escorias, así como de coladas de metal fundido.
- Pueden ser necesarios recintos cerrados para hornos y reactores que impidan la liberación de pérdidas de vapores a la atmósfera.
- Cuando la extracción primaria y el uso de recintos cerrados puedan ser ineficaces, el horno puede ser totalmente cerrado y extraer el aire de ventilación mediante ventiladores de extracción a un sistema adecuado de tratamiento y evacuación.
- Máximo aprovechamiento de la energía de los concentrados sulfurosos.

- **Emisiones a la Atmósfera**

Las emisiones a la atmósfera se derivan de las etapas de almacenamiento, manipulación, pirometalurgia e hidrometalurgia. La transferencia de materiales es particularmente importante. Los datos facilitados han confirmado qe la importancia de las emisiones fugitivas en muchos procesos es muy elevada, y que las emisiones fugitivas pueden ser mucho mayores que las que son capturadas y eliminadas. En estos casos, es posible reducir el impacto medioambiental siguiendo la jerarquía de técnicas de recogida de gas del almacenamiento y la manipulación de

materiales, de los reactores u hornos, así como de los puntos de transferencia de materiales. Las posibles emisiones fugitivas deben considerarse en todas las etapas de diseño y desarrollo de procesos. La jerarquía de recogida de gas de todas las etapas de proceso es:

- Optimización de procesos y minimización de las emisiones;
- Uso de reactores y hornos herméticos;
- Recogida objetiva de vapores objetivizada;

La recogida de vapores mediante líneas de techo consume gran cantidad de energía y debe ser el últmo recurso.

Las posibles fuentes de emisiones a la atmósfera se resumen en la tabla siguiente, que también incluye los métodos de prevención y tratamiento. Las emisiones al aire se notifican sobre la base de las emisiones recogidas. Las emisiones asociadas se dan como porcentajes diarios sobre la base de un control continuo durante el periodo operativo. En casos en los que el chequeo continuo no sea practicable, el valor es el promedio a lo largo del periodo de muestreo. Se utilizan condiciones normales: 273 ºK, 101,3 kPa, contenido de oxígeno medido y gas seco sin dilución de los gases.

La captura de azufre es un requisito importante en la tostación o fusión de minerales o concentrados sulfurosos. El dióxido de azufre producido por el proceso se recoge y puede recuperarse como azufre, yeso (si no hay efectos sobre otros medios) o anhídrido sulfuroso, o puede convertirse a ácido sulfúrico. La elección del proceso depende de la existencia de mercados locales para el dióxido de azufre. La producción de ácido sulfúrico en una planta de ácido sulfúrico de doble contacto con un mínimo de cuatro pasadas, o en una planta de contacto simple con producción de yeso a partir del gas de escape y utilizando un catalizador moderno, se consideran como MTD. La configuración de la planta dependerá de la concentración de dióxido de azufre producido en la etapa de tostación o fusión.

Etapa de proceso	Componentes en el gas de escape	Método de tratamiento
Manipulación y almacenamiento de materiales.	Polvo y metales.	Correcto almacenamiento, manipulación y transferencia. Recogida de polvo y filtro de tejido si es necesario.
Molturación y secado.	Polvo y metales.	Operación de proceso. Recogida de gas y filtro de tejido.
Sinterización/tostación Fundición Conversión Refinado por combustión	COVs, dioxinas. Postcombustión, adición de adsorbente y de carbón activado.	Postcombustión, adición de adsorbente y de carbón activado.
	Polvo y compuestos metálicos.	Recogida del gas, limpieza el gas en filtros de tejido, recuperación de calor.
	Monóxido de carbono.	Postcombustión si es necesario.
	Dióxido de axufre.	Planta de ácido sulfúrico (para minerales sulfurosos) o lavador.
Tratamiento de escorias	Polvo y metales.	Recogida de gas, enfriamiento y filtro de tejido.
	Dióxido de azufre.	Lavador.
	Monóxido de carbono.	Postcombustión.
Lixiviación y refinado químico.	Cloro.	Recogida y reutilización del gas, lavador químico húmedo.
Refinado carbonílico.	Monóxido de carbono. Hidrógeno.	Proceso hermético, recuperación y reutilización. Postcombustión y eliminación de polvo en filtro de tejido para el gase de escape.
Extracción con disolventes.	COV (depende del disolvente empleado y debe determinarse localmente para evaluar el posible riesgo).	Contención, recogida del gas, recuperación del disolvente. Adsorción con carbón si es necesario.
Refinado térmico	Polvo y metales	Recogida de gas y filtro de tejido.
	Dióxido de azufre.	Lavador si es necesario.
Electrolisis con sales fundidas.	Flúor, cloro, CPFs.	Operación de proceso. Recogida de gas, lavador (alúmina) y filtro de tejido.
Cocción de electrodo, grafitización.	Polvo, metales, SO_2, Flúor, PAHs, alquitrán.	Recogida de gas, condensador y EP, postcombustión o lavador de alúmina y filtro de tejido. Lavador si es necesario para SO_2
Producción de metal en polvo	Polvo y metales.	Recogida de gas y filtro de tejido.
Producción de polvo.	Polvo y metales.	Recogida de gas y filtro de tejido.
Reducción a alta temperatura.	Hidrógeno.	Proceso hermético, reutilización.
Electro-recuperación.	Cloro. Neblina ácida.	Recogida y reutilización de gas. Lavador húmedo. Eliminador de neblinas.
Fusión y moldeo.	Polvo y metales.	Recogida de gas y filtro de tejido.
	COVs, dioxinas (alimentación de compuestos orgánicos).	Postcombustión (inyección de carbón).

Nota: La captura del polvo con un filtro de tejido puede requerir la eliminación de las partículas calientes para evitar incendios. Deben usarse precipitadores electrostáticos en caliente en un sistema de limpieza de gas antes de una planta de ácido sulfúrico o para gases húmedos.

Resumen de fuentes y opciones de tratamiento/eliminación

En la tabla siguiente se incluye un resumen de los niveles de emisiones asociados con los sistemas de eliminación que se consideran como MTD para los procesos de metales no férreos. En las conclusiones de MTD de los capítulos de los metales específicos se dan más detalles.

Técnica de eliminación	Rango Asociado	Comentarios
Filtro de tejido.	1 - 5 mg/Nm^3 Metales - según la composición del polvo.	Depende de las características del polvo.
Filtro de carbón o Biofiltro.	Total C orgánicos C < 20 mg/Nm^3	Fenol < 0.1 mg/Nm^3
Poscombustión (incluido enfriamiento para eliminación de dioxinas).	Total C orgánicos < 5 - 15 mg/Nm^3 Dioxinas < 0,1 - 0,5 ng/Nm^3 TEQ PAH (OSPAR 11) < 200 µgCNm^3 HCN < 2 mg/Nm^3	Diseñado para el volumen de gas. Hay otras técnicas disponibles para una mayor reducción de las dioxinas mediante inyección de carbón/cal, reactores catalíticos/filtros.
Condiciones de combustión optimizadas.	Total C orgánicos C < 5 - 50 mg/Nm^3	
EP húmedo Filtro cerámico.	Polvo < 5 mg/Nm^3	Depende de las características, por ejemplo del polvo, humedad o alta temperatura.
Lavador alcalino húmedo y semiseco.	SO_2 < 50 - 200 mg/Nm^3 Alquitrán < 10 mg/Nm^3 Cloro < 2 mg/Nm^3	
Lavador de alúmina.	Polvo 1 - 5 mg/Nm^3 Hidrocarburos < 2 mg/Nm^3 PAH (OSPAR 11) < 200 µgC/Nm^3	
Recuperación de cloro.	Cloro < 5 mg/Nm^3.	El cloro se reutiliza. Posibles emisiones fugitivas accidentales.
Lavador oxidante.	NOx < 100 mg/Nm^3	Del uso de recuperación de ácido nítrico seguido de eliminación de trazas.
Quemador de bajo nivel de NOx	< 100 mg/Nm^3	Los valores más elevados se asocian con enriquecimiento con oxígeno para reducir el uso de energía. Em estos casos, los volúmenes y masas de las emisiones se reducen.
Quemador de oxifuel.	< 100 - 300 mg/Nm^3	
Planta de ácido sulfúrico.	Conversión > 99,7% (contacto doble)	Incluye lavador de mercurio mediante el proceso Boliden/Norzink o lavador de tiosulfato Hg < 1 ppm en el ácido producido.
	Conversión > 99,1% (contacto simple)	
Enfriador, EP, adsorción de cal/carbón y filtro de tejido.	PAH (OSPAR 11) < 200 µgC/Nm^3 Hidrocarburos (volátiles) < 20 mgC/Nm^3 Hidrocarburos (condensados) < 2 mgC/Nm^3	

Nota: Emisiones recogidas solamente. Las emisiones asociadas se dan como medias diarias sobre la base de un control continuo durante el periodo operativo y condiciones normales de 273 ºK, 101,3 kPa , contenido de oxígeno medido y gas seco sin dilución de los gases con aire. En los casos en los que el control continuo no es practicable, el valor será la media a lo largo del periodo de muestreo. Para el sistema de eliminación empleado, las características del gas y el polvo serán tenidas en consideración en el diseño, y se empleará la temperatura operativa correcta. Para algunos componentes, la variación en la concentración del gas sin tratar durante los procesos discontinuos puede afectar al rendimiento del sistema de eliminación.

Emisiones al aire asociadas con el uso de las MTD

Algunos reactivos específicos se utilizan en el tratamiento de soluciones de metales o en diversos procesos metalúrgicos. A continuación se indican algunos de los compuestos, fuentes y métodos de tratamiento de los gases producidos por el uso de dichos reactivos:

Proceso/Reactivo Utilizado	Compuesto de gas de escape	Método de Tratamiento
Uso de óxido de arsenio o antimonio (refinado de Zn/Pb).	Arsina/estibina.	Lavado con permanganato.
Brea de alquitrán, etc.	Alquitranes y PAH	Postcombustión, condensador y EP o absorbedor seco.
Disolventes, COVs	COV, Olor	Contención, condensación. Carbón activado, biofiltro.
Acido sulfúrico (+azufre en el combustible o materia prima)	Dióxido de azufre	Sistema de lavado húmedo o semiseco. Planta de ácido sulfúrico.
Aqua Regia	NOCl, NO_x	Sistema de lavado cáustico
Cloro, HCl	Cl_2	Sistema de lavado cáustico
Acido nítrico	NO_x	Oxidación y absorción, reciclaje, sistema de lavado.
Na o KCN	HCN	Oxidación con peróxido de hidrógeno o hipoclorito.
Amoniaco	NH_3	Recuperación, sistema de lavado.
Cloruroi amónico	Aerosol	Recuperación por sublimación, sistema de lavado.
Hidracina	N_2H_4 (posible carcinógeno)	Lavador o carbón activado.
Borohidruro sódico	Hidrógeno (riesgo de explosión).	Evitar si es posible en proceso PGM (especialmente Os, Ru).
Acido fórmico	Formaldehído	Sistema de lavado cáustico.
Clorato sódico/HCl	Oxidos de Cl_2 (riesgo de explosión)	Control del punto final del proceso

Resumen de los métodos de tratamiento químico para algunos componentes gaseosos

- **Emisiones al agua**

Las emisiones al agua se derivan de una serie de fuentes y son aplicables diversidad de opciones de minimización y tratamiento según su origen y los compuestos presentes. En general, las aguas residuales pueden contener compuestos metálicos solubles y no solubles, aceite y materias orgánica. La siguiente tabla resume las posibles aguas residuales, los metales producidos, y los métodos de minimización y tratamiento.

Origen del agua residual	Proceso asociado	Métodos de miniminización	Método de tratamiento
Agua de proceso.	Producción de alúmina, Rotura de batería ácida de plomo, Decapado.	Vuelta al proceso dentro de lo posible.	Neutralización y precipitación. Electrolisis.
Agua de refrigeración indirecta.	Refrigeración del horno para la mayoría de metales. Refrigeración de electrolitos para Zn.	Uso de un sistema de refrigeración hermético o por aire. Control del sistema para detectar fugas.	Sedimentación.
Agua de enfriamiento directo.	Coladas de Al, Cu, Zn. Electrodos de carbono.	Sedimentación. Sistema cerrado.	Sedimentación. Precipitación si es necesario.
Granulación de escorias.	Cu, Ni, Pb, Zn, metales preciosos, ferroaleaciones.		Sedimentación. Precipitación si es necesario.
Electrolisis.	Cu, Ni, Zn	Sistema hermético. Electro-recuperación de la purga de electrolito.	Neutralización y precipitación.
Hidrometalurgia (extracción de fondo).	Zn, Cd	Sistema hermético.	Sedimentación. Precipitación si es necesario.
Sistema de eliminación (purga).	Lavadores húmedos. EPs y lavadores húmedos para plantas de ácido.	Reutilización de los caudales ácidos débiles si es posible.	Sedimentación. Precipitación si es necesario.
Agua de superficie.	Todos.	Buen almacenamiento de materias primas y prevención de emisiones fugitivas.	Sedimentación. Precipitación si es necesario.

Resumen de MTD para caudales de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden maximizar la eliminación de metales mediante sedimentación y posiblemente filtración. Los reactivos empleados para la precipitación pueden ser hidróxidos, sulfuros o una combinación de ambos, según la mezcla de metales presente. En muchos casos también es practicable reutilizar agua tratada.

Componentes principales [mg/l]						
	Cu	**Pb**	**As**	**Ni**	**Cd**	**Zn**
Agua de proceso	<0,1	<0,05	<0,01	<0,1	<0,05	<0,15
Nota: Las emisiones asociadas al agua se basan en un muestreo aleatorio cualificado o en una muestra compuesta de 24 horas. El grado de tratamiento del agua residual depende del origen y de los metales contenidos en la misma.						

Ejemplo de emisiones al agua asociadas con el uso de las MTD

- **Residuos de Proceso**

Los residuos de proceso se generan en diversas etapas del proceso y dependen en gran medida de los compuestos de los que están constituidas las materias primas. Los minerales y

concentrados contienen cantidades de metales distintos del metal principal que se desea utilizar. Los procesos están diseñados para obtener el metal objetivo puro y para recuperar asimismo otros metales valiosos.

Estos otros metales tienden a concentrarse en los residuos del proceso, y a su vez estos residuos forman la materia prima para otros procesos de recuperación de metales. La siguiente tabla ofrece un resumen de algunos de los residuos de proceso y las opciones disponibles para su gestión.

Origen de residuos	Metales Asociados	Residuos	Opciones de gestión
Manipulación de materias primas, etc.	Todos los metales	Polvo, barridos	Alimentación del proceso principal
Hornos de fundición	Todos los metales	Escoria	Material para construcción tras tratamiento de la escoria. Industria de abrasivos. Partes de la escoria puede usarse como material refractario, ej. escoria para la producción de cromo metal.
	Ferroaleaciones	Escoria rica	Materia prima para otros procesos de ferroaleación.
Hornos de conversión	Cu	Escoria	Reciclaje a fundición
Hornos de refinado	Cu	Escoria	Reciclaje a fundición
	Pb	Residuos superficiales	Recuperación de otros metales valiosos
	Metales preciosos (MPs)	Residuos superficiales y escorias	Reciclaje interno
Tratamiento de escorias	Cu y Ni	Escoria limpia	Material de construcción. Producción en matas.
Horno de fusión	Todos los metales	Residuos superficiales, escoria y escoria salina.	Devolución al proceso tras su tratamiento. Recuperación de metales, recuperación de sal y otros materiales.
Electro-refinado	Cu	Purga de electrolito. Restos anódicos. Limo anódico.	Recuperación de Ni. Devolución al convertidor. Recuperación de metales preciosos
Electro-recuperación	Zn, Ni, Co, MPs	Eectrolito consumido	Reutilización en el proceso de lixiviación
Electrolisis con sales fundidas	Al	Revestimiento consumido del crisol. Exceso del baño. Fragmentos anódicos.	Carburante o desecho. Venta como electrolito. Recuperación.
Destilación	Hg	Residuos (Hollines)	Reutilización como alimentación de proceso.
	Zn, Cd	Residuos	Devolución al proceso

Origen de residuos	Metales Asociados	Residuos	Opciones de gestión
Lixiviación	Zn	Residuos de ferrita	Desecho seguro, reutilización de la solución.
	Cu	Residuos	Desecho seguro
	Ni/Co	Residuos de Cu/Fe	Recuperación, desecho
Planta de ácido sulfúrico		Catalizador	Regeneración
		Lodos ácidos	Desecho seguro
		Acido débil	Lixiviación, desecho
Revestimientos de hornos	Todos los metales	Refractarios	Uso como agente escoriante, desecho
Fresado, rectificación	Carbono	Polvo de carbono y grafito	Uso como materia prima en otros procesos.
Decapado	Cu, Ti	Acido consumido	Recuperación.
Sistemas de eliminación secos	La mayoría, con filtros de tejido o PEs	Polvo de filtros	Devolución al proceso. Recuperación de otros metales.
Sistemas de eliminación húmedos	La mayoría, con lavadores o PEs húmedos	Lodo de filtros	Devolución al proceso o recuperación de otros metales (ej. Hg). Desecho.
Lodo de tratamiento de aguas residuales	La mayoría	Lodos de hidróxidos o sulfuros.	Desecho seguro, reutilización. Reutilización.
Digestión	Alúmina	Lodo rojo.	Desecho seguro, reutilización de la solución.

Resumen de residuos y opciones disponibles para su gestión

Los filtros de polvo pueden reciclarse dentro de la misma planta o utilizarse para la recuperación de otros metales en otras instalaciones de metalurgia no férrea, por terceros o para otras aplicaciones.

Los residuos y escorias pueden tratarse para recuperar los metales valiosos y hacer que los residuos sean adecuados para otros usos, por ejemplo como material de construcción. Algunos componentes pueden convertirse en productos vendibles.

Los residuos del tratamiento de aguas pueden contener metales valiosos y pueden reciclarse en algunos casos. Legisladores y empresas deben asegurarse de que la recuperación de residuos por terceros se realice con un estándar medioambiental elevado y que no cause efectos negativos sobre otros medios.

- **Compuestos Tóxicos**

La toxicidad específica de algunos compuestos que pueden emitirse (y su impacto y consecuencias medioambientales) varía de un grupo a otro. Algunos metales tienen compuestos tóxicos que pueden ser emitidos de los procesos, por lo que deben reducirse.

- **Recuperación de energía**

La recuperación de energía antes o después de la eliminación puede aplicarse en la mayoría de casos, pero las circunstancias locales son importantes, por ejemplo, si no hay salida para la energía recuperada. Las conclusiones de MTD para recuperación de energía son:

- Producción de vapor y electricidad a partir del calor obtenido en las calderas de recuperación.
- El uso del calor de la reacción para fundir o tostar concentrados o para fundir metales de chatarra en un convertidor.
- El uso de los gases de proceso calientes para secar los materiales de entrada.
- Precalentamiento de una carga de horno con el contenido energético de los gases de los hornos o de gases calientes de otra procedencia.
- El uso de quemadores de recuperación o precalentamiento del aire de combustión.
- El uso como combustible gaseoso del CO producido.
- El calentamiento de las soluciones de lixiviación con gases o soluciones de proceso calientes.
- El uso del contenido de plástico de algunas materias primas como combustible, siempre que no pueda recuperarse plástico de alta calidad y que no se emitan COVs ni dioxinas.
- El uso de refractarios de baja masa cuando sea factible.

6. Grado de Consenso y Recomendaciones para Trabajos Futuros

Este BREF ha obtenido un alto nivel de apoyo por parte del TWG y de los participantes en la 7ª reunión del Foro de Intercambio de Información. Los comentarios críticos han estado relacionados principalmente con aspectos de falta de información y de presentación (se ha solicitado la inclusión de más niveles de emisión y consumo asociados con las MTD en el Resumen Ejecutivo).

Se recomienda revisar este documento en un plazo de 4 años. Las áreas en las que deben realizarse esfuerzos adicionales para establecer una base sólida de información incluyen, sobre todo, las emisiones fugitivas y también datos específicos de emisiones y consumos, residuos de proceso, aguas residuales y aspectos relacionados con pequeñas y medianas empresas. El Capítulo 13 contiene más recomendaciones.

PREFACIO

1. Categoría del presente documento

Salvo que se indique lo contrario, las referencias a "la Directiva" en el presente documento deberán entenderse referencias a la Directiva 96/61/CE del Consejo, relativa a la Prevención y al Control Integrados de la Contaminación (IPPC). Este documento forma parte de una serie en la que se presentan los resultados del intercambio de información entre los Estados miembros de la Unión Europea y los sectores afectados con respecto a las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), los trabajos de seguimiento de las mismas y su evolución. Ha sido publicado por la Comisión Europea con arreglo al apartado 2 del artículo 16 de la Directiva y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta de conformidad con el anexo IV de la Directiva a la hora de determinar las "mejores técnicas disponibles".

2. Principales obligaciones legales de la Directiva de IPPC y definición de MTD

A fin de ayudar al lector a comprender el contexto legal en el que se ha redactado el presente documento, se describen en este prefacio las disposiciones más importantes de la Directiva de IPPC, incluida la definición del término "mejores técnicas disponibles" (MTD). Se trata de una descripción inevitablemente incompleta, de carácter exclusivamente informativo. No tiene valor legal y no modifica ni menoscaba en modo alguno las disposiciones de la Directiva.

La Directiva tiene por objeto la prevención y el control integrados de la contaminación a través de las actividades relacionadas en su anexo I, encaminadas a lograr un alto grado de protección del medio ambiente en su conjunto. Aunque el ámbito legal de la Directiva es exclusivamente la protección medioambiental, en su aplicación también deben tenerse en cuenta otros objetivos comunitarios, como garantizar la existencia de las condiciones necesarias para la competitividad de la industria comunitaria, contribuyendo con ello al desarrollo sostenible.

Más concretamente, en ella se establece un sistema de permisos para ciertas categorías de instalaciones industriales que exige que tanto sus titulares como las autoridades reguladoras realicen un análisis integrado y global del potencial de contaminación y consumo de la instalación. El objetivo global de un enfoque integrado de este tipo debe ser mejorar la gestión y el control de los procesos industriales, a fin de conseguir un alto grado de protección para el medio ambiente en su conjunto. Para ello es fundamental el principio general establecido en el artículo 3, por el que los titulares deben tomar todas las medidas adecuadas de prevención de la contaminación, en particular mediante la aplicación de las mejores técnicas disponibles que les permitan mejorar su comportamiento con respecto al medio ambiente.

En el apartado 11 del artículo 2 de la Directiva se define el término "mejores técnicas disponibles" como "la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente", y a continuación se incluye la siguiente aclaración adicional de la citada definición:

"mejores": las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.

"técnicas": la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación se diseña, construye, mantiene, explota y paraliza;

"disponibles": las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el

contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables.

Además, el Anexo IV de la Directiva contiene una lista de "aspectos que deben tenerse en cuenta con carácter general o en un supuesto particular cuando se determinen las mejores técnicas disponibles (...), teniendo en cuenta los costes y ventajas que pueden derivarse de una acción y los principios de precaución y prevención".

Estos aspectos incluyen la información publicada por la Comisión de acuerdo con el apartado 2 del artículo 16.

Las autoridades competentes responsables de la concesión de permisos deben tener en cuenta los principios generales establecidos en el artículo 3 a la hora de determinar las condiciones del permiso. Estas condiciones deben incluir los valores límite de emisión, en su caso complementados o sustituidos por parámetros o medidas técnicas equivalentes. De acuerdo con el Artículo 9(4) de la Directiva, estos valores límite de emisión, parámetros y medidas técnicas equivalentes deben basarse – sin perjuicio del cumplimiento de las normas de calidad medioambiental – en las mejores técnicas disponibles, sin prescribir la utilización de una técnica o tecnología específica, sino tomando en consideración las características técnicas de la instalación de que se trate, su implantación geográfica y las condiciones locales del medio ambiente. En todos los casos, las condiciones del permiso deberán incluir disposiciones relativas a la reducción de la contaminación a larga distancia o transfronteriza y garantizar un alto nivel de protección para el medio ambiente en su conjunto.

Los Estados miembros tienen la obligación, de acuerdo con el artículo 11 de la Directiva, de velar por que las autoridades competentes estén al corriente o sean informadas acerca de la evolución de las mejores técnicas disponibles.

3. Objetivo del presente documento

El apartado 2 del artículo 16 de la Directiva obliga a la Comisión a organizar "un intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias correspondientes acerca de las mejores técnicas disponibles, las prescripciones de control relacionadas y su evolución" y a publicar los resultados de tal intercambio.

La finalidad del intercambio de información se establece en el considerando 25 de la Directiva, que estipula que "los avances y el intercambio de información en la Comunidad sobre las mejores técnicas disponibles contribuirán a reducir los desequilibrios tecnológicos en el ámbito de la Comunidad, ayudarán a la divulgación mundial de los valores límite establecidos y de las técnicas empleadas en la Comunidad y, asimismo, ayudarán a los Estados miembros para la aplicación eficaz de la presente Directiva."

La Comisión (DG XI) ha creado un foro de intercambio de información (IEF) para contribuir al cumplimiento de las disposiciones del apartado 2 del artículo 16 y en este marco se han creado varios grupos de trabajo técnico. Tanto en el foro como en los grupos de trabajo participan representantes de los Estados miembros y del sector, de acuerdo con lo establecido en el apartado 2 del artículo 16.

El objetivo de esta serie de documentos es reflejar con precisión el intercambio de información que ha tenido lugar con arreglo a las disposiciones del apartado 2 del artículo 16 y facilitar información de referencia que las autoridades competentes deberán tomar en consideración a la hora de establecer las condiciones de concesión de los permisos. La importante

información que estos documentos contienen con respecto a las mejores técnicas disponibles les convierte en instrumentos de gran valor para guiar el comportamiento en materia de medio ambiente.

4. Fuentes de información

En este documento se resume la información obtenida de diversas fuentes, que incluye en especial los conocimientos técnicos de los grupos creados para ayudar a la Comisión en su trabajo, y que ha sido verificada por los servicios de la Comisión. Se agradecen efusivamente todas las aportaciones realizadas.

5. Cómo entender y utilizar el presente documento

La información que contiene el presente documento tiene por objeto servir de punto de partida para el proceso de determinación de las MTD y como base para establecer las condiciones de concesión de los permisos. Con este fin, deberá tenerse siempre en cuenta el objetivo global de lograr el máximo grado posible de protección para el medio ambiente en su conjunto.

El resto de esta sección describe el tipo de información que contiene cada una de las secciones del documento.

El Capítulo 1 facilita información general sobre el sector industrial afectado. El Capítulo 2 proporciona información sobre los procesos industriales, sistemas de eliminación y técnicas generales comunes utilizados en el sector. Los Capítulos 3 a 12 indican los procesos aplicados, los actuales niveles de emisión y consumo, las técnicas a considerar en la determinación de las MTD, las técnicas que se consideran como MTD y las técnicas emergentes para los grupos de metales presentados por dichos capítulos.

Para cada uno de los capítulos 3 a 12 se facilitan datos para el grupo de metales de ese capítulo según las secciones siguientes:

La Sección 1 describe las técnicas y procesos aplicados utilizados para el grupo de metales particular.

La Sección 2 facilita datos e información relativa a los actuales niveles de emisiones y consumo que reflejan la situación en las instalaciones existentes en el momento de la redacción de este documento.

La Sección 3 describe con más detalle las técnicas de reducción de emisiones y otras técnicas que se consideran las más importantes para determinar las MTD, en términos generales y también como base para establecer las condiciones de concesión de los permisos. Esta información incluye los niveles de emisión y consumo que se pueden alcanzar utilizando la técnica en cuestión, cierta idea de los costes y efectos cruzados imputables a dicha técnica y su grado de aplicabilidad a los diversos tipos de instalaciones que necesitan permisos de IPPC, sean nuevas o ya existentes, grandes o pequeñas. No incluye técnicas que generalmente se consideran obsoletas.

La Sección 4 presenta las técnicas y los niveles de emisión y consumo que se consideran compatibles con las MTD en términos generales. Se trata, pues, de dar indicaciones generales relativas a los niveles de emisión y consumo que podrían considerarse una referencia comparativa para las condiciones de concesión los permisos sobre la base de las MTD o para el establecimiento de reglas vinculantes generales según el Artículo 9(8). Sin embargo, hay que señalar que en este documento no se proponen valores límite de emisión.

Para determinar las MTD es necesario tener en cuenta factores locales y específicos de la instalación, como sus características técnicas, situación geográfica y condiciones ambientales. En el caso de las instalaciones ya existentes, también es preciso analizar si su modernización es viable desde el punto de vista técnico y económico. El propio objetivo de conseguir un alto grado de protección para el medio ambiente en su conjunto suele comportar la toma de decisiones transaccionales entre distintos tipos de impacto ambiental, decisiones en las que a menudo influyen consideraciones locales.

Aunque se ha intentado tratar algunas de estas cuestiones, no es posible analizarlas con detalle en el presente documento. Por consiguiente, las técnicas y los niveles presentados en las secciones relativas a MTDs no tienen por qué ser necesariamente apropiados para todas las instalaciones. Por otra parte, la obligación de garantizar un alto grado de protección medioambiental, incluida la máxima reducción de la contaminación transfronteriza o de larga distancia, implica que no es posible establecer las condiciones de concesión de los permisos con arreglo a consideraciones puramente locales. Por ello, es esencial que las autoridades competentes en materia de permisos tengan muy en cuenta la información que contiene el presente documento.

Como las mejores técnicas disponibles cambian con el tiempo, este documento está sujeto a revisión y actualización. Todo comentario o sugerencia debe enviarse a la Oficina Europea de IPPC, emplazada en el Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos, cuyas señas se indican a continuación:

World Trade Center
Isla de la Cartuja s/n
E-41092 Sevilla (España)
Teléfono: +34 95 4488 284
Fax: +34 95 4488 426
E-mail: eippcb@jrc.es
Internet: http://eippcb.jrc.es

Documento de Referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Férreos

RESUMEN GENERAL i

PREFACIO xxi

1 INFORMACIÓN GENERAL 1
1.1 Procesos cubiertos por el ámbito del trabajo 1
1.2 Visión General de la Industria 2
1.2.1 Metales no férreos y aleaciones 2
1.2.2 Ambito de la industria 2
1.2.3 Estructura de la industria 3
1.2.4 Economía de la industria 3
1.2.5 Comportamiento medioambiental 4
1.3 Cobre y sus Aleaciones 4
1.3.1 Información general 4
1.3.2 Fuentes de materiales 4
1.3.3 Producción y consumo 5
1.3.4 Centros de producción 7
1.3.5 Aspectos medioambientales 7
1.4 Aluminio 10
1.4.1 Información General 10
1.4.2 Fuentes de materiales 10
1.4.3 Producción y consumo 10
1.4.4 Centros de producción 11
1.4.5 Aspectos medioambientales 12
1.5 Zinc, Plomo y Cadmio 13
1.5.1 Zinc 13
1.5.1.1 Información General 13
1.5.1.2 Fuentes de materiales 14
1.5.1.3 Producción y consumo 14
1.5.1.4 Centros de producción 15
1.5.1.5 Aspectos medioambientales 16
1.5.2 Plomo 17
1.5.2.1 Información General 17
1.5.2.2 Fuentes de materiales 18
1.5.2.3 Producción y consumo 18
1.5.2.4 Centros de producción 18
1.5.2.5 Aspectos medioambientales 20
1.5.3 Cadmio 20
1.5.3.1 Información General 20
1.5.3.2 Fuentes de materiales 21
1.5.3.3 Producción y consumo 21
1.5.3.4 Aspectos medioambientales 22
1.6 Metales Preciosos 22
1.6.1 Información General 22
1.6.2 Fuentes de materiales 23
1.6.3 Producción y consumo 23
1.6.4 Centros de Producción 25
1.6.5 Aspectos Medioambientales 25
1.7 Mercurio 25
1.7.1 Información General 25

1.7.2 Fuentes de materiales 26
1.7.3 Producción y consumo 26
1.7.4 Aspectos medioambientales 27
1.8 Metales Refractarios 27
1.8.1 Información General 27
1.8.2 Fuentes de materiales 28
1.8.3 Producción y consumo 30
1.8.4 Centros de producción 31
1.8.5 Aspectos medioambientales 31
1.9 Ferroaleaciones 32
1.9.1 Información General 32
1.9.2 Fuentes de materiales 33
1.9.3 Producción y consumo 34
1.9.4 Centros de producción 38
1.9.5 Aspectos medioambientales 38
1.10 Metales Alcalinos y Alcalinotérreos 39
1.10.1 Información General 39
1.10.2 Fuentes de materiales 39
1.10.3 Producción y consumo 40
1.10.4 Centros de producción 42
1.10.5 Aspectos medioambientales 42
1.11 Níquel y Cobalto 42
1.11.1 Níquel 42
1.11.1.1 Información General 42
1.11.1.2 Fuentes de materiales 43
1.11.1.3 Producción y consumo 43
1.11.1.4 Centros de producción 44
1.11.1.5 Aspectos medioambientales 45
1.11.2 Cobalto 46
1.11.2.1 Información General 46
1.11.2.2 Fuentes de materiales 46
1.11.2.3 Producción y consumo 47
1.11.2.4 Centros de producción 47
1.11.2.5 Aspectos medioambientales 47
1.12 Carbono y Grafito 48
1.12.1 Información General 48
1.12.2 Fuentes de materiales 49
1.12.3 Producción y consumo 49
1.12.4 Centros de producción 50
1.12.5 Aspectos medioambientales 51

2 PROCESOS Y EQUIPOS COMUNES 53
2.1 Organización del Capítulo 53
2.1.1 Instalaciones que producen varios metales o tienen procesos asociados in situ. 54
2.2 Medición de emisiones y uso de los datos de emisiones 55
2.2.1 Medición de emisiones 55
2.2.1.1 Puntos de muestreo 55
2.2.1.2 Componentes y parámetros 56
2.2.1.3 Condiciones de referencia 56
2.2.1.4 Medición continua 56
2.2.2 Cómo informar sobre los datos de emisiones 57
2.2.2.1 Interrelación entre concentración y emisiones específicas. 58
2.2.2.2 Uso de los datos de emisiones 59

2.3 Sistemas de gestión 60
2.3.1 Política y compromiso de gestión 60
2.3.2 Diseño y mantenimiento 61
2.3.3 Formación 61
2.4 Recepción, almacenamiento y manipulación de materias primas y residuos 62
2.4.1 Técnicas y procesos aplicados 62
2.4.1.1 Minerales y concentrados 62
2.4.1.2 Materias primas secundarias 63
2.4.1.3 Combustibles 64
2.4.1.4 Productos químicos y gases de proceso 66
2.4.1.5 Residuos 67
2.4.2 Emisiones presentes y niveles de consumo 67
2.4.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD 68
2.5 Preproceso y Transferencia de Materias Primas 69
2.5.1 Procesos y técnicas aplicadas 69
2.5.1.1 Descongelación 70
2.5.1.2 Secado 70
2.5.1.3 Trituración y reducción de tamaño 70
2.5.1.4 Rotura de baterías y pilas 71
2.5.1.5 Mezcla 71
2.5.1.6 Briquetado, peletización y otros métodos de aglomeración 71
2.5.1.7 Sinterización y calcinación 72
2.5.1.8 Procesos de volatilización 73
2.5.1.9 Eliminación de recubrimientos y de aceites 73
2.5.1.10 Incineración y pirólisis 73
2.5.1.11 Procedimientos de lixiviación 74
2.5.1.12 Técnicas de separación 74
2.5.1.13 Sistemas de transferencia y carga 75
2.5.2 Niveles actuales de emisión y consumo 75
2.5.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD 75
2.6 Técnicas de Producción de Metales y de Control de Proceso 78
2.6.1 Hornos para tostación, calcinación, etc. 79
2.6.1.1 Hornos de secado rotatorios 79
2.6.1.2 Horno de tostación de lecho fluidizado 80
2.6.1.3 Horno Herreshoff 80
2.6.1.4 Hornos de sinterización 81
2.6.2 Hornos de fundición 82
2.6.2.1 Horno de reverbero 82
2.6.2.2 El alto horno (y el horno de fundición Imperial - ISF) 83
2.6.2.3 Hornos de arco eléctrico 84
2.6.2.4 Horno eléctrico (de resistencia eléctrica) 86
2.6.2.5 Hornos Pit y de crisol con revestimiento refractario 87
2.6.2.6 Horno ISA Smelt/Ausmelt 87
2.6.2.7 Horno Rotatorio de Soplado Superior 88
2.6.2.8 Procesos Noranda, El Teniente, Baiyin y Vanyucov 89
2.6.2.9 Proceso Mitsubishi 91
2.6.2.10 Horno QSL 91
2.6.2.11 Hornos de fusión de Ciclón 92
2.6.2.12 Horno flash Outokumpu 93
2.6.2.13 Horno INCO 94
2.6.2.14 Horno Kivcet (KSS) 94
2.6.3 Convertidores 95
2.6.3.1 Convertidor Pierce-Smith 95
2.6.3.2 Convertidor Hoboken 96

2.6.3.3 Otros convertidores 97
2.6.4 Hornos de fusión y refinado 97
2.6.4.1 Hornos de inducción 97
2.6.4.2 Calderas con calentamiento indirecto 98
2.6.4.3 Horno de cuba para fusión de metal 98
2.6.4.4 Proceso Contimelt 99
2.6.4.5 Hornos de haz de electrones 100
2.6.4.6 Horno rotatorio 100
2.6.4.7 Horno de reverbero 101
2.6.5 Resumen de hornos 101
2.6.6 Procesos electroquímicos 103
2.6.6.1 Electro-recuperación 103
2.6.6.2 Electro-refinado 103
2.6.6.3 Electrólisis de sales fundidas 104
2.6.7 Procesos hidrometalúrgicos 104
2.6.7.1 Lixiviación en montones 104
2.6.7.2 Lixiviación atmosférica (tanque abierto) 104
2.6.7.3 Lixiviación a presión (autoclave) 105
2.6.7.4 Extracción con disolventes 105
2.6.8 Técnicas de control de proceso 105
2.7 Técnicas de Recogida de Gases de Escape 107
2.7.1 Técnicas aplicadas 108
2.7.1.1 Uso de energía 108
2.7.1.2 Criterios de diseño 108
2.7.2 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD 108
2.7.2.1 Algunos ejemplos de las técnicas a considerar 108
2.7.2.2 Emisiones fugitivas 111
2.8 Técnicas de Eliminación y Recuperación de Aire 114
2.8.1 Técnicas y procesos aplicados 114
2.8.1.1 Eliminación de polvo y partículas 114
2.8.1.2 Sistemas de lavado de gases 122
2.8.1.3 Sistemas de recuperación de gases 123
2.8.1.4 Captura de azufre 124
2.8.1.5 Carbono total y COVs 127
2.8.1.6 Dioxinas 127
2.8.1.7 Eliminación de otras impurezas 128
2.8.1.8 Uso de enriquecimiento con oxígeno en procesos de combustión 130
2.8.1.9 Técnicas de control de proceso para equipos de recogida y eliminación 131
2.8.2 Niveles actuales de emisión y consumo 132
2.8.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD 133
2.8.3.1 Principios generales 133
2.8.3.2 Eliminación de partículas 134
2.8.3.3 Sistemas de lavado de gas 138
2.8.3.4 Sistemas de recuperación de gases 139
2.8.3.5 Captura de azufre 139
2.8.3.6 Dioxinas 142
2.8.3.7 Eliminación de otras impurezas 142
2.8.3.8 Uso de oxígeno en sistemas de combustión 142
2.8.3.9 Técnicas de control de proceso para plantas de recogida y eliminación 142
2.9 Tratamiento de Efluentes y Reutilización del Agua 143
2.9.1 Principales fuentes de generación de efluentes líquidos 143
2.9.1.1 Efluentes de la limpieza de gases de escape 143

2.9.1.2 Efluentes de la granulación de escorias y la producción de granalla metálica y separación por densidades . . . 145
2.9.1.3 Agua de refrigeración . . . 145
2.9.1.4 Agua de circulación superficial . . . 146
2.9.1.5 Efluentes del proceso hidrometalúrgico . . . 146
2.9.1.6 Aguas de otros procesos . . . 147
2.9.1.7 Fuentes diversas . . . 148
2.9.2 Técnicas de tratamiento aplicadas . . . 149
2.9.2.1 Medidas integradas en el proceso . . . 149
2.9.2.2 Técnicas de final de proceso . . . 150
2.9.2.3 Técnicas de control de proceso para el tratamiento de efluentes . 155
2.9.3 Niveles actuales de emisiones y consumos . . . 155
2.9.4 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD . . . 158
2.10 Minimización y Manipulación de Residuos . . . 161
2.10.1 Residuos y desechos de la producción de metales no férreos . . . 161
2.10.2 Técnicas y procesos aplicados . . . 163
2.10.2.1 Residuos del proceso de fundición . . . 163
2.10.2.2 Residuos del sistema de eliminación . . . 165
2.10.2.3 Residuos del tratamiento de efluentes líquidos . . . 166
2.10.2.4 Residuos de los procesos hidrometalúrgicos de metales no férreos . 166
2.10.2.5 Otros residuos de la producción de metales no férreos . . . 167
2.10.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD . . . 167
2.10.3.1 Minimización de residuos del proceso metalúrgico . . . 167
2.10.3.2 Minimización de los residuos derivados del sistema de eliminación 168
2.10.3.3 Reducción de los residuos generados por el tratamiento de efluentes 169
2.10.3.4 Reducción de otros residuos derivados de la producción de metales no férreos . . . 169
2.10.3.5 Reciclaje y reutilización de los residuos de los procesos de fundición de metales no férreos . . . 169
2.11 Recuperación de Energía . . . 171
2.11.1 Técnicas aplicadas . . . 172
2.12 Efectos sobre Otros Medios . . . 175
2.13 Ruido y Vibración . . . 175
2.14 Olor . . . 176
2.15 Aspectos de Seguridad . . . 177
2.15.1 Principio de prevención . . . 177
2.15.2 Consideración de sistemas complejos en industrias de proceso . . . 177
2.15.3 Adecuación de medios . . . 177
2.16 Operación y desmantelamiento de la planta . . . 178
2.17 Mejores Técnicas Disponibles . . . 178
2.17.1 Manipulación y almacenamiento de materiales . . . 180
2.17.2 Control de proceso . . . 182
2.17.3 Recogida de vapores y humos . . . 183
2.17.4 Eliminación de dióxido de azufre . . . 184
2.17.5 Prevención y destrucción de dioxinas . . . 185
2.17.6 Eliminación de mercurio . . . 186
2.17.7 Tratamiento de efluentes y reutilización del agua . . . 186
2.17.8 Otros procesos comunes . . . 187
2.18 Técnicas Emergentes . . . 187
2.18.1 Eliminación de azufre . . . 188

3 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE COBRE Y SUS ALEACIONES (INCLUIDOS Sn Y Be) A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS PRIMARIAS O SECUNDARIAS . . . 189

3.1 Técnicas y Procesos Aplicados 189
3.1.1 Cobre primario 189
3.1.1.1 Método pirometalúrgico 189
3.1.1.2 La vía hidrometalúrgica 196
3.1.2 Producción secundaria 197
3.1.2.1 Etapa de fundición secundaria 198
3.1.2.2 Conversión, refinado al fuego, tratamiento de escorias y refinado electrolítico, proceso de chatarra de aleación pura 199
3.1.3 Estaño 199
3.1.4 Producción de alambrón 201
3.1.4.1 Proceso Southwire 201
3.1.4.2 Proceso Contirod 203
3.1.4.3 Procesos Properzi y Secor 203
3.1.4.4 Proceso de Moldeo por Gravedad (Upcast) 203
3.1.4.2 Proceso de Conformación por Inmersión 204
3.1.5 Producción de productos semiacabados de cobre y aleaciones de cobre . 204
3.1.5.1 Procesos de fusión 205
3.1.5.2 Moldeo 205
3.1.5.3 Fabricación de tubos, perfiles y barras 206
3.1.5.4 Fabricación de láminas y bandas 206
3.1.6 Lingotes de cobre y de aleaciones de cobre 208
3.1.6.1 Aleaciones Maestras 208
3.1.7 Operaciones de decapado 209
3.1.7.1 Decapado no ácido de alambrón de cobre 209
3.1.7.2 Decapado ácido de alambrón de cobre y semis de cobre y sus aleaciones 210
3.2 Niveles Actuales de Emisión y Consumo 210
3.2.1 Uso de la energía en la producción de cobre 211
3.2.2 Datos de emisiones y consumos 211
3.2.2.1 Entrada y salida de cobre primario 211
3.2.2.2 Entradas y salidas de cobre secundario 213
3.2.2.3 Emisiones a la atmósfera 215
3.2.2.4 Emisiones al agua 220
3.2.2.5 Subproductos, residuos de proceso y desechos 222
3.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 226
3.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales 227
3.3.1.1 Materias primas primarias 227
3.3.1.2 Materias primas secundarias 228
3.3.2 Procesos de fundición primaria 230
3.3.3 Eliminación de dióxido de azufre 232
3.3.4 Procesos de fundición secundaria 234
3.3.5 Conversión 237
3.3.5.1 Convertidores de cobre primario 237
3.3.5.2 Convertidores de cobre secundario 239
3.3.6 Refinado al fuego 239
3.3.7 Electro-refinado 240
3.3.8 Procesos de tratamiento de escorias 240
3.3.9 Procesos hidrometalúrgicos 240
3.3.10 Estaño y otros metales 240
3.3.11 Alambrón de cobre 241
3.3.12 Lingotes, tubos y productos semiacabados 241
3.1.13 Recogida y eliminación de vapores/gases 241
3.3.14 Control y gestión de procesos 246
3.3.15 Aguas residuales 246

3.3.16 Residuos de proceso 249
3.4 Mejores Técnicas Disponibles 249
3.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 252
3.4.2 Selección de procesos 254
3.4.2.1 Fundición primaria de cobre 255
3.4.2.2 Fundición secundaria de cobre 257
3.4.2.3 Conversión primaria y secundaria 257
3.4.2.4 Otros procesos y etapas de proceso 258
3.4.3 Recogida y eliminación de gases 259
3.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 261
3.4.4 Aguas residuales 265
3.4.5 Residuos de proceso 266
3.4.6 Costes asociados con las técnicas 267
3.5 Tecnologías Emergentes 267

4 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS PRIMARIAS O SECUNDARIAS 269
4.1 Técnicas y Procesos Aplicados 269
4.1.1 Aluminio primario 269
4.1.1.1 Producción de alúmina 269
4.1.1.2 Producción de aluminio por electrólisis 270
4.1.1.3 Refinado 272
4.1.1.4 Moldeo 273
4.1.2 Aluminio secundario 273
4.1.2.1 Procesos de producción 273
4.1.2.2 Procesos de refinado y moldeo 275
4.1.2.3 Escorias y escorias superficiales 275
4.1.2.4 Recuperación de escoria salina 275
4.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 276
4.2.1 Aluminio primario 276
4.2.1.1 Energía y otros aportes 276
4.2.1.2 Emisiones a la atmósfera 278
4.2.1.3 Emisiones al agua 285
4.2.1.4 Residuos de proceso y desechos 286
4.2.2 Aluminio secundario 288
4.2.2.1 Emisiones a la atmósfera 290
4.2.2.2 Emisiones al agua 293
4.2.2.3 Residuos de proceso y desechos 294
4.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 295
4.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales. 296
4.3.1.1 Materias primas primarias 296
4.3.1.2 Materias primas secundarias 297
4.3.2 La producción de alúmina a partir de bauxita 298
4.3.3 Procesos de fundición de aluminio primario 299
4.3.4 Hornos de fundición secundarios 303
4.3.5 Procesos de refinado 310
4.3.6 Procesos de moldeo 310
4.3.7 Escorias superficiales 310
4.3.8 Producción integrada de ánodos 310
4.3.9 Recogida y eliminación de vapores/gases 310
4.3.9.1 Aluminio primario 310
4.3.9.2 Aluminio secundario 311
4.3.10 Control de proceso 311
4.3.11 Agua residual 311

4.3.12 Residuos de proceso 311
4.3.12.1 Aluminio primario 311
4.3.12.2 Aluminio secundario 312
4.4 Mejores Técnicas Disponibles 312
4.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 315
4.4.2 Selección de procesos 317
4.4.2.1 Fundición primaria de aluminio 317
4.4.2.2 Fundición secundaria de aluminio 318
4.4.2.3 Otras etapas de proceso 320
4.4.3 Recogida y eliminación de gases 320
4.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 322
4.4.4 Aguas residuales 325
4.4.5 Residuos de proceso 325
4.4.6 Costes asociados con las técnicas 327
4.5 Tecnologías Emergentes 327

5 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PLOMO, ZINC Y CADMIO (+ Sb, Bi, In, Ge, Ga, As, Se Te) 329
5.1 Técnicas y Procesos Aplicados 329
5.1.1 Plomo primario 329
5.1.1.1 Sinterización/Fundición en Alto Horno u Horno de Fundición Imperial 329
5.1.1.2 Fundición directa 331
5.1.2 Plomo secundario 331
5.1.2.1 Recuperación de plomo de chatarra de baterías 331
5.1.2.2 Recuperación de plomo de otras chatarras y residuos 334
5.1.3 Refinado de plomo primario y secundario 334
5.1.4 Procesos de fusión y aleación para plomo 336
5.1.5 Zinc primario 336
5.1.5.1 La vía pirometalúrgica 336
5.1.5.2 La vía hidrometalúrgica 337
5.1.6 Zinc secundario 341
5.1.6.1 Procesos generales 342
5.1.6.2 Hornos de secado Waelz 343
5.1.6.3 Proceso de volatilización de escorias 344
5.1.7 Procesos de fusión y aleación para zinc 345
5.1.8 Procesos de moldeo para zinc 345
5.1.9 Producción de zinc en polvo 345
5.1.10 Cadmio 346
5.1.10.1 Producción de cadmio a partir de los procesos de plomo y zinc 346
5.1.10.2 Producción de cadmio a partir de pilas 346
5.1.11 Producción de otros metales (In, Ge, Ga, As, Te, Sb, Bi) 346
5.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 347
5.2.1 Energía 350
5.2.2 Emisiones a la atmósfera 351
5.2.2.1 Dióxido de azufre y otros componentes de azufre 352
5.2.2.2 Oxidos de nitrógeno 354
5.2.2.3 Polvo y metales 354
5.2.2.4 VOCs y dioxinas 355
5.2.3 Emisiones al agua 355
5.2.3.1 Aguas residuales de la planta de eliminación 355
5.2.3.2 Recuperación de baterías 356
5.2.3.3 Efluente de sangrado de electrolito 357
5.2.3.4 Fuentes diversas 357

5.2.4 Residuos de proceso y desechos 359
5.2.4.1 Residuos de lixiviación 359
5.2.4.2 Escorias y residuos pirometalúrgicos 360
5.2.4.3 Otros materiales 362
5.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 366
5.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales. 366
5.3.2 Procesos de fundición de plomo primario 369
5.3.3 Fundiciones secundarias de plomo 370
5.3.4 Tratamiento de escorias 373
5.3.5 Refinado de plomo 373
5.3.6 Zinc primario 373
5.3.6.1 Refinado químico 374
5.3.6.2 Electro-recuperación 374
5.3.7 Zinc secundario 375
5.3.7.1 Hornos de secado Waelz y hornos de volatilización de escoria . . 375
5.3.8 Cadmio y otros metales 376
5.3.9 Recogida y eliminación de vapores/gases 377
5.3.10 Plantas de ácido sulfúrico 378
5.3.11 Control de proceso 382
5.3.12 Agua residual 382
5.3.13 Residuos de proceso 382
5.4 Mejores Técnicas Disponibles 382
5.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 385
5.4.2 Selección de procesos 385
5.4.2.1 Fundición primaria de plomo 385
5.4.2.2 Fundición secundaria de plomo 386
5.4.2.3 Procesos de refinado de plomo 387
5.4.2.4 Zinc primario 387
5.4.2.5 Zinc secundario 387
5.4.2.6 Cadmio y otros metales 388
5.4.2.7 Otras etapas de proceso 388
5.4.2.8 Recogida y eliminación de gases 388
5.4.2.9 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 390
5.4.3 Agua residual 394
5.4.4 Residuos de proceso 395
5.4.5 Costes asociados con las técnicas 395
5.5 Tecnologías Emergentes 395

6 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METALES PRECIOSOS 397
6.1 Técnicas y Procesos Aplicados 397
6.1.1 Plata 399
6.1.1.1 Materiales fotográficos 399
6.1.1.2 Cenizas, restos, etc. 400
6.1.1.3 Recuperación de la producción de metales de base 400
6.1.1.4 Refinado 402
6.1.2 Oro 402
6.1.2.1 El proceso Miller 402
6.1.2.2 Electro-refinado 402
6.1.2.3 Otros procesos 403
6.1.3 Metales del Grupo del Platino (MGP) 403
6.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 404
6.2.1 Ciclos de material de la industria de reciclaje de metales preciosos 404
6.2.1.1 Ciclos no metálicos 405
6.2.1.2 Ciclos de metales no preciosos 405

6.2.2 Emisiones a la atmósfera 406
6.2.2.1 Polvo y metales 407
6.2.2.2 Dióxido de azufre 408
6.2.2.3 Cloro y HCl 408
6.2.2.4 Oxidos de nitrógeno 408
6.2.2.5 COVs y dioxinas 408
6.2.3 Emisiones al agua 409
6.2.4 Residuos de proceso y desechos 410
6.2.5 Uso de la energía 411
6.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 411
6.3.1 Manipulación de materias primas 411
6.3.2 Procesos de producción de metales 413
6.3.3 Recogida y eliminación de vapores/gases 415
6.3.4 Control de proceso 419
6.3.5 Agua residual 419
6.3.6 Técnicas generales 419
6.3.7 Consumo energético 421
6.4 Mejores Técnicas Disponibles 421
6.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 424
6.4.2 Selección de procesos 424
6.4.2.1 Procesos de pretratamiento 424
6.4.2.2 Etapas pirometalúrgicas 425
6.4.2.3 Etapas hidrometalúrgicas 425
6.4.3 Recogida y eliminación de gases 425
6.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 427
6.4.4 Agua residual 429
6.4.5 Residuos de proceso 430
6.4.6 Costes asociados con las técnicas 430
6.5 Tecnologías Emergentes 430

7 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MERCURIO 435
7.1 Técnicas y Procesos Aplicados 435
7.1.1 Producción primaria 435
7.1.1.1 Producción a partir de cinabrio 435
7.1.1.2 Producción a partir de los minerales y concentrados de otros metales 435
7.1.2 Producción secundaria 436
7.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 436
7.2.1 Mercurio primario 436
7.2.2 Mercurio secundario 437
7.2.3 Residuos de proceso 437
7.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 437
7.3.1 Emisiones a la atmósfera 438
7.3.2 Agua residual 439
7.4 Mejores Técnicas Disponibles 440
7.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 443
7.4.2 Selección de procesos 443
7.4.3 Recogida y eliminación de gases 443
7.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 444
7.4.4 Agua residual 445
7.4.5 Residuos de proceso 445
7.5 Tecnologías Emergentes 445

8 METALES REFRACTARIOS 447
8.1 Técnicas y Procesos Aplicados 447

8.1.1 Cromo 447
8.1.1.1 Producción de cromo metal por reducción metalotérmica 447
8.1.1.2 Producción de cromo metal por electrólisis 449
8.1.2 Manganeso 450
8.1.2.1 Electrólisis de sales acuosas de manganeso 450
8.1.2.2 Descomposición electrotérmica de minerales de manganeso 451
8.1.3 Tungsteno 451
8.1.3.1 Producción de tungsteno metal en polvo a partir de materias primas primarias 451
8.1.3.2 Proceso de tungsteno como materia prima secundaria 454
8.1.4 Vanadio 455
8.1.4.1 Producción de vanadio metal a partir de materia prima primaria. 455
8.1.4.2 Proceso de materias primas secundarias de vanadio 456
8.1.5 Molibdeno 457
8.1.5.1 Producción de molibdeno metal en polvo 458
8.1.5.2 Proceso de materias primas secundarias de molibdeno 458
8.1.6 Titanio 458
8.1.6.1 Producción de esponja de titanio metal 459
8.1.6.2 Proceso de materias primas secundarias de titanio y de esponja de titanio 460
8.1.7 Tantalio 460
8.1.7.1 Producción de tantalio metálico a partir de materias primas primarias 460
8.1.7.2 Proceso de materias primas secundarias de tantalio 461
8.1.8 Niobio 462
8.1.8.1 Producción de niobio a partir de materias primas primarias 462
8.1.9 Renio 463
8.1.9.1 Recuperación de renio mediante tostación de molibdenita 464
8.1.9.2 Producción de renio metal 464
8.1.10 Zirconio y Hafnio 465
8.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 465
8.2.1 Consumo de materias primas y energía 466
8.2.2 Emisiones 466
8.2.2.1 Emisiones a la atmósfera 466
8.2.2.2 Emisiones al agua 467
8.2.2.3 Subproductos, residuos de proceso y desechos 468
8.2.2.4 Resumen de emisiones de las producción de metales refractarios . 468
8.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 476
8.3.1 Almacenamiento y manipulación de materiales 479
8.3.2 Procesos de fundición, cocción, reducción con hidrógeno y carburización. 479
8.3.3 Recogida y eliminación de gases 482
8.3.4 Control de proceso 482
8.3.5 Agua residual 482
8.3.6 Residuos de proceso 483
8.4 Mejores Técnicas Disponibles 483
8.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 485
8.4.2 Selección de procesos 485
8.4.2.1 Procesos de fundición, cocción, reducción con hidrógeno y de carburización 485
8.4.2.2 Control de proceso 487
8.4.3 Recogida y eliminación de gases 487
8.4.4 Agua residual 489
8.4.5 Residuos de proceso 489
8.5 Técnicas Emergentes 490

9 FERROALEACIONES 491
9.1 Técnicas y Procesos Aplicados 491
9.1.1 Ferrocromo 492
9.1.1.1 Materias primas 492
9.1.1.2 Técnicas de pretratamiento 492
9.1.1.3 Producción de ferrocromo y silicocromo 493
9.1.2 Aleaciones de ferrosilicio y de silicio 496
9.1.2.1 Materias primas 496
9.1.2.2 Producción de ferrosilicio, silicio metal y silico-calcio 497
9.1.3 Ferromanganeso y aleaciones de manganeso 499
9.1.3.1 Materias primas 499
9.1.3.2 Técnicas de pretratamiento 499
9.1.3.3 Producción de ferro manganeso y silicomanganeso 500
9.1.4 Ferroníquel 503
9.1.4.1 Materias primas 503
9.1.4.2 Producción de ferroníquel a partir de materias primas primarias . 504
9.1.4.3 Producción de ferroníquel a partir de materias primas secundarias 505
9.1.5 Ferrovanadio 505
9.1.6 Tostación de molibdenita y producción de ferromolibdeno 506
9.1.6.1 Tostación de molibdenita 506
9.1.6.2 Producción de ferromolibdeno 508
9.1.7 Ferrotungsteno 510
9.1.7.1 Producción de ferrotungsteno y de pseudoaleación base Cu que contiene polvo de tungsteno 511
9.1.8 Ferrotitanio 511
9.1.9 Ferroboro 512
9.1.10 Ferroniobio 514
9.1.11 Producción de ferroaleaciones a partir de materias primas secundarias . . 514
9.1.11.1 Materias primas y preparación de materias primas 515
9.1.11.2 Preproceso 516
9.1.11.3 Proceso en horno de arco eléctrico sumergido 517
9.1.11.4 Proceso Plasmadust 517
9.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 518
9.2.1 Consumo de materias primas y energía 519
9.2.2 Emisiones 523
9.2.2.1 Emisiones a la atmósfera 523
9.2.2.2 Emisiones de ruido y vibraciones 530
9.2.2.3 Emisiones al agua 530
9.2.2.4 Subproductos, residuos de proceso y desechos 532
9.2.3 Recuperación de energía 535
9.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 536
9.3.1 Almacenamiento y manipulación de materiales 536
9.3.2 Técnicas de pretratamiento 538
9.3.3 Sinterización 541
9.3.4 Pre-reducción y precalentamiento 542
9.3.5 Procesos de fundición 543
9.3.6 Recogida y eliminación de gases 546
9.3.7 Control de proceso 549
9.3.8 Operaciones post-horno 549
9.3.9 Tratamiento de aguas 550
9.3.10 Reducción de residuos de proceso 550
9.3.11 Técnicas para reducir el consumo global de energía 551
9.4 Mejores Técnicas Disponibles 558
9.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 559

9.4.2 Selección de procesos 559
9.4.2.1 Técnicas de pretratamiento 559
9.4.2.2 Sinterización 560
9.4.2.3 Pre-reducción y precalentamiento 560
9.4.2.4 Proceso de fundición 560
9.4.2.5 Control de proceso 561
9.4.2.6 Operaciones post-horno 564
9.4.3 Recogida y eliminación de gases 564
9.4.4 Agua residual 566
9.4.5 Residuos de proceso 566
9.4.6 Recuperación de energía 568
9.5 Tecnologías Emergentes 570

10 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METALES ALCALINOS Y ALCALINOTÉRREOS 571
10.1 Técnicas y Procesos Aplicados 571
10.1.1 Sodio metal 571
10.1.2 Litio metal 573
10.1.3 Potasio metal 573
10.1.4 Calcio y estroncio metal 573
10.1.4.1 Calcio metal 574
10.1.4.2 Estroncio metal 575
10.1.5 Magnesio metal 575
10.1.5.1 Producción de magnesio primario por reducción térmica 575
10.1.5.2 Producción electrolítica de magnesio primario 576
10.1.5.3 Producción de magnesio a partir de materia prima secundaria . 578
10.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos 578
10.2.1 Consumo de materia prima y energía 579
10.2.2 Emisiones a la atmósfera 580
10.2.3 Emisiones típicas al agua 582
10.2.4 Subproductos, residuos de proceso y desechos 582
10.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 583
10.3.1 Materiales, almacenamiento y manipulación 584
10.3.2 Técnicas de pretratamiento 584
10.3.3 Procesos centrales 585
10.3.4 Recogida y eliminación de gases 587
10.3.5 Control de proceso 588
10.3.6 Operaciones post-horno 589
10.3.7 Tratamiento de aguas 589
10.3.8 Reducción de los residuos de proceso 591
10.4 Mejores Técnicas Disponibles 592
10.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 593
10.4.2 Selección de procesos 593
10.4.2.1 Técnicas de pretratamiento 593
10.4.2.2 Procesos centrales 593
10.4.2.3 Control de proceso 595
10.4.2.4 Operaciones post-horno 595
10.4.3 Recogida y eliminación de gases 595
10.4.4 Agua residual 597
10.4.5 Residuos de proceso 597
10.5 Tecnologías Emergentes 598

11 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO 599
11.1 Técnicas y Procesos Aplicados 599

11.1.1 Minerales oxídicos 599
11.1.2 Minerales de sulfuro 601
11.1.2.1 Proceso convencional de fundición en horno flash 601
11.1.3 Procesos de refinado de mata 603
11.1.3.1 Lixiviación con cloruro de matas, seguido de recuperación electrolítica 603
11.1.3.2 Lixiviación atmosférica o a presión con sulfato seguida de recuperación electrolítica/reducción con hidrógeno 604
11.1.3.3 Lixiviación a presión con amoniaco y reducción con hidrógeno. 605
11.1.3.4 Lixiviación con cloruro férrico 606
11.1.3.5 Proceso con carbonilo 606
11.1.3.6 Recuperación electrolítica de matas 607
11.1.3.7 Extracción con disolvente 607
11.1.4 Producción de aleación de níquel a partir de materiales secundarios 607
11.1.5 Producción de cobalto 608
11.2 Emisión Actual y Niveles de Consumo 609
11.2.1 Utilización de energía 609
11.2.2 Emisiones a la atmósfera 609
11.2.2.1 Dióxido de azufre y otros gases ácidos 611
11.2.2.2 COVs 612
11.2.2.3 Polvo y metales 612
11.2.2.4 Cloro 613
11.2.2.5 Hidrógeno, monóxido de carbono y carbonilos 613
11.2.2.6 Oxidos de nitrógeno 613
11.2.2.7 Emisiones fugitivas 614
11.2.3 Emisiones al agua 614
11.2.3.1 Aguas residuales de una planta de eliminación 615
11.2.3.2 Fuentes diversas 615
11.2.4 Residuos y desechos de proceso 617
11.2.4.1 Precipitados de procesos de purificación 617
11.2.4.2 Escoria y residuos pirometalúrgicos 617
11.2.4.3 Otros materiales 618
11.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD 618
11.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales 619
11.3.2 Procesos de fundición primarios 620
11.3.3 Procesos de refinado y transformación 621
11.3.3.1 Lixiviación, refinado químico y extracción con disolvente 621
11.3.3.2 Recuperación electrolítica 621
11.3.3.3 Otros metales 622
11.3.3.4 Producción de metales en polvo, lingotes y otros productos . . . 622
11.3.4 Recogida y eliminación de vapores/gas 623
11.3.5 Control y gestión de proceso 623
11.3.6 Agua residual 623
11.3.7 Residuos de proceso 624
11.4 Mejores Técnicas Disponibles 624
11.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 626
11.4.2 Selección de proceso 627
11.4.2.1 Procesos pirometalúrgicos 628
11.4.2.2 Procesos de refinado y transformación 628
11.4.3 Recogida y eliminación de gases 628
11.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD . . . 628
11.4.4 Agua residual 632
11.4.5 Residuos de proceso 632

11.4.6 Costes asociados con las técnicas 633
11.5 Tecnologías Emergentes 633

12 PROCESOS PARA PRODUCIR ELECTRODOS DE CARBONO Y GRAFITO, ETC. 635
12.1 Técnicas y Procesos Aplicados 635
12.1.1 Procesos para producir electrodos 635
12.1.1.1 Pasta verde, pasta de Søderberg, electrodos y formas verdes de Søderberg 636
12.1.1.2 Anodos, electrodos y formas de carbono precocidos 636
12.1.1.3 Electrodos de grafito 639
12.1.2 Procesos para la producción de otros productos de carbono y grafito . . . 640
12.1.2.1 Mezclado y conformación 641
12.1.2.2 Cocido y recocido 641
12.1.2.3 Impregnación 642
12.1.2.4 Grafitización 643
12.1.2.5 Conformación del producto 643
12.1.2.6 Procesos especiales 643
12.2 Niveles de Emisiones y Consumos actuales 643
12.2.1 Emisiones a la atmósfera 644
12.2.1.1 COVs, Hidrocarburos y HAPs 645
12.2.1.2 Polvo 646
12.2.1.3 Gases de combustión 646
12.2.1.4 Dióxido de azufre 646
12.2.1.5 Fluoruros (Producción anódica si se usa los restos de ánodos) . 646
12.2.1.6 COVs (Fabricación de productos especiales de carbono y grafito). 646
12.2.1.7 Cianuros (producción de fibra de carbono a base de poliacrilonitrilo (PAN)) 647
12.2.1.8 Dioxinas 647
12.2.1.9 Resumen de los principales contaminantes atmosféricos. 647
12.2.2 Aguas residuales 650
12.2.3 Residuos de proceso 651
12.3 Técnicas a considerar para la Determinación de las MTD 651
12.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales . . 652
12.3.2 Otras etapas de proceso 653
12.3.3 Aguas residuales 656
12.3.4 Residuos de proceso 656
12.4 Mejores Técnicas Disponibles 656
12.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales 659
12.4.2 Selección de procesos 660
12.4.3 Recogida y eliminación de gases 660
12.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD . . . 660
12.4.4 Emisiones al agua 665
12.4.5 Residuos de proceso 665
12.4.6 Costes asociados con las técnicas 665
12.5 Tecnologías emergentes 665

13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 667
13.1 Planificación del trabajo 667
13.2 Fuentes de información 667
13.3 Recomendaciones para futuros trabajos 668
Referencias 671
ANEXO I. Datos específicos de costes para la producción y eliminación de metales . . 691
ANEXO II. Regulación Internacional (visión general) 715
GLOSARIO 725

Lista de Figuras

Figura 1.1: Producción mundial de cobre en 1997 6
Figura 1.2: Centros de Producción Europeos 8
Figura 1.3: Producción de Semis de Cobre en 1995. Total 1995 = 4700000 toneladas . 9
Figura 1.4: Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas) . 11
Figura 1.5: Producción mundial de zinc a partir de concentrados en 1994 15
Figura 1.6: Producción de zinc metal en la UE (1994) 16
Figura 1.7: Capacidad de refinado de plomo en Europa 19
Figura 1.8: Capacidad total europea de refinado de metales preciosos 24
Figura 1.9: Uso de ferroaleaciones en distintos sectores industriales en 1994 33
Figura 1.10: Uso de ferroaleaciones en masa y especiales en distintos sectores industriales en 1994 34
Figura 1.11: Producción de ferroaleaciones en masa en Europa 35
Figura 1.12: Uso mundial del magnesio metal 40
Figura 1.13: Aplicaciones del níquel en Occidente en 1996 44
Figura 1.14: Producción europea de níquel 45
Figura 1.15: Producción mundial de cobalto 48
Figura 1.16: Centros de producción europeos de carbono y grafito 51
Figura 2.1: Horno de secado rotatorio 79
Figura 2.2: El horno Herreshoff 80
Figura 2.3: Horno de sinterización con correa de acero 81
Figura 2.4: Ejemplo de un horno de solera con reverbero basculante utilizado para materiales secundarios 82
Figura 2.5: Alto horno para producción de cobre secundario 83
Figura 2.6: Sistema de electrodos de Søderberg en un horno de arco eléctrico 84
Figura 2.7: Horno Rotatorio de Arco Eléctrico 85
Figura 2.8: Horno eléctrico para fundición de concentrado o calcinado 86
Figure 2.9: El proceso ISA Ausmelt/Smelt 87
Figura 2.10: Horno Rotatorio de Soplado Superior 88
Figura 2.11: Reactor Noranda 89
Figura 2.12: Reactor El Teniente 90
Figura 2.13: Proceso Mitsubishi 90
Figura 2.14: Proceso QSL 91
Figura 2.15: Proceso Contop 92
Figura 2.16: Horno Outokumpu 93
Figura 2.17: Horno INCO 94
Figura 2.18: Horno Kivcet 94
Figura 2.19: Convertidor Pierce-Smith 95
Figura 2.20: Convertidor Hoboken 96
Figura 2.21: Hornos de Inducción 97
Figura 2.22: Proceso Contimelt 99
Figura 2.23: Etapas de proceso de la extracción con disolventes (SX) 105
Figura 2.24: Célula de precocción de ánodos para alimentación 109
Figura 2.25: Sistema coincidente de carga y sangrado 110
Figura 2.26: Recogida de vapores mediante un cuarto orificio 111
Figura 2.27: Sistema de campanas secundarias para un convertidor 112
Figura 2.28: Esquema de sistema secundario de recogida de vapores para un proceso de cobre primario 113
Figura 2.29: Recogida de vapores del orificio de sangrado 113
Figura 2.30: Esquema típico de un precipitador electrostático (sólo se muestran dos zonas). 115
Figura 2.31: Precipitador electrostático húmedo 116

Figura 2.32: Esquema de un ciclón 116
Figura 2.33: Esquema general de un filtro de tejido (con un compartimento en el ciclo de limpieza) 117
Figura 2.34: Sistema de limpieza por pulsos inversos 118
Figura 2.35: Lavador de flujo radial 121
Figura 2.36: Tren típico de limpieza de gas para una planta de ácido sulfúrico 126
Figura 2.37: Planta típica de Acido Sulfúrico de Doble Absorción 127
Figura 2.38: Clasificación de Efluentes 143
Figura 2.39: Granulación de metal fundido 145
Figura 2.40: Ejemplo de un Sistema de Recirculación de Agua de Refrigeración 150
Figura 2.41: Limpieza en horno eléctrico de escorias de cobre 164
Figura 2.42: Distintas rutas de reciclaje según la cantidad de residuos generados por algunas plantas de producción de metales no férreos en Rin Norte-Westfalia. 171
Figura 2.43: Balance de energía del proceso Contimelt 174
Figura 2.44: Esquema de un Biolfiltro simple 177
Figura 3.1: Ruta de Producción de Cobre Primario 193
Figura 3.2: Diagrama de flujo de un proceso de lixiviación en montón 196
Figura 3.3: Diagrama de flujo genérico para la producción de cobre secundario 200
Figura 3.4: Ejemplo del proceso Southwire 202
Figura 3.5: Ejemplo del proceso Contirod 203
Figura 3.6: Diagrama de flujo general de la fabricación de productos semiacabados. . . 204
Figura 3.7: Principio de colada continua o semicontinua 206
Figura 3.8: Diagrama genérico de entradas y salidas para cobre primario 212
Figura 3.9: Tratamiento de los gases de horno de fundición y convertidor 212
Figura 3.10: Diagrama genérico de entradas y salidas para cobre secundario 213
Figura 3.11: Ejemplo de diagrama de Entrada-Salida para un centro de producción de cobre secundario con un proceso de recuperación de estaño/plomo 214
Figura 3.12: Esquema general del sistema 242
Figura 3.13: Sistema programado de captura de vapores secundarios 243
Figura 3.14: Esquema general de un sistema de postcombustión 245
Figura 4.1: Producción de alúmina: Proceso Bayer 269
Figura 4.2: Células electrolíticas de aluminio primario 271
Figura 4.3: Proceso genérico de aluminio secundario 274
Figura 4.4: Entradas y salidas de la producción de aluminio primario 277
Figura 4.5: Entrada y salida de la producción secundaria de aluminio. 289
Figura 4.6: Ejemplo de bombeo de metal 305
Figura 4.7: Esquema de un sistema integral de recogida de vapores 309
Figura 5.1: Esquema típico de un Proceso de Fundición para producción de zinc y plomo 330
Figura 5.2: Esquema de un proceso típico de recuperación de baterías 333
Figura 5.3: Esquema de los procesos de refinado de plomo 335
Figura 5.4: Esquema de destilación de zinc/cadmio 337
Figura 5.5: Esquema del proceso hidrometalúrgico de zinc 338
Figura 5.6: Diagramas de flujo simplificados de algunos procesos de eliminación de hierro 339
Figura 5.7: Proceso de lixiviación de concentrado 340
Figura 5.8: Horno de Secado Waelz 343
Figura 5.9: Proceso de lixiviación del óxido Waelz 344
Figura 5.10: Sistema de postcombustión utilizado con un horno de fundición de baterías enteras 371
Figura 5.11: Esquema de un circuito de lavado de Óxido Waelz 375
Figura 5.12: Sistema común de recogida de vapores 377
Figura 5.13: Esquema del proceso WSA 380
Figura 6.1: Diagrama de flujo general para recuperación de metales preciosos 398
Figura 6.2: Ejemplo de diagrama de flujo para tratamiento de limo anódico 399

Figura 6.3: Recuperación de plata a partir de la producción de zinc y plata 401
Figura 6.4: Incinerador de película fotográfica 414
Figura 6.5: Sistema común de recogida de vapores 416
Figura 6.7: Diagrama de flujo de tratamiento de minerales 431
Figura 6.8: Diagrama de flujo de procesos metalúrgicos 432
Figura 8.1: Producción de cromo metal mediante el proceso metalotérmico. 448
Figura 8.2: Producción de cromo metal por electrólisis 449
Figura 8.3: Diagrama de flujo del tungsteno 452
Figura 8.4: Producción de tungsteno metal en polvo 453
Figura 8.5: Producción de carburo de tungsteno 454
Figura 8.6: Producción de pentóxido de vanadio y de vanadio metal 457
Figura 8.7: Recipiente de reacción para la producción de titanio mediante el proceso Kroll 459
Figura 8.8: Producción de óxidos de tantalio y niobio a partir de escoria de estaño . . . 461
Figura 8.9: Producción de tantalio metal puro en polvo 462
Figura 8.10: Proceso de compuestos de niobio y tantalio 463
Figura 8.11: Recuperación de renio de los gases de combustión en la tostación de molibdenita 464
Figura 8.12: Producción de tungsteno en polvo y de carburo de tungsteno 481
Figura 9.1: Producción de ferrocromo alto en carbono en un horno cerrado 494
Figura 9.2: Horno de arco eléctrico para la producción de Si metal, ferrosilicio y CaSi. 497
Figura 9.3: Esquema de proceso para una producción moderna de ferrosilicio y silicio metal 498
Figura 9.4: Producción de FeMn AC en un alto horno. 501
Figura 9.5: Horno de arco eléctrico cerrado para producción de ferromanganeso con electrodos de Søderberg 502
Figura 9.6: Proceso en horno de secado-horno de arco eléctrico para la producción de ferroníquel 505
Figura 9.7: Diagrama de flujo de la tostación de molibdenita 507
Figura 9.8: Esquema de la reducción metalotérmica 509
Figura 9.9: Producción de ferromolibdeno por reducción metalotérmica 510
Figura 9.10: Diagrama de flujo de la producción de ferrotitanio 513
Figura 9.11: Proceso para la producción de ferroboro y aleaciones de boro 514
Figura 9.12: Esquema de la producción de ferroaleaciones mostrando los posibles puntos de emisiones a la atmósfera 524
Figura 9.13: Flujo de energía en un horno de silicio de 10 MW 535
Figura 9.14: Sistema de limpieza de gas para una planta de desengrase 539
Figura 9.15: Horno de sinterización de correa de acero 541
Figura 9.16: Recogida de vapores de sangrado y moldeo 547
Figura 9.17: Sistema de campanas para un alto horno 548
Figura 9.18: Uso directo del CO gas para la producción de energía eléctrica 553
Figura 9.19: Recuperación de energía de un horno semicerrado 555
Figura 9.20: Sistema de recuperación de energía para un alto horno 557
Figura 10.1: Esquema de la producción de sodio 571
Figura 10.2: Célula de Downs 572
Figura 10.3: Esquema de la producción de calcio metal 574
Figura 10.4: Esquema de la producción de estroncio metal 575
Figura 10.5: Esquema del proceso de reducción térmica para producir magnesio metal . 576
Figura 10.6: Esquema de la producción de magnesio por electrólisis 577

Figura 10.7: Esquema de un proceso de producción de magnesio secundario 579
Figura 10.8: Calcinador de Suspensión en Gas 585
Figura 10.9: Esquema del proceso de deshidratación para la producción de magnesio primario 586
Figura 10.10: Esquema de una planta de extrusión para la producción de palanquillas de metales alcalinos 589
Figura 10.11: Planta de tratamiento para la limpieza de aguas residuales contaminadas con dioxinas e hidrocarburos clorados 590
Figura 11.1: Esquema general para la producción de níquel a partir de minerales de Laterita 600
Figura 11.2: Esquema genérico para la producción de níquel a partir de concentrados de sulfuro 601
Figura 11.3: Fundición convencional en horno flash 602
Figura 11.4: El proceso DON 602
Figura 11.5: Esquema genérico para procesos de refinado de mata de níquel 603
Figura 11.6: Proceo Falconbridge 604
Figura 11.7: Proceso de lixiviación con base de sulfato 604
Figura 11.8: Esquema del proceso de refinado DON 605
Figura 11.9: Lixiviación con amoniaco Sherritt 606
Figura 11.10: Resumen de proceso de extracción con disolvente (EXD) 607
Figura 11.11: Esquema genérico que muestra los pasos posibles de proceso para la producción de cobalto 609
Figura 12.1: Vista general de los pasos del proceso 635
Figura 12.2: Vistas generales de un horno anódico de cocción abierto 637
Figura 12.3: Perfil de temperatura durante la cocción de ánodos 638
Figura 12.4: Horno de grafitización de Castner 639
Figura 12.5: Horno de grafitización de Acheson 640
Figura 12.6: Producción de perfiles de grafito 642
Figura 12.7: Diagrama de emisiones genéricas de los procesos empleados 644
Figura 12.8: Destino de las fracciones de brea de alquitrán 645
Figura 12.9: Ejemplo de biofiltro 654

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Producción en la UE (y Estados Asociados Europeos) de cobre y sus aleaciones en miles de toneladas en 1997 6
Tabla 1.2. Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas) . . 10
Tabla 1.3: Producción europea de aluminio en 1997 12
Tabla 1.4: Usos del zinc en el Mundo y en Europa 13
Tabla 1.5: Calidades de zinc primario. 13
Tabla 1.6: Calidades de zinc secundario 14
Tabla 1.7: Producción de concentrados de zinc 15
Tabla 1.8: Producción de zinc refinado 15
Tabla 1.9: Principales productores europeos en capacidad anual, 1994 16
Tabla 1.10: Calidades de plomo 17
Tabla 1.11: Usos del plomo en el mundo. 17
Tabla 1.12: Capacidades anuales de los procesos de plomo en Europa. 19
Tabla 1.13: Principales productores y consumidores de cadmio en 1996 21
Tabla 1.14: Recursos primarios de metales preciosos en 1997 23
Tabla 1.15: Capacidad anual de las refinerías europeas (toneladas) 24
Tabla 1.16: Demanda de Metales Preciosos en 1996 25
Tabla 1. 17: Fuentes de mercurio 26
Tabla 1.18: Producción de mercurio en Europa Occidental 27
Tabla 1.19: Propiedades físicas de los metales refractarios 27
Tabla 1.20: Materias primas primarias y secundarias para la producción de metales refractarios. 29
Tabla 1.21: Capacidad mundial de producción de cromo metal 30
Tabla 1.22: Principales productores mundiales de niobio y tantalio 32
Tabla 1.23: Producción europea de ferroaleaciones en masa en toneladas anuales 36
Tabla 1.24: Producción mundial de ferroaleaciones en masa 37
Tabla 1.25: Producción mundial de magnesio primario por países 41
Tabla 1.26: Cantidades producidas de magnesio primario y secundario en toneladas anuales 41
Tabla 1.27: Centros de producción de níquel 44
Tabla 1.28: Distribución de la producción total del cobalto entre los distintos sectores . . 47
Tabla 1.29: Producción anual de carbono y grafito en la UE y Noruega 50
Tabla 1.30: Producción de la UE de carbono y grafito en miles de toneladas en 1998 . . . 50
Tabla 2.1: Procesos que pueden formar parte de instalaciones integrales 54
Tabla 2.2: Ejemplo de datos para la determinación de prioridades 59
Tabla 2.3: Resumen de métodos de pretratamiento 77
Tabla 2.4: Aplicaciones típicas de hornos 78
Tabla 2.5: Hornos de secado, tostación, sinterización y calcinación 101
Tabla 2.6: Hornos de fundición y conversión 102
Tabla 2.7: Hornos de Fusión 102
Tabla 2.8: Comparación de las emisiones eliminadas y fugitivas de polvo en una fundición de cobre primario. 107
Tabla 2.9: Comparación entre distintos sistemas de filtros de bolsa 119
Tabla 2.10: Ejemplo de emisiones actuales de algunas aplicaciones de eliminación de polvo (mg de polvo/Nm^3) 132
Tabla 2.11: Ejemplo de la concentración de los principales componentes del gas limpio de una planta de ácido sulfúrico 132
Tabla 2.12: Ejemplo del comportamiento de algunas plantas de ácido sulfúrico existentes 133
Tabla 2.13: Resumen de técnicas de eliminación de polvo 137

Tabla 2.14: Rendimiento medido de los sistemas de eliminación de polvo cuando se utilizan diversas técnicas de eliminación de polvo con tipos de polvo adecuados. . 137
Tabla 2.15: Posibles fuentes de efluentes líquidos de la producción electrolítica de metales no férreos 146
Tabla 2.16: Resumen de Reciclaje y Reutilización 149
Tabla 2.17: Concentración de algunos metales tras el tratamiento de agua residual con cal o con NaHS 152
Tabla 2.18: Paso típico de iones a través de la membrana de ósmosis inversa 154
Tabla 2.19: Ejemplo del contenido de metales en aguas residuales antes y después del tratamiento, relativo a un complejo de fundición/refinería de cobre 156
Tabla 2.20: Tratamiento de algunos caudales residuales de cobre 157
Tabla 2.21: Resumen de corrientes de aguas residuales 158
Tabla 2.22: a) Resumen de ventajas y desventajas de las técnicas comunes de tratamiento de aguas residuales 159
Tabla 2.23: b) Resumen de ventajas y desventajas de las técnicas comunes de tratamiento de aguas residuales 160
Tabla 2.24: Materiales de la producción de metales no férreos 161
Tabla 2.25: Cantidades de residuos reciclados, reutilizados y desechados reportadas en 1996 para algunas plantas de metales no férreos en la región de Rin Norte Westfalia 165
Tabla 2.26: Cantidades de residuos reciclados, reutilizados y desechados reportadas en 1996 para algunas plantas de metales no férreos en Rin Norte-Westfalia . . . 166
Tabla 2.27: Residuos y posibles usos 170
Tabla 2.28: Resumen de técnicas de manipulación y almacenamiento 182
Tabla 2.29: Resumen de las corrientes de aguas residuales 187
Tabla 3.1: Tecnología de fundición de cobre primario 190
Tabla 3.2: Uso mundial de las tecnología de fundición 191
Tabla 3.3: Ejemplo de eliminación de impurezas durante el refinado electrolítico 195
Tabla 3.4: Producción de materias primas secundarias de la producción de cobre 198
Tabla 3.5: Datos típicos de un proceso de producción de banda de latón 207
Tabla 3.6: Comparación de las cargas de polvo eliminadas y fugitivas en una fundición primaria de cobre 211
Tabla 3.7: Ejemplo de datos de entrada y salida para una fundición / refinería de cobre primario 213
Tabla 3.8: Datos de Entrada-Salida para el diagrama de proceso de cobre secundario de arriba 214
Tabla 3.9: Importancia de las posibles emisiones a la atmósfera de los procesos de producción de cobre 215
Tabla 3.10: Principales componentes del polvo de los procesos de cobre 217
Tabla 3.11: Emisiones específicas a la atmósfera de algunos procesos primarios y secundarios 220
Tabla 3.12: Emisiones alcanzables en un proceso de fabricación de semis 220
Tabla 3.13: Emisiones específicas de un proceso de fabricación de semis 220
Tabla 3.14: Importancia de las emisiones potenciales al agua de los procesos de producción de cobre 221
Tabla 3.15: Ejemplo del contenido de metales en diversas aguas residuales tras su tratamiento 222
Tabla 3.16: Cargas anuales evacuadas al agua de una planta de producción de semis de cobre 222
Tabla 3.17: Productos intermedios, subproductos y residuos de la producción de cobre . 223
Tabla 3.18: Ejemplo de la cantidad de residuos producidos por una instalación compleja primaria y secundaria 224
Tabla 3.19: Ejemplo de la cantidad de residuos producidos por una instalación secundaria 225
Tabla 3.20: Composición de algunas escorias de fundición de cobre antes del tratamiento de limpieza de escorias 225

Tabla 3.21: Fijación media de azufre frente a coste operativo en €/kg alcanzado por fundiciones de todo el mundo . . . 226
Tabla 3.22: Técnicas de almacenamiento, manipulación y pretratamiento a considerar para cobre. . . . 229
Tabla 3.23: Resumen de los hornos de Fundición Primaria de Cobre . . . 231
Tabla 3.24: Datos operativos de una planta de ácido sulfúrico que opera en distintas condiciones de gases de entrada . . . 233
Tabla 3.25: Resumen de los hornos de fundición secundaria . . . 236
Tabla 3.26: Resumen de convertidores para producción primaria y secundaria de cobre . 238
Tabla 3.27: Métodos de eliminación a considerar . . . 241
Tabla 3.28: Datos operativos del sistema . . . 242
Tabla 3.29: Rendimiento de las mejoras de captura de vapores secundarios . . . 243
Tabla 3.30: Tratamiento de gases tras su captura por la línea extracción de techo . . . 244
Tabla 3.31: Datos operativos para el tratamiento de ácido diluido . . . 247
Tabla 3.32: Datos operativos para un sistema de tratamiento con NaHS . . . 248
Tabla 3.33: Datos operativos para un sistema de tratamiento de agua . . . 248
Tabla 3.34: Resumen de técnicas de manipulación y almacenamiento para cobre . . . 254
Tabla 3.35: Fundiciones primarias de cobre consideradas como MTD . . . 256
Tabla 3.36: Fundiciones secundarias de cobre consideradas como BAT . . . 258
Tabla 3.37: Resumen de los métodos de eliminación de los componentes en los gases de escape . . . 260
Tabla 3.38: Emisiones a la atmósfera de la fundición y conversión primaria asociada con el uso de las MTD en el sector del cobre. . . . 262
Tabla 3.39: Emisiones a la atmósfera de los procesos hidrometalúrgicos y de recuperación electrolítica asociados con el uso de las MTD en el sector del cobre. . . 262
Tabla 3.40: Emisiones a la atmósfera de la fundición y conversión secundaria, refinado al fuego primario y secundario, limpieza y fusión de escorias en horno eléctrico, asociadas con el uso de las MTD en el sector del cobre. . . . 263
Tabla 3.41: Emisiones al aire de sistemas de recogida de vapores secundarios y procesos de secado asociados con el uso de las MTD en el sector del cobre . . . 264
Tabla 3.42: Contenido de metales de algunos polvos de diversos procesos de producción de cobre. . . . 265
Tabla 3.43: Rango de concentraciones de metales asociadas de una serie de corrientes de aguas residuales de la producción de cobre. . . . 266
Tabla 3.44: Posibles usos de los productos intermedios, subproductos y residuos de la producción de cobre. . . . 266
Tabla 3.45: Tecnología emergente de fundición en baño . . . 267
Tabla 4.1: Rangos de entradas para la producción de alúmina . . . 277
Tabla 4.2: Rangos de entrada para electrólisis . . . 278
Tabla 4.3: Datos de consumo de la sección de moldeo . . . 278
Tabla 4.4: Concentraciones de gases sin tratar en células de aluminio primario . . . 280
Tabla 4.5: Importancia de las posibles emisiones de aluminio primario. . . . 284
Tabla 4.6: Total de emisiones a la atmósfera de fundiciones primarias de aluminio . . . 284
Tabla 4.7: Sección de moldeo de aluminio primario - emisiones a la atmósfera . . . 284
Tabla 4.8: Emisiones al agua de las plantas de electrólisis primaria . . . 286
Tabla 4.9: Composición del Revestimiento de Crisol Consumido . . . 287
Tabla 4.10: Opciones para reducir los residuos de una fundición primaria de aluminio . . 288
Tabla 4.11: Cantidades específicas de residuos de la producción primaria de aluminio . . 288
Tabla 4.12: Importancia de las posibles emisiones a la atmósfera . . . 290
Tabla 4.13: Composición típica del polvo de filtro de la producción secundaria de aluminio . 291
Tabla 4.14: Secado de virutas . . . 292
Tabla 4.15: Fusión en horno de inducción (tras la eliminación) . . . 292
Tabla 4.16: Fusión en horno rotatorio (tras la eliminación) . . . 293
Tabla 4.17: Horno de reverbero y fusión en horno con pozo lateral (tras la eliminación) . 293

Tabla 4.18: Fusión en horno con solera en pendiente (tras la eliminación) 293
Tabla 4.19: Residuos típicos de la producción secundaria de aluminio 294
Tabla 4.20: Preparación de las escorias superficiales 295
Tabla 4.21: Composición típica de la escoria salina 295
Tabla 4.22: Emisiones a la atmósfera típicas recogidas del reciclaje de escoria salina (excluyendo el escape de la caldera, si lo hay) 294
Tabla 4.23: Métodos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales primarios para aluminio. 297
Tabla 4.24: Métodos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales secundarios para aluminio 298
Tabla 4.25: Resumen de los hornos de fundición secundarios. 304
Tabla 4.26: Resumen de técnicas de manipulación y almacenamiento para aluminio . . . 317
Tabla 4.27: Hornos considerados como MTD para producción secundaria de aluminio . . 319
Tabla 4.28: Otras etapas de proceso consideradas como Mejores Técnicas Disponibles para la producción primaria de aluminio 320
Tabla 4.29: Otras etapas de proceso consideradas como Mejores Técnicas Disponibles para la producción secundaria de aluminio 320
Tabla 4.30: Aplicaciones de eliminación consideradas como Mejores Técnicas Disponibles para la producción primaria de aluminio 321
Tabla 4.31: Aplicaciones de eliminación consideradas como Mejores Técnicas Disponibles para la producción secundaria de aluminio 321
Tabla 4.32: Resumen de posibles contaminantes y opciones de eliminación 322
Tabla 4.33: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD para electrólisis de aluminio primario. 323
Tabla 4.34: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD para electrólisis de aluminio secundario. 324
Tabla 4.35: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD para el pretratamiento de materiales (incluido secado de virutas), fusión y fundición de aluminio secundario 324
Tabla 4.36: Emisiones al agua asociadas con el uso de la s MTD para producción de aluminio primario con una planta de ánodos asociada. 325
Tabla 4.37: Opciones para los residuos de una fundición primaria de aluminio 326
Tabla 4.38: Opciones para los residuos de la producción de aluminio secundario 326
Tabla 5.1: Procesos de fundición directa 331
Tabla 5.2: Composición típica de la chatarra de baterías ácidas de plomo de automoción . 332
Tabla 5.3: Datos de entrada y salida para una planta de proceso ISP (1998) 347
Tabla 5.4: Datos de entrada y salida para el horno ISA Smelt (montaje y datos preliminares) 347
Tabla 5.5: Datos de entrada y salida para la planta QSL (1997) 347
Tabla 5.6: Datos de entrada y salida para una planta de recuperación de baterías sin desulfurización (1998) 348
Tabla 5.7. Datos de entrada y salida para una planta de recuperación de baterías con desulfurización (1998) 348
Tabla 5.8: Datos de entrada y salida para una planta de recuperación de baterías con eliminación de pasta (1998) 348
Tabla 5.9: Datos de entrada y salida para una planta de recuperación de baterías con fundición de baterías enteras (1998) 349
Tabla 5.10: Datos típicos para una planta de electrólisis de zinc. Tostación - Lixiviación - Purificación - Electrólisis 349
Tabla 5.11: Composición típica de la alimentación y de los productos para una planta electrolítica de zinc 349
Tabla 5.12: Datos de entrada y salida para un horno de secado Waelz con un proceso de lixiviación de óxido de dos etapas 350
Tabla 5.13: Datos de entrada y salida para una planta de Waelz (1996/97) 350
Tabla 5.14: Requisitos de energía de los distintos procesos de plomo 350

Tabla 5.15: Requisitos de energía de los distintos procesos de zinc 351
Tabla 5.16: Importancia de las posibles emisiones a la atmósfera de la producción de plomo, zinc y cadmio 352
Tabla 5.17: Repercusión de las mejoras en la planta sobre las emisiones fugitivas 352
Tabla 5.18: Producción de dióxido de azufre de distintos procesos de zinc y plomo 353
Tabla 5.19: Masa de las emisiones de metales de algunos procesos europeos (emisiones controladas sólo) 354
Tabla 5.20: Efluentes típicos de la limpieza de gases 356
Tabla 5.21: Análisis típicos de aguas residuales 357
Tabla 5.22: Tabla Resumen de Posibles Fuentes de Aguas Residuales y Opciones 358
Tabla 5.23: Ejemplo de composiciones de distintos tipos de residuos 360
Tabla 5.24: Valores de eluado de escoria granulada de horno ISF 361
Tabla 5.25: Valores de eluado para escoria ácida de horno Waelz 361
Tabla 5.26: Valores de eluado para escoria del proceso QSL 361
Tabla 5.27: Material sólido del refinado de lingote de plomo 362
Tabla 5.28: Residuos de los procesos de zinc 363
Tabla 5.29: Residuos de los procesos de plomo 364
Tabla 5.30: Residuos de los procesos de fundición directa de plomo 365
Tabla 5.31: Técnicas de almacenamiento, manipulación y pretratamiento para plomo, zinc y cadmio 368
Tabla 5.32: Resumen de fundiciones primarias de plomo 369
Tabla 5.33: Datos operativos para postcombustión 371
Tabla 5.34: Resumen de los hornos de fundición secundaria 372
Tabla 5.35: Resumen de fundiciones de zinc primario 373
Tabla 5.36: Efecto del lavado 376
Tabla 5.37: Agua residual del proceso de lavado 376
Tabla 5.38: Métodos de tratamiento químico para compuestos gaseosos 378
Tabla 5.39: Comportamiento del sistema WSA 380
Tabla 5.40: Comportamiento del proceso de ácido sulfúrico 381
Tabla 5.41: Fundiciones primarias de plomo consideradas como MTD 386
Tabla 5.42: Fundiciones secundarias de plomo consideradas como MTD 386
Tabla 5.43: Resumen de otras etapas de proceso consideradas como Mejores Técnicas Disponibles 388
Tabla 5.44: Resumen de las opciones de eliminación de los componentes en los gases de escape 389
Tabla 5.45: Emisiones a la atmósfera de la fundición primaria, tostación y sinterización asociadas con el uso de las MTD en el sector de plomo y zinc 391
Tabla 5.46: Emisiones a la atmósfera del refinado químico, electro-recuperación y extracción con disolventes 391
Tabla 5.47: Emisiones a la atmósfera de la fusión de material limpio, aleación y producción de zinc en polvo 392
Tabla 5.48: Emisiones a la atmósfera del pretratamiento, fundición secundaria, refinado térmico, fusión, volatilización de escoria y operación del horno Waelz 393
Tabla 5.49: Contenido de metales de algunos polvos de diversos procesos de producción de plomo y zinc 394
Tabla 5.50: Resumen de las emisiones al agua asociadas con algunos procesos 395
Tabla 6.1: Categorías de homogeneización para muestreo 397
Tabla 6.2: Importancia de las emisiones potenciales a la atmósfera de la producción de metales preciosos 407
Tabla 6.3: Emisiones a la atmósfera de una serie de procesos grandes 407
Tabla 6.4: Emisiones a la atmósfera de una serie de procesos pequeños 409
Tabla 6.5: Importancia de las posibles emisiones al agua de la producción de metales preciosos 410
Tabla 6.6: Emisiones al agua de 5 procesos grandes 410

Tabla 6.7: Ejemplo de cantidades de residuos para desecho 410
Tabla 6.8: Manipulación y pretratamiento de materiales 412
Tabla 6.9: Técnicas a considerar para las etapas de producción de metales 413
Tabla 6.10: Hornos de fundición y copelación 415
Tabla 6.11: Métodos de tratamiento químico para algunos compuestos gaseosos 417
Tabla 6.12: Opciones de hornos para metales preciosos 425
Tabla 6.13: Aplicaciones de eliminación consideradas como Mejores Técnicas Disponibles . 426
Tabla 6.14: Emisiones a la atmósfera de procesos metalúrgicos complejos utilizados para la recuperación de metales preciosos en conjunción con producción de cobre y plomo 427
Tabla 6.15: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD de la extracción y refinado químico, electro-recuperación y extracción con disolventes para recuperación de metales preciosos 428
Tabla 6.16: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de MTD del pretratamiento de materiales (incluida incineración), tostación, copelación, fundición, refinado térmico y fusión para la recuperación de metales preciosos. 429
Tabla 6.17: Emisiones al agua asociadas con el uso de las MTD 430
Tabla 7.1: Emisiones a la atmósfera de la producción primaria 436
Tabla 7.2: Emisiones al agua de la producción primaria 436
Tabla 7.3: Emisiones a la atmósfera de la producción secundaria 437
Tabla 7.4: Emisiones al agua de la producción secundaria 437
Tabla 7.5: Resumen de los métodos de eliminación para los componentes del gas de escape 444
Tabla 7.6: Emisiones a la atmósfera de la trituración de mineral, tostación, destilación y procesos asociados para la producción primaria de mercurio. 444
Tabla 7.7: Emisiones a la atmósfera de la producción primaria de mercurio y la producción de metales base asociada con el uso de las MTD en el sector del mercurio. . 445
Tabla 8.1: Datos de consumo para la producción de metales refractarios como factores de entrada específicos. 466
Tabla 8.2: Datos de proceso para la fundición de metales refractarios en un horno de haz de electrones 466
Tabla 8.3: Emisiones de la producción de cromo y manganeso metal 469
Tabla 8.4: Emisiones de la producción de tungsteno metal y de tungsteno metal en polvo de cromo y manganeso metal 470
Tabla 8.5: Emisiones de la producción de vanadio y molibdeno metal 471
Tabla 8.6: Emisiones de la producción de titanio metal 472
Tabla 8.7: Emisiones de la producción de tantalio metal 473
Tabla 8.8: Emisiones de la producción de niobio metal 474
Tabla 8.9: Emisiones de la producción de renio, zirconio y hafnio metal 475
Tabla 8.10: Resumen de las ventajas y desventajas de los sistemas de fundición empleados en la producción de metales refractarios 480
Tabla 8.11: Emisión de polvo tras la eliminación 481
Tabla 8.12: Hornos considerados como MTD para la producción de metales refractarios. 486
Tabla 8.13: Niveles de emisiones a la atmósfera asociados con el uso de las MTD 488
Tabla 8.14: Reciclaje y reutilización de los residuos de la producción de metales refractarios 489
Tabla 9.1: Materia prima para la producción de ferrosilicio, Si metal y silico-calcio . . . 496
Tabla 9.2: Cantidades típicas de óxidos metálicos en las materias primas secundarias . . 515
Tabla 9.3: Consumo bruto de materias primas y energía para la producción de ferrocromo. 520
Tabla 9.4: Datos de consumo para la recuperación de ferroaleaciones de residuos de acería, como factores de aporte específico sobre la base de una tonelada de metal recuperado 521
Tabla 9.5: Consumo de materias primas y de energía como factores de aporte específico en la producción de ferrosilicio, silicio y CaSi 521
Tabla 9.6: Datos de consumo para la producción de sinterizado de mineral de manganeso,

ferromanganeso y silicomanganeso como factores de aporte específico. 522
Tabla 9.7: Datos de consumo para la producción de ferroaleaciones especiales como factores de aporte especifico 535
Tabla 9.8: Emisiones de polvo para la producción de ferrocromo, basadas en una tonelada de aleación producida 525
Tabla 9.9: Emisiones de polvo para la producción de ferrosilicio y silicio metal basadas en una tonelada de aleación producida 526
Tabla 9.10: Emisiones de polvo en la producción de ferromanganeso y silicomanganeso, basadas en una tonelada de aleación producida 526
Tabla 9.11: Emisiones de polvo a la atmósfera (tras eliminación) para la producción de ferroaleaciones 527
Tabla 9.12: Emisiones a la atmósfera (tras eliminación) en la producción de ferroaleaciones en masa 529
Tabla 9.13: Emisiones a la atmósfera de la producción de ferroníquel 530
Tabla 9.14: Cifras de concentraciones de emisión de la producción de ferroaleaciones secundarias 530
Tabla 9.15: Emisiones al agua de la recuperación de ferroaleaciones de residuos de acería utilizando el proceso Plasmadust con un lavador húmedo como técnica de eliminación aplicada 532
Tabla 9.16: Emisiones al agua de la tostación de molibdenita 532
Tabla 9.17: Producción, reciclaje, reutilización y desecho de escoria de ferroaleaciones . 533
Tabla 9.18: Producción, reciclaje, reutilización y desecho del polvo y el lodo del sistema de eliminación de aire 534
Tabla 9.19: Resumen de recuperación de energía en la industria de ferroaleaciones noruega en 1989 537
Tabla 9.20: Reutilización de energía en la producción de ferroaleaciones en masa 537
Tabla 9.21: Resumen de ventajas y desventajas de los sistemas de fundición utilizados en la industria de ferroaleaciones 544
Tabla 9.22: Energía recuperable y recuperada total 551
Tabla 9.23: Balance total de energía para una fundición de FeCr 551
Tabla 9.24: Comparación del consumo energético eléctrico y de combustibles 552
Tabla 9.25: Hornos de fundición considerados como MTD para la producción de ferroaleaciones 562
Tabla 9.26: Hornos de fundición considerados como MTD para la producción de ferroaleaciones 563
Tabla 9.27: Niveles de emisiones a la atmósfera asociados con el uso de las MTD 565
Tabla 9.28: Reciclaje y reutilización de escoria de la producción de ferroaleaciones 567
Tabla 9.29: Reciclaje y reutilización del polvo de filtro recogido y de los lodos de la producción de ferroaleaciones 568
Tabla 9.30: MTD para recuperación de energía en la producción de ferroaleaciones 569
Tabla 10.1: Definición de la chatarra y materiales de magnesio para reciclaje 578
Tabla 10.2: Emisiones a la atmósfera de la producción de sodio y litio metal 580
Tabla 10.3: Emisiones a la atmósfera de la producción de magnesio metal mediante el proceso de cloración-electrólisis 581
Tabla 10.4: Emisiones a la atmósfera de la producción de magnesio metal por reducción térmica 581
Tabla 10.5: Emisiones al agua de la producción de sodio y litio metal 582
Tabla 10.6: Emisiones al agua de la producción de magnesio metal por el proceso electrolítico 582
Tabla 10.7: Residuos de la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos 583
Tabla 10.8: Unidades de producción consideradas como MTD para la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos 594
Tabla 10.9: Niveles de emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD 596
Tabla 10.10: Utilización, reciclaje y reutilización de residuos de la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos 598
Tabla 11.1: Composición de algunos minerales 599

Tabla 11.2: Ejemplo de datos de entrada y salida para la producción mundial de níquel . 610
Tabla 11.3: Significado de emisiones potenciales a la atmósfera de la producción de cobalto y níquel 611
Tabla 11.4: Producción de dióxido de azufre de algunos procesos de níquel y cobalto . . 612
Tabla 11.5: Emisión de metales de algunos procesos europeos 613
Tabla 11.6: Significado de la captura de vapores secundarios y emisiones fugitivas 614
Tabla 11.7: Efluentes típicos de la limpieza de gases 615
Tabla 11.8: Tabla resumen de opciones y fuentes potenciales de agua residual 616
Tabla 11.9: Ejemplos de análisis de aguas residuales 617
Tabla 11.10: Ejemplo-composiciones de distintos tipos de residuos 617
Tabla 11.11: Composición de escorias de níquel típicas 618
Tabla 11.12: Residuos sólidos de los procesos de Ni y Co 618
Tabla 11.13: Métodos de tratamiento químico para algunos componentes gaseosos 623
Tabla 11.14: Métodos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento para níquel y cobalto 627
Tabla 11.15: Resumen de las opciones de eliminación consideradas como Mejores Técnicas Disponibles. 629
Tabla 11.16: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD, del pretratamiento, incineración, post-combustión, tostación, fundición, refinado térmico y fusión de materiales para la producción de níquel y cobalto 630
Tabla 11.17: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD, de la lixiviación, extracción química y refinado, electro-recuperación y extracción de disolventes, para la producción de níquel y cobalto 631
Tabla 11.18: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD, de la tostación y fundición de concentrados de sulfuro e intermedios, para la producción de níquel y cobalto 631
Tabla 12.1: Gas crudo procedente de la producción de ánodos en una planta asociada con una fundición de aluminio primario 647
Tabla 12.2: Emisiones en masa de la producción de ánodos precocidos 647
Tabla 12.3: Rangos de emisión para varios procesos de carbono y de grafito 648
Tabla 12.4: Importancia de las emisiones potenciales a la atmósfera procedentes de la producción de carbono y de grafito. 649
Tabla 12.5: Ejemplos de algunos rangos de HAP reportados que usan diversos grupos de compuestos 650
Tabla 12.6: Técnicas a considerar para almacenamiento, manipulación y métodos de pretratamiento 652
Tabla 12.7: Métodos de tratamiento para componentes gaseosos 653
Tabla 12.8: Métodos de almacenamiento y pretratamiento considerados como MTD . . . 659
Tabla 12.9: Fuentes y tratamiento de emisiones eliminadas y fugitivas de la producción de carbono y de grafito 661
Tabla 12.10: Convenciones de indicación para HAPs 662
Tabla 12.11: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en el almacenamiento y la manipulación de coque y brea. 662
Tabla 12.12: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en las etapas de trituración y mezcla. 663
Tabla 12.13: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en la producción de ánodos precocidos, en los que no es viable compartir la eliminación con gases de célula de fundición, y en la precocción, impregnación y recocción para la producción de ánodos de carbono y de grafito. 663
Tabla 12.14: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en la producción de ánodos precocidos de un proceso que comparte el sistema de eliminación con una fundición de aluminio primario. 664
Tabla 12.15: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en las etapas de mecanización y grafitización. 664

Tabla 12.16: Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD en las etapas de mezcla e impregnación, si se usan disolventes, y en la producción de fibras de carbono 665
Tabla I.1: Algunos tipos de cambio de divisas 691
Tabla I.2: Fundiciones de cobre primarios / complejos con plantas ácidas 693
Tabla I.3: Fundiciones de cobre secundarias 694
Tabla I.4: Refinerías de cobre electrolítico 695
Tabla I.5: Plantas de alambrón de cobre 695
Tabla I.6: Procesos del plomo 698
Tabla I.7: Procesos del zinc 698
Tabla I.8: Procesos del zinc y del plomo 699
Tabla I.9: Residuos de zinc 699
Tabla I.10: Enfriamiento indirecto de Gas – Recuperación de Energía 700
Tabla I.11: Limpieza de Gas con PE seco 700
Tabla I.12: Filtros de tejido 700
Tabla I.13: Limpieza de Gas con PE húmedo 701
Tabla I.14: Limpieza húmeda del gas de PE 701
Tabla I.15: Sistema postcombustión, reactor y filtro de tejido 702
Tabla I.16: Sistema postcombustión 703
Tabla I.17: Desulfurización húmeda 704
Tabla I.18: Lavador semiseco 705
Tabla I.19: Filtro de carbón activado 706
Tabla I.20: RCS 707
Tabla I.21: Lavador en seco y filtro de tejido 708
Tabla I.22: Lavador semiseco y filtro de tejido 709
Tabla I.23: Lavador semiseco y filtro de tejido 710
Tabla I.24: Lavador húmedo y PE 711
Tabla I.25: Lavador semiseco y filtro de tejido 712
Tabla I.26: Plantas de Acido Sulfúrico en Fundiciones de Cobre 713
Tabla I.27: Plantas de ácido sulfúrico 714
Tabla I.28: Acido diluido y neutralización 714
Tabla II.1: Contaminación atmosférica – Límites de emisiones para polvo y contaminantes metálicos 716
Tabla II.2: Contaminación atmosférica – Límites de emisiones para contaminantes no metálicos 719
Tabla II.3: Contaminación del agua – Valores límite para emisiones en agua 720
Tabla II.4: Valores límite de emisiones alemanas para procesos de incineración 724

1 INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Procesos cubiertos por el ámbito del trabajo

Existen muchas similitudes entre la producción primaria y secundaria de metales no férreos, y en muchos casos es imposible hacer distinciones entre las técnicas empleadas. La producción secundaria de metales no férreos incluye la producción de metal a partir de materias primas secundarias (incluida chatarra), así como los procesos de refundición y aleación. Este documento BREF cubre las técnicas para la producción de los metales no férreos tanto primarios como secundarios.

La producción de ánodos de carbono y grafito (Sección 6.8 del Anexo I de la Directiva sobre IPPC) se incluye dado que en algunas fundiciones de aluminio la producción de ánodos es parte integral del proceso de producción.

Se ha estudiado la producción de los 42 metales no férreos y la producción de ferroaleaciones en países que están obligados a poner en práctica la IPPC. Se identificaron 10 grupos de metales con métodos de producción similares. El estudio recogió datos sobre la base de estos grupos, y este documento se estructura sobre esta base.

Los grupos son:

- **Cu y sus aleaciones, Sn y Be**
- **Al y sus aleaciones**
- **Zn, Pb, Cd, Sb y Bi**
- **Metales Preciosos**
- **Mercurio**
- **Metales Refractarios, como Cr, W, V, Ta, Nb, Re, Mo**
- **Ferroaleaciones, como FeCr, FeSi, FeMn, SiMn, FeTi, FeMo, FeV, FeB**
- **Metales Alcalinos y Alcalinotérreos, Na, K, Li, Sr, Ca, Mg y Ti**
- **Ni y Co**
- **Electrodos de carbono y grafito**

La producción de metales radiactivos queda excluida del trabajo. Se excluye asimismo la producción de componentes como semiconductores.

Las instalaciones bajo el Anexo 2. del Anexo I de la directiva – sinterización y tostación – son cubiertas por el presente documento. Las operaciones de tostación y sinterización se cubren en dos áreas: - a) las que forman parte del proceso 2.5a) para producir el metal, -b) aquellas en las que la tostación y la sinterización se realizan independientemente, por ejemplo la tostación de molibdeno.

Hay interconexiones con el Sector Químico, pero existen temas específicos y diferencias que deben tenerse en consideración cuando estos procesos están asociados con la producción de metales o cuando se producen compuestos metálicos como subproductos de la producción de metal. Los siguientes procesos se incluyen en el ámbito de este trabajo:

La producción de productos de azufre como azufre básico, dióxido de azufre y ácido sulfúrico cuando está asociada con la producción de un metal no férreo. En el caso del ácido sulfúrico, se produce a partir del dióxido de azufre de los gases emitidos en las diversas etapas del proceso. La concentración de gas, la temperatura y las trazas contaminantes incluyen en el diseño del proceso y en la elección del catalizador.

- La producción de óxido de zinc a partir de vapores durante la producción de otros metales,

- La producción de compuestos de níquel a partir de las soluciones producidas durante la producción de un metal,
- La producción de CaSi y Si que tiene lugar en el mismo horno que la producción de ferrosilicio.
- La producción de óxido de aluminio a partir de bauxita antes de la producción de aluminio primario. Se trata de una etapa de pretratamiento, que puede realizarse en la mina o en la fundición. Es parte integral de la producción del metal cuando se realiza en la fundición y se incluye en el BREF.

La laminación, el trefilado y el prensado de metales no férreos, cuando están directamente integrados con la producción de metal, son objeto de un permiso y por consiguiente se incluyen en este documento. Los procesos de fundición no se incluyen en este trabajo y se cubrirán en otros documentos.

1.2 Visión General de la Industria

La Industria Europea de Metales No Férreos tiene una importancia económica y estratégica que trasciende lo que indican las estadísticas de empleo, capital y facturación. Por ejemplo, el cobre de alta pureza es esencial para la producción y distribución de energía, y pequeñas cantidades de níquel mejoran la resistencia a la corrosión del acero.

Los metales no férreos y sus aleaciones están en el corazón de la vida moderna, y muchos desarrollos de alta tecnología, particularmente en las industrias de la informática, electrónica, telecomunicaciones y transporte, dependen de ellos.

1.2.1 Metales no férreos y aleaciones

Todos los metales no férreos considerados en este documento y detallados en el punto 1.1 anterior tienen sus propias propiedades y aplicaciones individuales. Sin embargo, en algunos casos, como el cobre y aluminio, las aleaciones se utilizan en más aplicaciones que los metales puros, al haber sido diseñadas para tener una resistencia, tenacidad, etc. específica para los requisitos de aplicaciones particulares.

Los metales son inherentemente reciclables y pueden reciclarse una y otra vez sin perder ninguna de sus propiedades. De este modo suponen una contribución significativa al desarrollo sostenible. Normalmente no es posible distinguir entre un metal refinado producido a partir de materias primas primarias o secundarias, de uno producido sólo a partir de materias primas secundarias (ej. chatarra, etc.).

1.2.2 Ámbito de la industria

La producción de la industria se deriva de una gran variedad de materias primas primarias y secundarias. Las materias primas primarias se derivan de minerales que se extraen en minas y que luego se tratan antes de ser procesados metalúrgicamente para producir metal bruto. El tratamiento de los minerales se realiza cerca de las minas, al igual que, cada vez más, la producción de metales. Las materias primas secundarias son la chatarra y los residuos autóctonos.

En Europa, los yacimientos de minerales que contienen metales en concentraciones viables se han agotado progresivamente y quedan pocos yacimientos autóctonos. La mayor parte de concentrados se importan a Europa desde diversas procedencias de todo el mundo.

La producción de la industria es metal refinado o lo que se conoce como semifabricados,

como lingotes moldeados de metal y aleaciones metálicas o formas forjadas, extrusionadas, papel metálico, chapa, bandas, barras, etc.

En este Documento BREF no se han incluido las fundiciones no férreas que producen productos de metal moldeados, sino que son cubiertas por el Documento BREF sobre Talleres de Forja y Fundiciones. La recogida, clasificación y suministro de materias primas secundarias para la industria se basan en la industria de reciclaje de metales, que de nuevo no se considera en este BREF.

Aunque haya una aparente contradicción en los términos, la producción de ferroaleaciones, que se utilizan principalmente como aleaciones principales en la industria del hierro y el acero, se considera parte de la industria de metales no férreos. Sus elementos de aleación, como metales refractarios, cromo, silicio, manganeso y níquel, son todos metales no férreos.

El sector de los metales preciosos se considera asimismo como parte de la industria de metales no férreos a efectos del presente documento.

1.2.3 Estructura de la industria

La estructura de la industria varía de un metal a otro. No hay ninguna empresa que produzca todos, ni siquiera la mayoría de metales no férreos, aunque hay unas pocas compañías paneuropeas que producen varios metales, como cobre, plomo, zinc, cadmio, etc.

El tamaño de las empresas que producen metales y aleaciones metálicas en Europa va desde unas pocas empresas con más de 5000 empleados hasta gran número de empresas que tienen entre 50 y 200 empleados.

La propiedad varía entre grupos metalúrgicos paneuropeos y nacionales, holdings industriales, empresas públicas y compañías privadas.

1.2.4 Economía de la industria

Las estadísticas clave de la Industria Europea de Metales No Férreos definida a efectos del presente documento son:

Producción	18 - 20 millones de toneladas
Ventas	40.000 - 45.000 millones de €
Empleados	más de 200.000

Muchos metales no férreos refinados son valores internacionales. Los metales principales (aluminio, cobre, plomo, níquel, estaño y zinc) cotizan en uno o dos mercados de futuros, la Bolsa de Metales de Londres y Comex en Nueva York. Los metales denominados colectivamente como ‘menores’ no tienen un mercado central; sus niveles de precios vienen impuestos por productores o por comerciantes que operan en los mercados libres. En la mayoría de aplicaciones, los metales no férreos compiten con otros materiales, en especial las cerámicas, plásticos y otros metales férreos y no férreos.

La rentabilidad de cada metal o grupo de metales, y por lo tanto la viabilidad económica de la industria varía, tanto de forma absoluta como a corto plazo, según el precio actual del metal y una amplia gama de otros factores económicos.

No obstante, se aplica la regla económica general, es decir, que cuanto más se aproxima un material o producto a las condiciones del mercado global y al estado de valor internacional, menor es el beneficio sobre el capital invertido.

Existen pues importantes limitaciones en la disponibilidad de capital para inversiones no productivas en mejoras de protección medioambiental. Estas son normalmente parte del desarrollo y mejora general del proceso. Las inversiones den mejoras medioambientales y de proceso necesitan en general ser competitivas en un entorno global, ya que la industria europea está en competencia con plantas similares en otros países desarrollados o en vías de desarrollo.

1.2.5 Comportamiento medioambiental

Ha habido una mejora constante, y en algunos casos muy significativa, en el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la industria a lo largo de los últimos veinticinco años, desde la adopción de la Directiva 84/360/CEE 'Sobre el Control de la Contaminación de las Plantas Industriales'. El requisito de utilizar las Mejores Técnicas Disponibles para minimizar la contaminación ha sido bien asumido por la industria en la mayoría de Estados miembros.

El nivel de reciclaje de la industria no tiene parangón en ningún otro sector industrial.

1.3 Cobre y sus Aleaciones

1.3.1 Información general

El cobre se ha utilizado a lo largo de muchos siglos; tiene una muy elevada conductividad térmica y eléctrica y es relativamente resistente a la corrosión. El cobre usado puede reciclarse sin pérdida de calidad. Estas propiedades hacen que el cobre se utilice en diversos sectores como ingeniería eléctrica, automoción, construcción, instalaciones sanitarias, maquinaria, construcción naval, aeronáutica e instrumentos de precisión. El cobre se alea frecuentemente con Zn, Sn, Ni, Al y otros metales para formar diversas gamas de latones y bronces [tm 36, Panorama 1997].

La producción de Cu se basa en cátodos de cobre de calidad A, con un 99,95% de Cu. La designación de calidad A viene del vocabulario empleado en la Bolsa de Metales de Londres para cátodos y hace referencia a una norma British Standard. Esta ha sido sustituida recientemente por una Norma CEN Europea - EN 1978, en la que la calidad se designa como Cu CATH1 o, en el nuevo sistema alfanumérico europeo, como CR001A.

Las impurezas máximas tolerables en % son las siguientes:

- Ag 0,0025 - As 0,0005 - Bi 0,00020 - Fe 0,0010 - Pb 0,0005 - S 0,0015 - Sb 0,0004 - Se 0,00020
- Te 0,00020 con As+Cd+Cr+Mn+P+Sb 0,0015
- Bi+Se+Te 0,0003
- Se+Te 0,0003
- Ag+As+Bi+Cd+Co+Cr+Fe+Mn+Ni+P+Pb+S+Sb+Se+Si+Sn+Te+Zn 0,0065

1.3.2 Fuentes de materiales

El cobre refinado se produce a partir de materias primas primarias y secundarias en un número relativamente pequeño de refinerías de cobre: su producto es cátodo de cobre. Este producto se funde, alea y procesa para producir barras, perfiles, hilos, chapas, bandas, tubos, etc. Este paso puede estar integrado con la refinería, pero con frecuencia se realiza en otro centro.

Alrededor del 55% de los suministros de entrada a las refinerías de cobre se compran en el mercado internacional en forma de concentrados de cobre, cobre negro, ánodos o chatarra. El 45% restante procede de concentrados de cobre de procedencia nacional, así como de residuos o chatarra de cobre de origen nacional.

La UE cuenta con pocos recursos de cobre primario, pero sus actividades de metalurgia de cobre tienen gran importancia. La producción minera de cobre de cierta importancia sólo se da en Portugal (inicio de la actividad minera en Neves Corvo en 1989, 106.500 toneladas de cobre en 1997) y en Suecia (86.600 toneladas). Con unas 239.000 toneladas de cobre extraídas de minerales domésticos en 1997, la UE representa alrededor del 2% de la producción minera mundial de cobre.

La capacidad de refinado y de fabricación de semis se ha desarrollado en línea con los requisitos de su gran consumo, utilizando materias primas primarias importadas y chatarra tanto nacional como importada. El acceso a los suministros primarios se ha ido haciendo cada vez más difícil durante los últimos años, ya que los países con minas de cobre han desarrollado sus propias instalaciones de refinado cerca de sus minas, reduciendo con ello la disponibilidad de materias primas en el mercado internacional.

El reciclaje constituye un componente importante de los suministros de materias primas a las instalaciones de refinado y fabricación de cobre. En total, las materias primas secundarias representan alrededor del 45% del uso de cobre y sus aleaciones en Europa, bien en refinerías como la totalidad o parte de su material de entrada, bien utilizadas directamente por los fabricantes de semis.

La calidad de las materias primas secundarias varía enormemente, y muchas fuentes de estos materiales no son adecuadas para uso directo por los fabricantes de semis. Se recurre a la industria de la chatarra para el suministro de material de distintas calidades con la limpieza adecuada para la industria, y aunque hay especificaciones acordadas para chatarra, se registran amplias variaciones. Ello puede hacer necesario el uso de sistemas adicionales de tratamiento o eliminación.

1.3.3 Producción y consumo

La producción anual de cátodo de cobre en el momento de la redacción del presente documento es de 959.000 toneladas de fuentes primarias y de 896.000 toneladas de fuentes secundarias. El berilio no se produce en la UE y no se considera que esté presente en cantidades suficientes en la chatarra para plantear aspectos medioambientales.

Tres de las fundiciones secundarias y casi todas las fundiciones primarias han aumentado su producción. Este considerable aumento en la capacidad de producción se ha realizado simultáneamente con mejoras medioambientales. La chatarra de ordenadores y de placas de circuito impreso se están convirtiendo en fuentes secundarias cada vez más comunes, a pesar de que el contenido en cobre es bajo. La chatarra es pretratada por la industria de chatarra y por algunas fundiciones. Esto proporciona una salida para estos materiales.

El nivel de reciclaje es elevado, ya que el cobre puede ser reprocesado sin pérdida de sus propiedades intrínsecas y hay disponibles muchas materias primas secundarias. La actividad de refinado de cobre en la UE ha podido crecer principalmente gracias a la obtención de materias primas en el mercado internacional y al uso de chatarra de cobre o latón y residuos generados por consumidores y procesadores.

Los fabricantes de semis de cobre de la UE tienen una producción tres veces mayor que la producción de refinado de la UE. Se sirven del mercado internacional para obtener volúmenes adecuados de cobre y latón, junto con materiales de aleación (principalmente zinc, estaño y níquel). Esta parte de la industria es un exportador neto de unas 500.000 toneladas anuales.

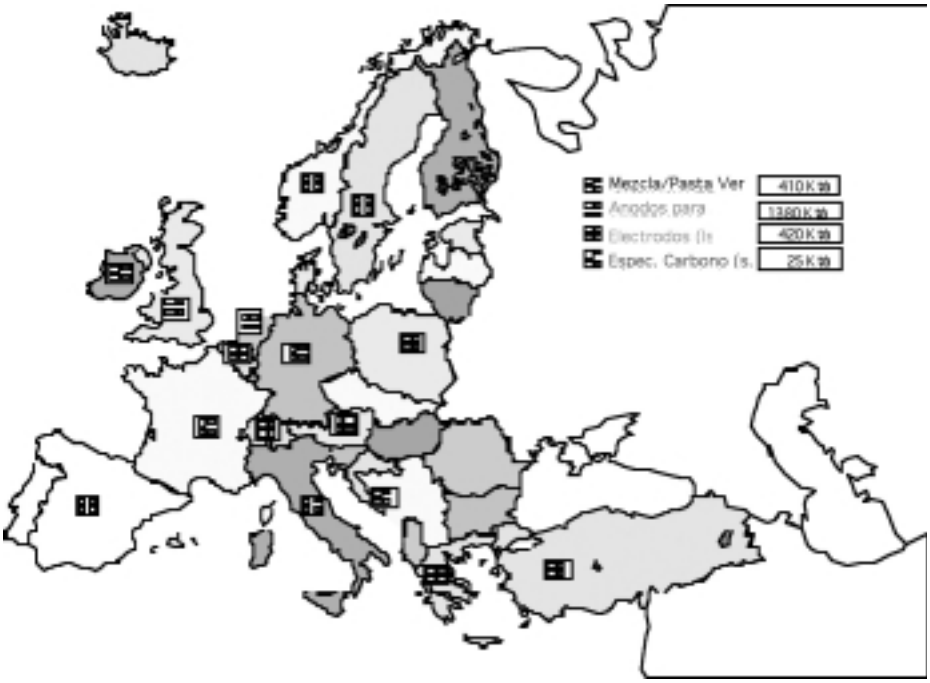


Figura 1.1: Producción mundial de cobre en 1997.

Tabla 1.1: Producción en la UE (y Estados Asociados Europeos) de cobre y sus aleaciones en miles de toneladas en 1997
La producción de mineral en Europa representa ~30% del material de entrada primario.

País	Producción minera	Cátodo primario (ánodo)	Cátodo secundario (ánodo)	Producción de Semis
Alemania		296	378	1.406
Austria			77	58
Bélgica		203 (35)	183 (126)	392
Dinamarca				
España	37	229 (+61)	63 (+28)	268
Finlandia	9	116 (171)		120
Francia		6	29	684
Grecia			81	
Holanda				
Irlanda				
Islandia				
Italia		6	80	990
Luxemburgo				
Noruega	7*	33		
Portugal	108			
Reino Unido	9	58	483	
Suecia	87	95	34	206
Suiza			70	

Notas: * La producción actual de mineral cesará en 2000.

1.3.4 Centros de producción

Hay diez grandes refinerías en la UE. Cinco de ellas utilizan materias primas primarias y secundarias, y las otras utilizan únicamente materias primas secundarias. Se estima que la industria de refinado de cobre empleaba a más de 7.500 personas en 1997. Tres empresas tienen capacidades superiores a las 250.000 toneladas de cátodo de cobre refinado por año: Atlantic Copper (E), Union Minière (B) y Norddeutsche Affinerie (D). Otras cuatro, MKM Hettstedt (D), Hüttenwerke Kayser (D), Boliden (SW) y Outokumpu (FIN), producen cada una más de 100.000 toneladas al año. La capacidad de producción en las otras instalaciones en Italia, España, Austria, Reino Unido y Bélgica están entre 35.000 y 100.000 de cátodo de cobre por año.

Hay muchas más empresas en el sector de fabricación de Semis. Aquí se utiliza cobre refinado y materias primas secundarias de alta calidad como materiales de entrada. En Europa hay unas 100 empresas, que dan empleo a unas 40.000 personas. El sector puede sufrir de un exceso de capacidad y es vulnerable a los movimientos cíclicos en la demanda. La demanda de cobre en la UE sigue el patrón de crecimiento lento de un mercado maduro.

El sector de alambrón eléctrico representa alrededor de la mitad de la producción de semis. Este sector cuenta con unas 20 empresas, que dan empleo a unas 3.000 personas. Una parte significativa de esta actividad está ligada al sector del cable como fuente integral de material de entrada (Alcatel, Pirelli, BICC etc.), mientras otra parte está vinculada al sector de refinería como fuente integral de material de salida (Deutsche Giessdraht, Norddeutsche Affinerie, Union Minière, Atlantic Copper etc.).

Hay muchas más empresas en la otra industria de fabricación de semis de cobre, que producen varillas, barras, hilos, perfiles, tubos, planchas, chapa y bandas de cobre y de aleaciones de cobre: en la UE hay unas 80 empresas que emplean a unas 35.000 personas. No obstante, el sector está dominado por tres grandes grupos: KME-Europa Metal (D), con actividades de fabricación principales en Francia, Alemania, Italia y España; Outokumpu (FIN) en Finlandia, Suecia, Holanda y España; y Wieland Werke (D) en Alemania. Otras importantes empresas independientes son Boliden (S), con plantas en Suecia, Holanda, Bélgica y el Reino Unido, Carlo Gnutti (I), e IMI (UK).

Durante las dos últimas décadas ha habido una considerable racionalización y consiguiente realización de inversiones en la industria del cobre en Europa. Esto ha sido en respuesta a la creación del mercado único en la UE y a presiones económicas, como el aumento de los costes energéticos, la necesidad de una inversión sustancial en la eliminación de la contaminación y a los cambios frecuentes en los tipos de cambio.

1.3.5. Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de cobre de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen un 98,9% de fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de cobre secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

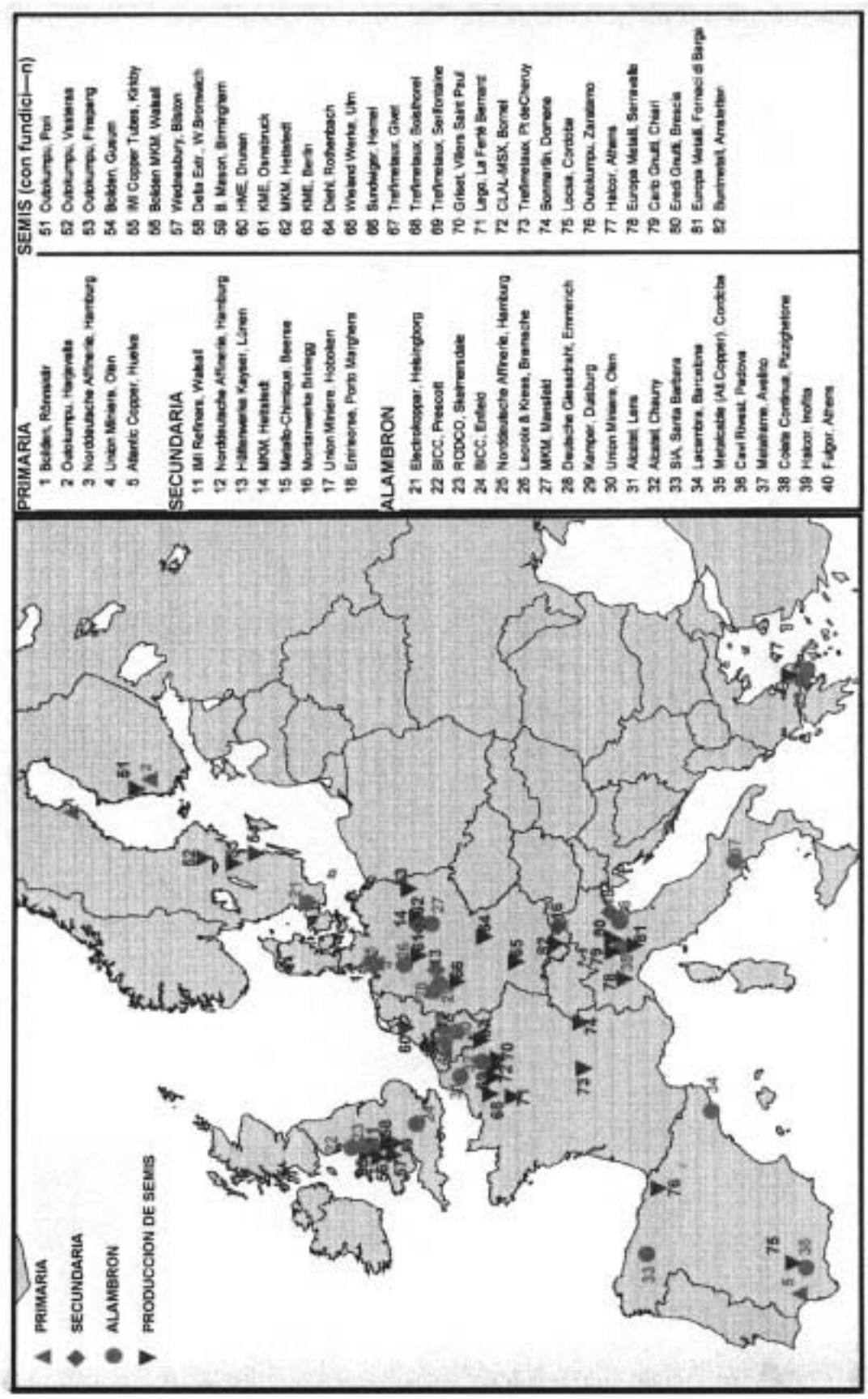


Figura 1.2: Centros de Producción Europeos.

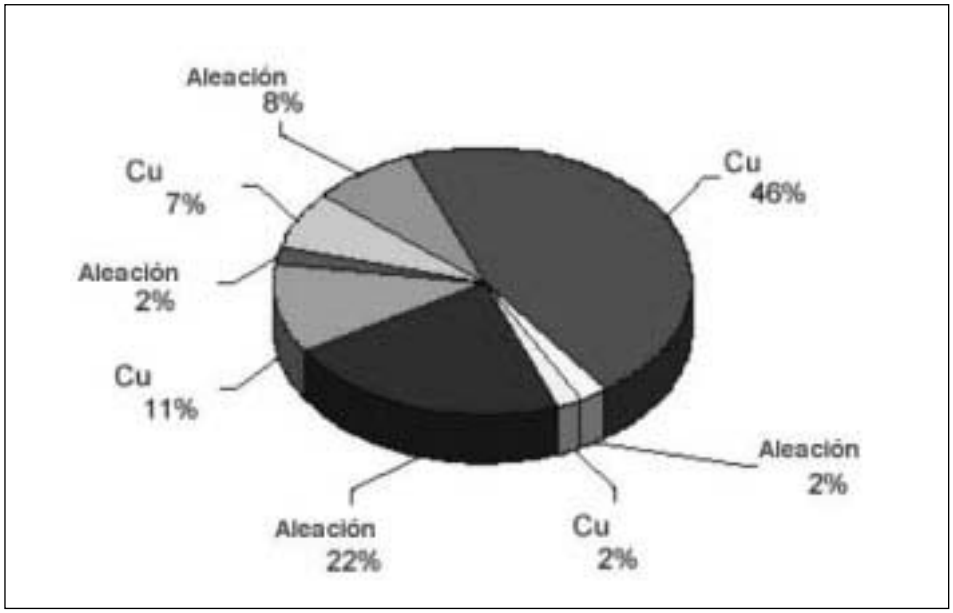


Figura 1.3: Producción de Semis de Cobre en 1995. Total 1995 = 4.700.000 toneladas.

Las emisiones fugitivas o no capturadas son también un tema que está adquiriendo importancia para la producción primaria y secundaria. Se requiere un cuidadoso diseño de plantas y procesos para capturar los gases de proceso.

El control de emisiones al aire y el agua derivadas de la producción de hilo-barra de cobre y de semis de cobre y de aleación de cobre está bien desarrollado. El control de emisiones de monóxido de carbono de los hornos de cuba, especialmente los que operan en condiciones reductoras, se consigue mediante la optimización de los quemadores.

El reciclaje constituye un importante componente de los suministro de materias primas de las instalaciones de refinado y fabricación de cobre. El cobre puede recuperarse de la mayor parte de sus aplicaciones y devolverse al proceso de producción sin pérdida de calidad en el reciclaje. Al disponer de un acceso muy limitado a fuentes primarias propias de cobre, la industria de la UE ha prestado tradicionalmente mucha atención a las denominadas “minas de superficie”, que se basan en gran medida en la chatarra para reducir el gran déficit de su balanza comercial de materias primas de cobre.

Casi el 100% de la chatarra de cobre nueva o procesada se recicla, y según algunos estudios se ha estimado que el 95% de la chatarra de cobre antigua que se halla disponible es también reciclada.

Globalmente, las materias primas secundarias representan la producción de alrededor del 45% del cobre de la UE, pero en algunos casos, como las varillas de latón, el producto se fabrica por completo a partir de cobre y latón reciclados, con tan sólo un pequeño aporte de zinc primario.

La industria del cobre de la UE ha desarrollado tecnologías avanzadas y ha realizado considerables inversiones para poder procesar una amplia gama de chatarra de cobre, incluidos residuos complejos de baja calidad, y para cumplir al mismo tiempo con limitaciones medioambientales cada vez más restrictivas.

La capacidad de la industria para aumentar su índice de reciclaje depende de una serie de factores complejos.

1.4 Aluminio

1.4.1 Información General

El aluminio [tm 36, Panorama 1997] es un material con una amplia gama de aplicaciones, en las industrias del transporte, la construcción y el envasado, el sector eléctrico, en todos los sistemas de distribución de electricidad de alta tensión, electrodomésticos, y en los sectores mecánico y agrícola. Es ligero, tiene una buena conductividad eléctrica y forma una capa de óxido superficial cuando se expone al aire que impide una mayor corrosión. El aluminio es muy reactivo, particularmente en forma de polvo, y se utiliza en reacciones aluminotérmicas para producir una serie de otros metales.

La industria del aluminio es la más joven y la mayor de las industrias de metales no férreos, la fundición de aluminio comenzó hace tan sólo un siglo. La industria del aluminio de la UE da empleo directo a unas 200.000 personas, y su facturación anual es del orden de 25.000 millones de €. La producción total de metal sin forjar ascendió a 3,9 millones de toneladas en 1997. Alrededor del 43% de esta producción procesa chatarra reciclada, un porcentaje en constante aumento.

1.4.2 Fuentes de materiales

El aluminio primario de produce a partir de bauxita y se convierte en alúmina. 100 toneladas de bauxita producen 40 - 50 toneladas de alúmina (óxido de aluminio), que a su vez producen 20 - 25 toneladas de aluminio. La mayor parte de la bauxita se obtiene en minas fuera de Europa, pero hay varias instalaciones de producción de alúmina en Europa.

La industria secundaria depende de las fuentes de chatarra. La chatarra puede clasificarse en "Chatarra Nueva", que se genera durante la producción y fabricación de productos forjados y moldeados, o "Chatarra Antigua", que se recupera de artículos al término de su vida útil. El índice de reciclaje de "Chatarra Nueva" es del 100% de la cantidad producida. El suministro de materias primas a la industria primaria y secundaria de la UE es atendido principalmente por la producción interna de alúmina y el reciclaje de chatarra. No obstante, la producción total de metal no logra cubrir las necesidades de la industria de proceso y en la actualidad cubre sólo un 55% de la demanda de la UE.

1.4.3 Producción y consumo

La industria europea del aluminio incluye minería y producción de alúmina, fundición primaria y secundaria y proceso del metal en productos semiacabados (ej. barras, perfiles, hilos, chapas, láminas, tubos, conductos) o productos especializados (ej. polvos, aleaciones especiales).

Tabla 1.2. Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas)

Zona	Producción	Consumo
Europa	3.216	5.603
EE.UU.	3.603	5.390
Rusia	2.907	509
Canadá	2.327	642
China	1.776	2.013
Australia	1.495	362
Brasil	1.189	479
Venezuela	643	193

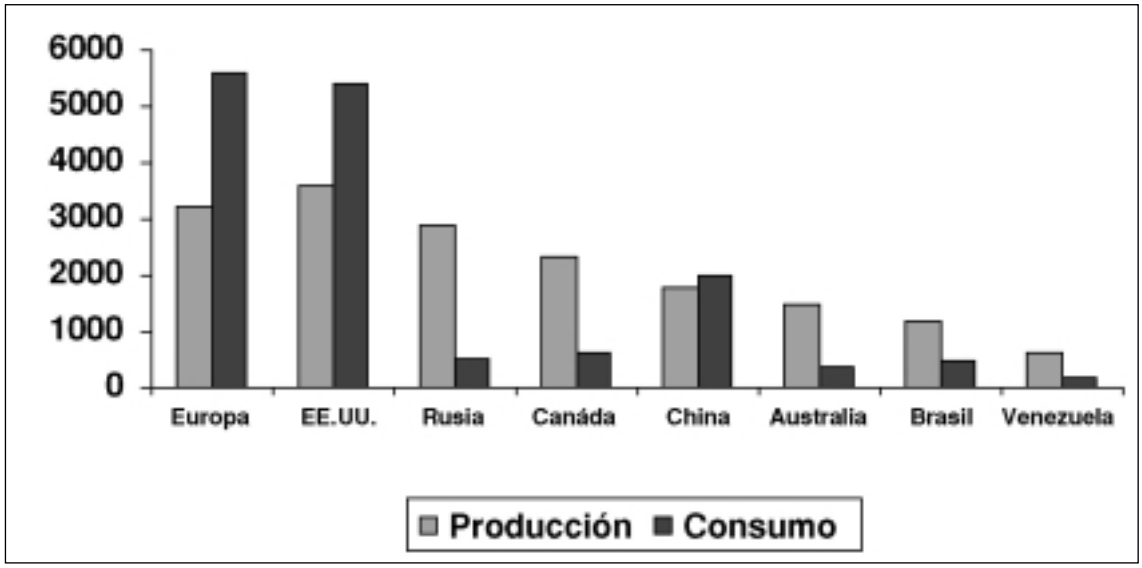


Figura 1.4: Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas).

Muchas de estas actividades están integradas, aunque una serie de fabricantes de la UE centran su actividad sólo en un segmento particular, como el reciclaje y la fundición secundaria o la fabricación de semis.

La UE representó el 10% de la producción mundial total en 1997. La producción de aluminio a partir de materias primas secundarias en la UE es una de las mayores del mundo, con 1,7 millones de toneladas en 1997, lo que representa el 23% de la producción de materiales reciclados de los países occidentales.

1.4.4. Centros de producción

Al principio de 1998, en la UE operaban veintidós fundiciones primarias de aluminio, y otros 8 en los estados europeos asociados. El número de empresas productoras es, de hecho, mucho menor: las principales son Aluminium Pechiney (F), VAW aluminium (D), Alcoa España (E), Alcoa Italia (I), Hoogovens (NL), British Alcan (UK), Hydro (N) y Alusuisse (CH). Algunas de estas empresas explotan plantas en distintos países europeos o tienen filiales o sucursales en otras partes del mundo, o son parte de grupos multinacionales.

El número de empresas involucradas en la producción secundaria de aluminio es mucho mayor. Existen unas 200 empresas cuya producción anual de aluminio secundario es de más de 1000 toneladas al año [tm 116, Alfed 1998]. Hay una buena integración de la actividad de laminación en los procesos de producción, aunque la industria de la extrusión está mucho menos integrada, con unos 200 centros de producción diseminados por el territorio de la UE.

Tabla 1.3: Producción europea de aluminio en 1997

País	**Producción de Bauxita** en miles de toneladas	**Producción de Aluminio** en miles de toneladas	**Aluminio Primario** en miles de toneladas	**Aluminio Secundario** en miles de toneladas	**Producción de Semis**
Alemania		750	572	433	1.797
Austria				98	189
Bélgica					353
Dinamarca				14	18
España		1.110	360	154	330
Finlandia				33	35
Francia		600	399	233	741
Grecia	2.211	640	133	10	213
Holanda			232	150	200
Irlanda		1.250			
Islandia			123		
Italia		880	188	443	862
Luxemburgo					
Noruega			919	59	250
Portugal				3	
Reino Unido		120	248	257	507
Suiza			27	6	131
Suecia			98	26	131
Total Europa	2.211	5.350	3.216	1.803	5.757

1.4.5 Aspectos medioambientales

Los principales aspectos medioambientales de la producción de aluminio primario son la producción de hidrocarburos polifluorados y fluoruros durante la electrólisis, la producción de residuos sólidos de las células y la producción de residuos sólidos durante la producción de alúmina. De forma similar, para la producción de aluminio secundario existen posibles emisiones de polvo y dioxinas de hornos mal mantenidos o con mala combustión, así como la producción de residuos sólidos (escoria salina, revestimientos de hornos consumidos, escorias y polvo de filtros). La industria ha hecho progresos en la reducción de estas emisiones. En los últimos quince años se han reducido en un factor entre cuatro y diez, según el tipo de emisión y el proceso empleado.

El principal coste de la producción de aluminio primario es la electricidad, por lo que la producción tiende a concentrarse en lugares donde hay disponible electricidad a bajo coste, lo que influye en la distribución de los centros. La industria europea del aluminio ha realizado esfuerzos considerables por reducir su consumo de electricidad, rebajándolo desde 17 kWh por kg producido en 1980 a 15 kWh por kg en 1998. La producción y refinado de aluminio secundario requiere mucha menos energía y consume menos del 5% de la energía necesaria para producir aluminio primario.

Existen muchas iniciativas para mejorar la reutilización de la chatarra de aluminio, y la industria tiene un papel activo en este campo. El reciclaje de latas de bebidas usadas (LBUs) es un ejemplo de ello. El material recogido se recicla en un circuito cerrado para producir más latas de bebidas con la misma especificación de aleación. La industria secundaria presta mucha atención a producir la correcta composición de aleación, y la clasificación previa de los tipos de chatarras es importante. Un ejemplo de ello es la segregación de la chatarra de extrusión para preservar la aleación particular.

1.5 Zinc, Plomo y Cadmio

1.5.1 Zinc

1.5.1.1 Información General

El zinc [tm 36, Panorama 1997; tm 120, TU Aachen 1998] es el tercer metal no férreo más utilizado, después del aluminio y el cobre. Tiene un punto de fusión relativamente bajo y se utiliza en la producción de una serie de aleaciones, como el latón. Puede aplicarse fácilmente en la superficie de otros metales como el acero (galvanización), y cuando se utiliza como recubrimiento metálico, el zinc se corroe preferentemente como recubrimiento de sacrificio. El zinc se utiliza asimismo en las industrias farmacéutica, alimenticia, de la construcción, de pilas y baterías y química.

Tabla 1.4: Usos del zinc en el Mundo y en Europa

Uso comercial del zinc	Mundo 1975 [%]	Mundo 1984 [%]	Mundo 2005 [%]	Europa 1995 [%]
Galvanización	38.0	48.5	54.8	43
Latón	19.8	17.6	16.6	23
Colada a presión	18.3	14.3	10.5	13
Productos semiacabados	8.5	7.3	6.4	12
Productos químicos	12.7	9.6	8.0	8
Otros	2.8	2.7	3.7	1

El zinc se suministra al mercado en diversas calidades, la calidad más alta es la calidad especial (SGH) o Z1, que contiene un 99.995% zinc, mientras que la calidad más baja es la calidad ordinaria (GOB) o Z5, con una pureza de alrededor del 98%. Se fabrican productos de extrusión, como barras, varillas e hilos (principalmente de latón); productos laminados como láminas y bandas; aleaciones moldeadas; y polvos y compuestos químicos, como óxidos.

Entre los usos finales hay una amplia gama de aplicaciones, la más importante de las cuales es la protección del acero contra la oxidación en los sectores de automoción, electrodomésticos y construcción. Las aleaciones de zinc (ej. latón, bronce, aleaciones de moldeo a presión) y los semis de zinc son respectivamente la segunda y tercera áreas principales de consumo, con aplicaciones también en los sectores de construcción, electrodomésticos y automoción.

Tabla 1.5: Calidades de zinc primario.

Clasificación de Calidades	Código de Color	Contenido Nominal de Zinc	1 Pb máx.	2 Cd* máx.	3 Fe máx.	4 Sn máx.	5 Cu máx.	6 Al máx.	Total de 1 a 6 máx.
Z1	blanco	99,995	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005
Z2	amarillo	99,99	0,005	0,005	0,003	0,001	0,002	–	0,01
Z3	verde	99,95	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	–	0,05
Z4	azul	99,5	0,45	0,01	0,05	–	–	–	0,5
Z5	negro	98,5	1,4	0,01	0,05	–	–	–	1,5

Notas:
* Durante un periodo de cinco años a partir de la fecha de ratificación de este estándar, el contenido máximo de Cd de las calidades Z3, Z4 y Z5 será de 0,020, 0,050 y 0,050 respectivamente.

Tabla 1.6: Calidades de zinc secundario.

Calidad	Contenido Nominal	1 Pb de Zinc	2 Cd máx.	3 Fe máx.	4 Sn máx.	5 Cu máx.	6 Al máx.	Total de 1 a 6 máx.	Comentarios
ZS1	98,5	1,4	0,05	0,05	*)	…	…	1,5**)	Calidades producidas
ZS2	98	1,6	0,07	0,12	*)	–	–	2,0**)	principalmente por
ZS3	97,75	1,7	0,09	0,17	–	–	–	2,25	reciclado de chatarra y productos usados.
ZSA	98,5	1,3	0,02	0,05	–	–	–	1,5	Calidad compuesta principalmente de Zn con residuos, cenizas.

Notas:

*) Sn máx 0,3% para producción de latón, 0,7% para galvanización. Cuando está presente a estos niveles, el contenido real de Zn puede ser menor que el contenido nominal.

**) Excluido Sn cuando está presente a los niveles indicados en *).

1.5.1.2 Fuentes de materiales

El metal se produce a partir de una gama de concentrados de zinc por procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Algunos concentrados contienen elevadas proporciones de plomo, y este metal también se recupera. El zinc también se asocia con el cadmio, y los concentrados son una fuente de este metal.

Los concentrados de la UE solían cubrir más del 45% de los requisitos de las refinerías hace 10 años, pero ahora representan sólo menos del 25% de los mismos. El déficit se compensa con un aumento de las importaciones, ya que la capacidad de producción minera está aumentando actualmente en Norteamérica, Australia y algunos países de Sudamérica.

Las materias primas secundarias como residuos de galvanización (cenizas, escorias superficiales, lodos, etc.), el polvo de combustión de las plantas de acero y la chatarra de proceso de latón y de moldeo a presión son también fuentes de zinc. La producción de metal de fuentes secundarias supuso más del 8% de la producción total de zinc refinado en la UE en 1994. El reciclaje de zinc y de productos que contienen zinc es un tema clave para la industria.

1.5.1.3 Producción y consumo

La producción minera de la UE se realiza principalmente en Irlanda y España y fue de 383.000 toneladas de concentrados de zinc en 1994. Este valor supuso una reducción desde las 397.000 toneladas en 1993, debido al agotamiento de las reservas y a la menor calidad de los minerales de algunas explotaciones mineras. La producción de metal retrocedió por debajo de 1,8 millones de toneladas, valor que se había sobrepasado en 1992, mientras que el consumo de zinc refinado aumentó desde 1.640.000 toneladas a 1.770.000 toneladas, lo que representa el 30% de la demanda de zinc en los países de economía de mercado.

La UE es el líder mundial en la producción de zinc, muy por delante de Canadá y Japón, que están en segundo y tercer lugar respectivamente. En 1994, la producción de la UE fue de 1.749.000 toneladas de metal, lo que representó casi un 33% del total de los países con economía de mercado, que fue de 5.376.000 toneladas. La UE es también la zona de mayor consumo de zinc entre los países con economía de mercado. Las 1.770.000 toneladas de zinc consumidas en 1994 superaban en un 49% al segundo mercado de consumo (EE.UU.) y en un 145% al tercero (Japón).

Tabla 1.7: Producción de concentrados de zinc [tm 36, Panorama 1997]

País	Producción en 1992 (en miles de toneladas)	Producción en 1993 (en miles de toneladas)	Producción en 1994 (en miles de toneladas)
Canadá	1.325	1.004	1.008
Australia	1.014	1.007	928
Perú	626	668	682
EE.UU.	551	513	601
Unión Europea	500	411	383

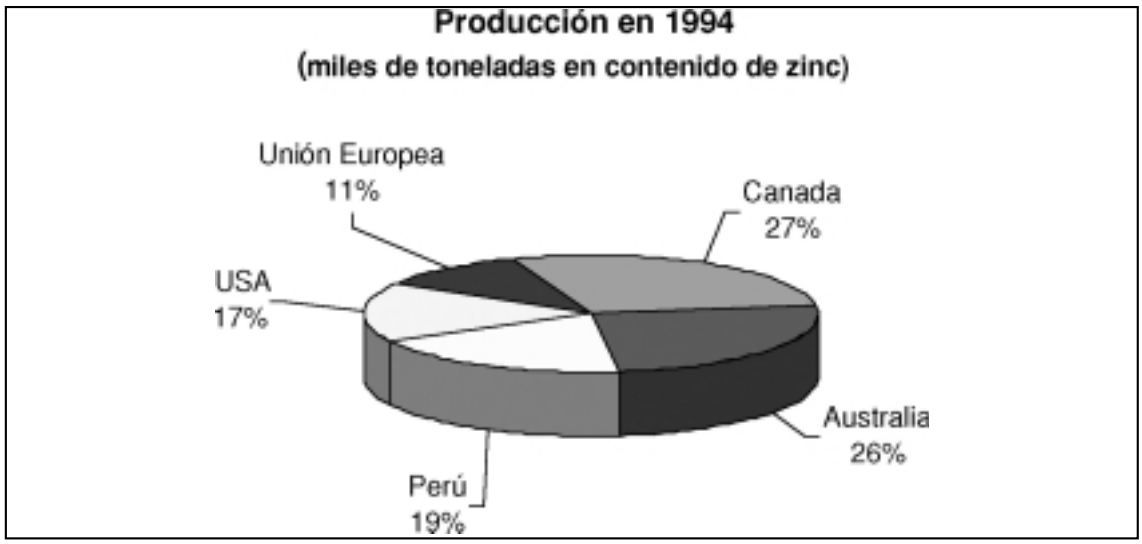


Figura 1.5: Producción mundial de zinc a partir de concentrados en 1994.

Tabla 1.8: Producción de zinc refinado

País	Producción en 1992 (en miles de toneladas)	Producción en 1993 (en miles de toneladas)	Producción en 1994 (en miles de toneladas)
Unión Europea	1.844	1.819	1.749
Canadá	672	662	693
Japón	729	696	666
EE.UU.	400	382	356
Australia	333	317	318
CSI		431	390

1.5.1.4 Centros de producción

El zinc se produce mediante los procesos de tostación, lixiviación y electro-recuperación en el proceso de destilación con Horno de Fundición Imperial. Las siguientes tablas muestran el emplazamiento y las capacidades de los centros en la UE.

Tabla 1.9: Principales productores europeos en capacidad anual, 1994

País	Empresa	Emplazamiento	Proceso	Capacidad [t/a]
Bélgica	Union Minière	Balen-Wezel	E	200000
Alemania	Ruhr-Zink	Datteln	E	96000
	MIM Hüttenwerke Duisburg	Duisburg-Wanheim	HFI-RC	100000
	Metaleurop Weser Zink	Nordenham	E	130000
España	Asturiana de Zinc	Sun Juan de Nieva	E	320000
	Española del Zinc	Cartagena	E	60000
Francia	Union Minière Francia	Auby	E	220000
	Metaleurop	Noyelles Godault	HFI-RC	100000
Finlandia	Outokumpu Zinc Oy	Kokkola	E	175000
Italia	Enirisorse	Porte Vesme (Sardegna)	HFI-RC	75000
		Porte Vesme (Sardegna)	E	100000
	Pertusola Sud	Crotone (Calabria)	E	80000
Holanda	Budelco (Pasminco)	Budel-Dorplein	E	210000
Noruega	Norzink		E	140000
Reino Unido	Britannia Zinc (MIM Holdings)	Avonmouth	HFI-RC	105000

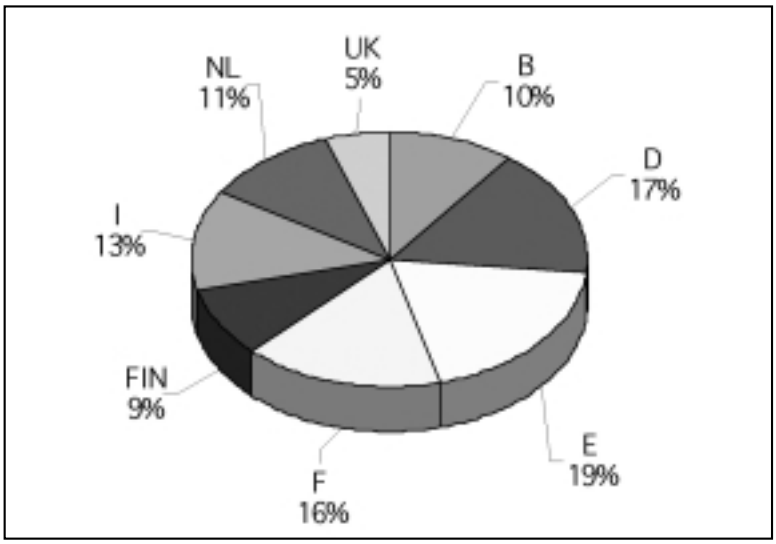


Figura 1.6: Producción de zinc metal en la UE (1994).

1.5.1.5 Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de zinc de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen una elevada fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

La lixiviación del calcinado y otros materiales produce una solución que contiene hierro. La eliminación del hierro produce importantes cantidades de residuo sólido que contiene una serie de metales. El desecho de este residuo debe hacerse con un estándar muy elevado de contención y control.

Las emisiones fugitivas de la tostación y calcinación son también muy importantes y deben considerarse para todas las etapas del proceso. Las emisiones fugitivas y nieblas ácidas de la electro-recuperación de zinc son un ejemplo particular de ello.

El zinc y los productos que lo contienen pueden reciclarse en gran medida. Las estimaciones basadas en el consumo histórico y los ciclos vida de los productos indican que se ha alcanzado un índice de recuperación del 80% del zinc recuperable. El sistema de reciclaje del zinc está muy avanzado, no sólo como zinc metal, sino también en distintas formas.

1.5.2 Plomo

1.5.2.1 Información General

El plomo [tm 36, Panorama 1997] es el metal pesado más abundante en la corteza terrestre, y se ha utilizado desde hace muchos siglos. Se encuentra en forma de minerales de galena pura o actualmente más en minerales mixtos en los que está asociado con zinc y pequeñas cantidades de plata y cobre. El plomo es un metal blando, tiene un bajo punto de fusión y es resistente a la corrosión. Estas propiedades le dan un gran valor funcional, tanto en su forma pura como en aleaciones y compuestos.

El plomo se clasifica en términos de la composición del producto. La tabla siguiente muestra la composición química del plomo de acuerdo con la nueva Norma Europea.

Tabla 1.10: Calidades de plomo

Calidad desig-nación	Pb mín.	1 Bi máx.	2 Ag máx.	3 Cu máx.	4 Zn máx.	5 Ni máx.	6 Cd máx.	7 Sb máx.	8 Sn máx.	9 As máx.	Total de 1 al 9 máx.
PB 990	99,990	0,010	0,0015	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,010
PB 985	99,985	0,015	0,0025	0,0010	0,0002	0,0005	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,015
PB 970	99,970	0,030	0,0050	0,0030	0,0005	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,030
PB 940	99,940	0,060	0,0080	0,0050	0,0005	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,060

Notas: La norma alemana DIN 1719 es la base de la nueva Norma Europea EN 12659,

Ha habido grandes cambios en la forma de uso del plomo. La industria de las baterías crea alrededor del 70% de la demanda y es bastante estable, pero otros usos del plomo, como los pigmentos y compuestos, la protección contra la radiación, los productos laminados y de extrusión para el sector de la construcción, el blindaje de cables, los proyectiles o los aditivos para la gasolina, están en declive.

Tabla 1.11: Usos del plomo en el mundo

Uso comercial	1973 %	1983 %	1993 %	1994 %
Baterías	38	48	56	59
Productos químicos	24	27	22	22
Productos semiacabados y moldeo	17	17	16	16
Cables	15	5	2.5	2.0
Aleaciones	2	3	1.1	0.8
Otros	4	–	1.6	0.2

1.5.2.2 Fuentes de materiales

El plomo refinado se deriva del material primario en forma de minerales y concentrados de plomo, y de materiales secundarios en forma de chatarra y residuos. La producción primaria requiere la fusión de minerales que contienen plomo para producir un lingote de plomo que luego se refina. La economía de la producción de mineral de plomo primario está ligada al contenido de planta y zinc de los minerales. La producción del plomo metal requiere el tratamiento del contenido de azufre de los minerales a tratar para producir ácido sulfúrico. La mayoría de fundiciones primarias de plomo llevan asociado un proceso de refinado complejo, así como procesos asociados para recuperar el contenido de plata en forma de una aleación de Ag-Au. El refinado primario está por consiguiente ligado a la economía de la extracción de minerales de plomo-zinc. El contenido en zinc y plata de los minerales es la principal fuente de beneficios.

La UE dispone de escasos recursos mineros de plomo, pero la producción de plomo es una industria grande e importante. Durante los últimos diez años, el consumo y la producción de la UE han experimentado sólo un crecimiento modesto, lo que ha producido una reducción de la cuota de la UE en los mercados mundiales.

La industria de refinado secundario suministra en la actualidad más del 50% del plomo consumido. Las baterías ácidas de plomo de los automóviles son la principal fuente de chatarra para el refinado secundario. La industria realiza pasos decididos para alentar el reciclaje de estas baterías, por lo que este porcentaje aumenta a medida que aumenta el parque automovilístico mundial y aumenta el índice de reciclaje de baterías antiguas. La producción secundaria puede también requerir instalaciones de refinado si las materias primas secundarias contienen compuestos indeseados.

1.5.2.3 Producción y consumo

La producción de plomo de la UE es alta, ocupando el primer lugar entre los países con economía de mercado con 1.398.000 toneladas en 1994, de las que un 52% se produjeron a partir de materias primas secundarias. La industria responde a la preocupación medioambiental recuperando cantidades cada vez mayores de plomo, por lo que la producción primaria decae progresivamente.

La UE es el territorio de mayor producción de plomo en todo el mundo, por delante de Estados Unidos. En 1994, estas dos regiones representaron el 59% de la producción total refinada de los países con economía de mercado, que fue de 4,5 millones de toneladas. El Reino Unido, Alemania, Francia e Italia son los principales productores y, en promedio, el 49% de su producción se basa en materias primas secundarias. La media de la UE del 52% en este aspecto es considerablemente inferior al 72% de los EE.UU., que es la más alta del mundo, pero se mantiene bastante por encima de cualquier otro país de economía de mercado.

La UE es segunda tras Estados Unidos en cuanto a consumo, representando el 28% del consumo de plomo de los países con economía de mercado en 1994, mientras que la cuota de EE.UU. está cercana al 30%. Los cuatro principales Estados miembros productores de la UE son también el principal mercado de consumo.

1.5.2.4 Centros de producción

Dentro de la UE hay 7 grandes fundiciones/refinerías cuya capacidad de producción está entre 40.000 y 245.000 toneladas anuales. Las principales refinerías son principalmente multinacionales y se encuentran distribuidas en el Reino Unido (Britannia refined metals), Francia (Metaleurop), Alemania (Ecobat, Metaleurop), Bélgica (Union Minière) e Italia

(Enirisorse). Todas las plantas funden concentrado de plomo o de plomo/zinc antes de refinar lingotes de plomo, y también refinan lingotes brutos de otras fuentes para recuperar los metales preciosos. Britannia refined metals refina asimismo lingotes brutos de plomo importados de su casa matriz MIM en Australia. Con la excepción de Union Minière, todas estas refinerías primarias realizan asimismo reciclaje/refinado secundario.

La industria secundaria se caracteriza por un gran número de pequeñas refinerías, muchas de las cuales son independientes. En la UE hay unas treinta fundiciones/refinerías con producciones entre 5.000 y 65.000 toneladas anuales. Reciclan y refinan chatarra generada en su región local. El número de estas refinerías se está reduciendo, ya que las grandes compañías multinacionales, así como los principales grupos fabricantes de baterías, adquieren las instalaciones secundarias de menor tamaño o abren sus propias instalaciones nuevas de reciclaje.

Tabla 1.12: Capacidades anuales de los procesos de plomo en Europa.

País	Capacidad anual de altos hornos de plomo* t/a	Capacidad anual de fundición directa* t/a	Capacidad anual hornos rotatorios secundarios t/a	Capacidad total de refinado de plomo t/a
Austria			32.000	32.000
Bélgica	115.000		20.000	175.000
Francia	110.000		162.000	299.000
Alemania	35.000	220.000	130.000	507.000
Grecia			12.000	12.000
Italia		90.000	125.000	235.000
Holanda		20.000	20.000	
España	14.000		62.000	76.000
Suecia	50.000	65.000		155.000
Reino Unido		40.000 (capacidad de refinado 200.000 t/a)	107.000	307.000

Notas:
* Materias primas primarias y/o secundarias.

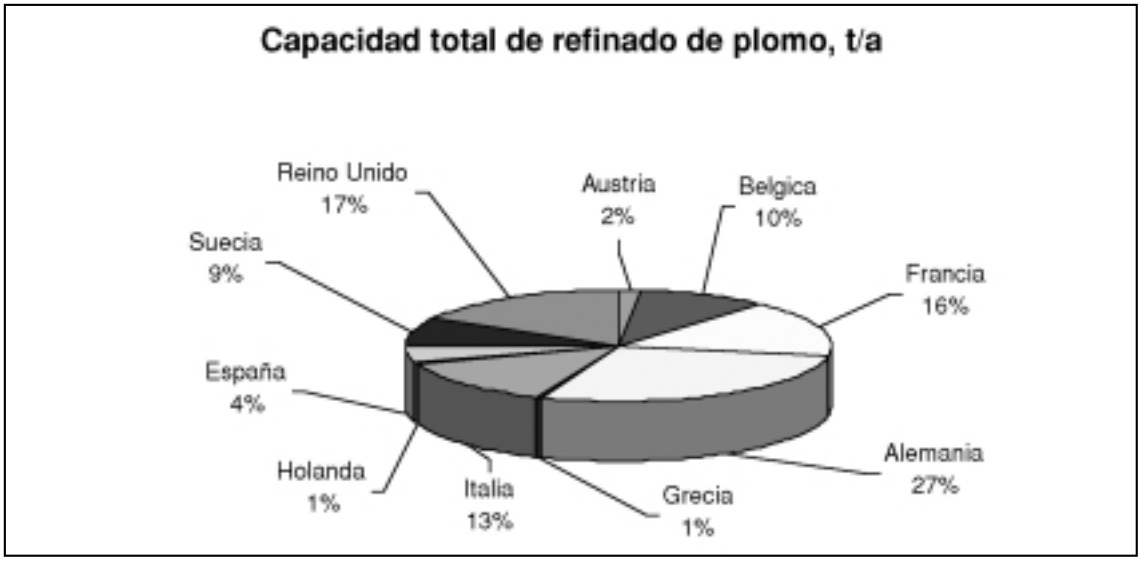


Figura 1.7: Capacidad de refinado de plomo en Europa.

1.5.2.5 Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de plomo de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen una elevada fijación de azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de plomo secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

El plomo es objeto de gran preocupación medioambiental y muchos compuestos de plomo están clasificados como tóxicos. Normalmente, la política general es restringir las emisiones a los mínimos niveles practicables dado el estado de la tecnología, procediéndose al reciclaje cuando es apropiado y económico. La mayoría de medidas de control tienen por misión reducir la exposición humana (las emisiones de plomo afectan mucho a las personas), aunque hay ciertos casos en los que los animales pueden estar expuestos al plomo en el medio ambiente.

La legislación medioambiental requiere inversiones para reducir las emisiones atmosféricas con plomo. En años recientes se han desarrollado y aplicado nuevas tecnologías que ofrecen métodos más eficaces para la fundición de concentrados de plomo. Estos procesos han reducido asimismo las emisiones al medio ambiente. Los procesos existentes se han mejorado utilizando modernos sistemas de control y eliminación.

Las baterías, que suponían el 52% del consumo de plomo en la UE en 1994, se reciclan con una eficacia de más del 90%.

Los reglamentos relativos al plomo se dividen en tres categorías principales: exposición laboral, emisiones (calidad del aire ambiente) y controles en el agua y productos alimentarios. La exposición laboral se trata en la Directiva de la UE 82/605/CEE del 28 de julio de 1992, sobre la protección de los trabajadores respecto a los riesgos de relacionados con la exposición al plomo metálico y a sus compuestos iónicos en el trabajo. Esta directiva establece límites al nivel de plomo en el aire en el lugar de trabajo y en ciertos indicadores biológicos que reflejan el nivel de exposición de los trabajadores. Los valores límite se complementan con reglamentos sobre la protección del personal, que regulan el uso de equipos de protección, máscaras e instalaciones de lavado, o reglamentos específicos sobre alimentos, bebidas, tabaco, etc.

El plomo en la atmósfera general está limitado por la directiva 82/844/CEE del 3 de diciembre de 1982, que establece un límite a los niveles de plomo en el aire en toda la UE. Estos valores límite están siendo objeto de revisión en la actualidad. Los niveles de plomo en el agua se controlan asimismo en una serie de directivas relativas al agua atendiendo a su tipo y uso, como agua destinada al consumo humano, agua para instalaciones sanitarias, aguas de pesca, etc.

1.5.3 Cadmio

1.5.3.1 Información General

El cadmio pertenece al subgrupo del zinc en la tabla periódica de los elementos y fue descubierto por Strohmeyer in 1817 durante una investigación con $ZnCO_3$. Está asociado con el zinc en minerales en una relación Cd:Zn de 1:200. Físicamente es similar al zinc pero es más

denso, blando y puede pulirse. A diferencia del zinc, es también resistente a los álcalis. El cadmio es un buen absorbente de neutrones y por consiguiente se emplea con frecuencia en reactores nucleares.

En sus compuestos tiene un estado de oxidación de 2^+. El cadmio se encuentra ampliamente distribuido en el mundo, con una concentración entre 0,1 y 1 ppm en la capa vegetal superior.

1.5.3.2 Fuentes de materiales

Sólo hay unos pocos minerales de cadmio, como la Greenockita (CdS) o la Otavita ($CdCO_3$), o el mineral de CdO. Ninguno de estos minerales es importante desde el punto de vista industrial. Los minerales de zinc, que contiene cadmio como componente isomórfico a concentraciones de alrededor del 0,2% tienen importancia económica para la recuperación del cadmio. Además, los minerales de plomo y de cobre pueden contener pequeñas cantidades de cadmio.

1.5.3.3 Producción y consumo

A diferencia de otros metales pesados, el cadmio ha sido refinado y utilizado en épocas relativamente recientes; su producción y uso han aumentado sólo durante los últimos 40 - 50 años. Sus principales usos hoy son:

- recubrimientos de cadmio por electroplastia,
- pilas de níquel-cadmio,
- algunos pigmentos y estabilizantes para plásticos,
- aleaciones para soldadura, en protección antiincendios, para barras de control en reactores nucleares, para conductores eléctricos.

Se utilizan pequeñas cantidades para paneles solares.

Desde 1970, la producción de cadmio en occidente se ha mantenido bastante constante entre 12.000 y 16.000 t/a. La producción mundial es de unas 20.000 t/a. El uso de cadmio en diversas aplicaciones ha variado desde 1970 y se ha visto afectado por factores técnicos, económicos y medioambientales. Esto ha influido en los precios del metal. Los precios del metal en los setenta alcanzaron los 3 $USA/lb, y en los ochenta oscilaron entre 1,1 y 6,9 $USA/lb. Desde entonces, el precio del cadmio cayó hasta 1 $USA/lb, bajando incluso hasta 0,45 $USA/lb, lo que equivale al nivel de precios del zinc.

Los principales países productores y consumidores se muestran en la tabla 1.13:

Tabla 1.13: Principales productores y consumidores de cadmio en 1996

País	Producción t/a	Consumo t/a
Canadá	2.832	107
Japón	2.357	6.527
Bélgica	1.579	2.017
RP China	1.300	600
Estados Unidos	1.238	1.701
Alemania	1.145	750
Finlandia	600	-
Francia	205	1.276

El cadmio se recupera:

- De la recuperación pirometalúrgica de Pb-Cu en el polvo de combustión de la operación de fundición.
- De la recuperación pirometalúrgica de Pb-Zn en el polvo de combustión de las operaciones de sinterización / tostación y del zinc bruto.

Los polvos de combustión se lixivian generalmente con H_2SO_4 para separar el cadmio que luego se precipita como $CdCO_3$ o se reduce a esponja de cadmio con más del 90% de cadmio. La esponja puede fundirse con NaOH o destilarse al vacío, o disolverse y electrolizarse para producir cadmio de gran pureza [≥ 99,99% de cadmio].

El zinc bruto puede destilarse en columnas New Jersey para producir zinc puro y una aleación de Cd-Zn con más de un 60% de cadmio. La aleación de CD/Zn de la destilación New Jersey debe destilarse dos veces para poder producir cadmio puro.

Existe reciclaje, pero muy pocas empresas lo realizan. Principalmente consiste en el reciclaje de baterías usadas para recuperar cadmio y Ni.

1.5.3.4. Aspectos medioambientales

El estatus de los compuestos de cadmio tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el cadmio se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II. Un grupo de trabajo técnico bajo la Directiva 96/62/CE sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire está desarrollando una norma de calidad del aire ambiente para el cadmio. Estos factores se deben tener en consideración.

El cadmio ha estado ubicuamente distribuido en el entorno natural durante millones de años. La producción industrial ha afectado a su distribución total sólo de forma insignificante, pero en algunas áreas restringidas se han desarrollado problemas medioambientales. Un proceso típico de producción de zinc puede producir 600 toneladas anuales de cadmio. La producción de cadmio se controla estrechamente para evitar emisiones fugitivas y eliminar el polvo con un estándar muy estricto.

Más del 90% de la ingesta de cadmio de los no fumadores se produce a través de los alimentos. En consecuencia, la contaminación por cadmio del suelo cultivable debe reducirse y controlarse. Los valores límite de las emisiones de cadmio al aire son < 0,2 mg/Nm^3, y para el agua son < 0,2 mg/l.

El efecto crítico del cadmio es la disfunción de los conductos renales. El daño en los conductos es irreversible, por lo que su prevención es más importante que su diagnóstico. El largo periodo de semidescomposición biológica del cadmio puede producir un aumento continuo en los niveles renales a lo largo de muchos años, por lo que las exposiciones pasadas son con frecuencia más importantes que la exposición actual.

En muchas aplicaciones, las aleaciones de cadmio son esenciales y no pueden ser sustituidas por otros materiales. Análogamente, el uso de cadmio en pilas recargables puede también ser un beneficio medioambiental.

1.6 Metales Preciosos

1.6.1 Información General

En los metales preciosos [tm 36, Panorama 1997] se incluyen metales muy conocidos como el oro y la plata, así como los seis metales del grupo del platino (MGP): platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio. Se denominan metales preciosos por su rareza y resistencia a la corrosión.

La UE dispone de la mayor capacidad de refinado y producción de metales preciosos del mundo, incluso aunque sus actuales recursos minerales de dichos metales sean muy limitados. El reciclaje de metales preciosos a partir de chatarra y residuos industriales ha sido siempre una importante fuente de materias primas en la industria de la UE.

El consumo de oro en la UE es principalmente para joyería, utilizándose cantidades menores en electrónica y otras aplicaciones industriales y decorativas. Los principales usuarios de plata son las industrias fotográfica y de joyería. Los metales del grupo del platino se emplean extensivamente como catalizadores, y la imposición de límites de emisiones muy estrictos en los vehículos vendidos en la UE ha estimulado la demanda de su uso en catalizadores.

1.6.2 Fuentes de materiales

Minas de todas las partes del mundo envían grandes cantidades de metales preciosos, como mineral bruto o en forma de subproductos, a las refinerías de la UE. Las refinerías de metales preciosos de considerable capacidad se encuentran en Bélgica, Alemania, Suecia Finlandia y el Reino Unido. Estas refinerías recuperan normalmente metales preciosos de los minerales de plomo y zinc, cobre o níquel, así como de chatarras de baja calidad de todo tipo, y suministran los metales puros en barras o placas, granos o esponja.

Existen pequeños yacimientos de minerales de metales preciosos en Europa. La tabla 1.14 muestra los recursos primarios en 1997. Estos recursos representan aproximadamente el 4,5% de la plata primaria mundial, el 1,1% del oro primario mundial y el 0,08% de los MGP primarios. Actualmente se está iniciando la explotación de nuevos yacimientos de oro en Grecia, y su contribución será significativa en los próximos años.

Tabla 1.14: Recursos primarios de metales preciosos en 1997

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
España	6,2	5,4	
Finlandia	11,0	1,0	0,1
Francia	0,1	5,7	
Grecia	1,2		
Irlanda	0,4		
Italia	0,3		
Portugal	1,1		
Suecia	8,8	6,3	

Europa tiene una serie de empresas especializadas en la recogida, proceso preliminar y comercialización de chatarra y materiales secundarios antes de las etapas de análisis y refinado. Los artículos más frecuentes son placas de circuito impreso desechadas, ordenadores obsoletos, película fotográfica antigua, placas y soluciones radiográficas, baños de electroplastia consumidos, etc.

1.6.3. Producción y consumo

El coste de recuperación y reciclaje está más que justificado por el elevado valor intrínseco de los metales preciosos contenidos en estas chatarras y residuos. El reciclaje de metales preciosos se ve alentado no sólo por los aspectos económicos, sino también por los aspectos medioambientales, en los que se están fijando límites más estrictos en los contenidos de metales tolerables en los residuos para desecho.

El refinado de oro, plata y de los metales del grupo del platino en la UE se produce en empresas especializadas en el refinado y la fabricación de metales preciosos o en las refinería de metales de base. La capacidad total de refinado de metales preciosos de las empresas de la UE es la mayor del mundo.

Tabla 1.15: Capacidad anual de las refinerías europeas (toneladas)

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
Alemania	2.700	193	92
Austria	190	70	1
Bélgica	2.440	60	45
España	830	30	5
Francia	1.520	135	12
Holanda	130	15	1
Italia	1.050	115	15
Luxemburgo			
Reino Unido	2.320	300	100
Suecia	250	15	1
Suiza	620	565	14
Otros países de la UE	50	10	5

La capacidad de las refinerías es aproximadamente el doble de la cantidad procesada, por lo que puede mantenerse una rápida circulación del metal procesado.

La mayoría de los metales preciosos se fabrican de forma bastante fácil, como metales puros o como aleaciones. El oro en particular se convierte normalmente en aleaciones específicas para joyería o aplicaciones dentales con objeto de mejorar su resistencia al desgaste o su color. Debido a su elevado valor intrínseco y a la amplia gama de formas y aleaciones requeridas, estos metales se fabrican normalmente en cantidades relativamente pequeñas en comparación con los metales de base. Uno de los pocos productos de metales preciosos fabricados en cantidades de toneladas es el nitrato de plata para la industria fotográfica.

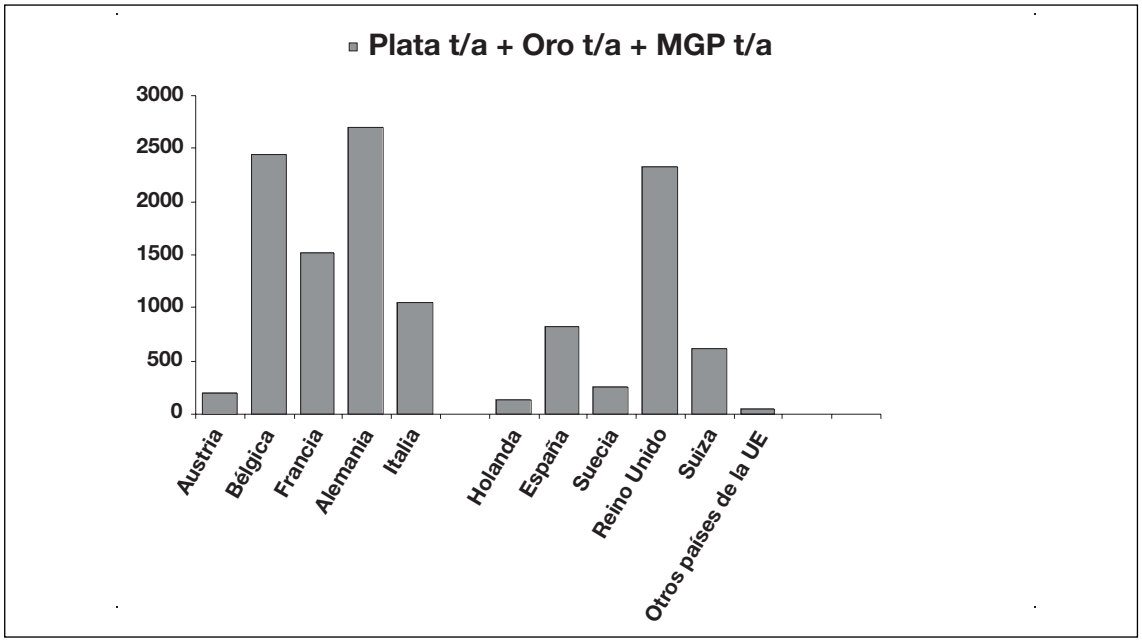


Figura. 1.8: Capacidad total europea de refinado de metales preciosos.

La demanda europea de metales preciosos es alta. El sector de la joyería es el que registra el mayor consumo de oro, y el sector fotográfico el de plata. El mayor consumo de platino es para la producción de catalizadores para vehículos. Otros usos principales son en productos químicos, en odontología y en inversión, por ejemplo para acuñar monedas. A continuación se muestra la demanda de metales preciosos en 1996.

Tabla 1.16: Demanda de Metales Preciosos en 1996

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
Demanda Europea Total	5.710	881	85
Demanda Mundial Total	19.600	2.621	360

1.6.4 Centros de Producción

Los principales fabricantes y refinerías de metales preciosos de la UE operan a escala internacional y son líderes mundiales en su campo. Nombres destacados son Degussa y Heraeus en Alemania y Johnson Matthey en el Reino Unido. La firma estadounidense de metales preciosos Engelhard Corporation ha estado operando en la UE desde hace años y a finales de 1994 anunció la creación de una empresa conjunta con la empresa francesa de metales preciosos CLAL.

Importantes refinerías de metales de base de la UE con considerable participación en los metales preciosos son Union Minière en Bélgica, Norddeutsche Affinerie en Alemania, Outokumpu en Finlandia y Boliden en Suecia.

1.6.5 Aspectos Medioambientales

Las refinerías de metales preciosos de la UE constituyen una industria de tecnología avanzada y altas prestaciones fuertemente centrada en la investigación y el desarrollo. Los procesos utilizan a menudo reactivos peligrosos como HCl, HNO_3, Cl_2 y disolventes orgánicos. Se utilizan técnicas de proceso avanzadas para contener estos materiales, y la producción a pequeña escala permite el uso eficaz de estas técnicas para minimizar y eliminar las posibles emisiones. Esto abarca no sólo las nuevas aplicaciones de los metales preciosos, sino también el descubrimiento de técnicas para economizar las cantidades de metales preciosos utilizadas en las aplicaciones existentes. Las materias primas son sometidas a muestreos y análisis intensivos, y todos los residuos de los procesos se analizan con idéntico rigor.

La recuperación de estos metales a partir de materias primas secundarias es particularmente importante, y muchas de estas materias están clasificadas como residuos de otras industrias. Hay una cierta lentitud en el movimiento de materias primas debido a la legislación sobre Expedición Internacional de Residuos, lo cual puede suponer un obstáculo para el reciclaje.

1.7 Mercurio

1.7.1 Información General

El mercurio es el único metal que es líquido a temperatura ambiente, y tiene los puntos de fusión y de ebullición más bajos de todos los metales. También tiene una elevada conductividad eléctrica, y estas características se utilizan en una serie de aplicaciones, como interruptores eléctricos y fabricación de pilas. El mercurio forma fácilmente aleaciones con una serie de otros metales, que se denominan Amalgamas y son ampliamente utilizadas en odontología. El principal

uso del mercurio es como cátodo de circulación en el proceso Cloro-Alcali. Este proceso utiliza la elevada conductividad el mercurio y la formación de una amalgama con el sodio.

El mercurio se caracteriza por la toxicidad del metal y de sus vapores, así como por la extrema toxicidad de algunos de sus compuestos. A consecuencia de ello, el mercurio está siendo sustituido por materiales alternativos en muchos de sus usos, por lo que la demanda y producción de mercurio ha decrecido rápidamente. Esto tiene implicaciones de cara al futuro, ya que es probable que algunas existencias de mercurio salgan al mercado o se conviertan incluso en residuos.

1.7.2 Fuentes de materiales

El mercurio se encuentra en la naturaleza en forma de cinabrio (sulfuro de mercurio), que está asociado con gangas muy duras como la cuarcita y los basaltos. También está presente en forma de otros componentes como óxidos, sulfatos, cloruros o seleniuros. Estos son raros y están siempre asociados con el cinabrio, y generalmente tienen escasa relevancia. Hay excepciones, como la livinstonita (HgSbS), que se ha utilizado en México. La calidad de los minerales primarios varía considerablemente desde un 0,1% de mercurio hasta más del 3%.

Otras fuentes de mercurio son los minerales y concentrados de otros metales como cobre, plomo y zinc, etc.. El mercurio se produce a partir de los gases de purificación emitidos durante la producción de estos metales. El mercurio puede también recuperarse a partir de materiales secundarios como amalgama dental y pilas, y también se obtiene del refinado de aceite.

1.7.3 Producción y consumo

La descomposición del cinabrio es completa a temperaturas de 600 ºC, según la reacción abajo indicada. El mercurio metal se condensa a temperatura ambiente. El calentamiento puede realizarse en hornos “Herreschoff”, de mufla o rotatorios. Los dos últimos no se utilizan con mucha frecuencia.

$$HgS + O_2 \rightarrow Hg + SO_2$$

Tabla 1. 17: Fuentes de mercurio

Fuente	Contenido de mercurio en el mineral [%]	Producción [t/a]
Almadén, España	> 3	390
Mc Dermitt, USA	0.5	
Nikitovska, Ucrania	0.1	

En el caso de minerales ricos, de más de un 2% de mercurio, sólo se requiere pretratamiento mediante triturado y clasificación y el mineral triturado puede alimentarse directamente al horno. En caso de minerales pobres con un 0,5% de mercurio, se utiliza flotación diferencial para separar la roca de sílice y obtener concentrados con un contenido medio de mercurio del 70%. Para minerales con menos del 0,1% de mercurio, el mineral se tuesta tras el triturado. Se utilizan hornos de gran capacidad (1000 t/día).

La producción de mercurio a partir de la producción de otros metales no férreos en Europa para 1997 se estima en 350 toneladas. Estos procesos generalmente producen mercurio o calomel en un rango de 0,02 a 0,8 kg de mercurio por tonelada de metal producido según el contenido de mercurio del concentrado.

El declive de la producción de mercurio puede apreciarse en la producción europea para 1960, 1970 y 1980.

Tabla 1.18: Producción de mercurio en Europa Occidental

Año	Producción [t/a]
1960	4.250
1970	3.700
1980	1.100

1.7.4. Aspectos Medioambientales

La toxicidad del mercurio y de sus componentes es un factor significativo. El mercurio en el medio ambiente puede interaccionar con diversos compuestos orgánicos para producir compuestos organomercúricos de gran toxicidad. La actual legislación impone por consiguiente normas muy estrictas a la industria para evitar las emisiones, para reducir su uso en diversos procesos y para eliminar el mercurio del medio ambiente.

El mercurio es una sustancia incluida en la Lista 1 de la Directiva 76/464/CEE, sobre contaminación causada por ciertas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. La Directiva 84/156/CEE establece valores límites de emisión de mercurio para la UE.

1.8 Metales Refractarios

1.8.1 Información General

El término de metales refractarios hace referencia a un grupo de metales (en algunos casos metales de tierras raras) que pueden caracterizarse en su mayoría por poseer las mismas propiedades físicas. Estas propiedades son, para la mayoría de metales refractarios, un elevado punto de fusión, una alta densidad, propiedades eléctricas especiales, el ser inertes y, en particular, la capacidad de conferir, mediante la adición de pequeñas cantidades al acero y otros metales, excepcionales mejoras en sus características físicas. A continuación se indican as propiedades físicas seleccionadas de algunos metales.

Tabla 1.19: Propiedades físicas de los metales refractarios

Metal	Símbolo	Número Atómico	Peso Atómico	Punto de Fusión [ºC]	Punto de Ebullición [ºC]	Densidad [g/cm³]
Cromo	Cr	24	51,99	1857	2672	7,19
Manganeso	Mn	25	54,94	1220	2150	7,44
Tungsteno	W	74	183,85	3410	5900	19,3
Vanadio	V	23	50,94	1929	3450	6,11
Molibdeno	Mo	42	95,94	2610	5560	10,22
Tantalio	Ta	73	180,95	2996	5425	16,65
Titanio	Ti	22	47,88	1725	3260	4,5
Niobio	Nb	41	92,90	2468	4927	8,57
Renio	Re	75	186,2	3180	5900	21,02
Hafnio	Hf	72	178,4	2230	4602	13,09
Zirconio	Zr	40	91,22	1857	3580	6,5

Los metales refractarios y los metales duros en polvo se utilizan para una amplia gama de aplicaciones industriales. El cromo metal es importante formando aleaciones con el acero y como recubrimiento metálico en la industria galvánica. Entre una serie de otros usos como las

aleaciones con acero, el manganeso es el componente clave en ciertas aleaciones de aluminio ampliamente usadas, y se utiliza en forma de óxido en pilas secas [tm 174, T.S. Jones USGS 1997]. El mayor uso del tungsteno es en los carburos cementados, también denominados metales duros. Los carburos cementados son materiales resistentes al desgaste que se utilizan en los sectores de metalurgia, minería y construcción. Los cables, electrodos y/o contactos de tungsteno metal se utilizan en aplicaciones de iluminación, electrónica, calefacción y soldadura [tm 175, K.S. Shedd USGS 1997]. El molibdeno encuentra un considerable uso en numerosas aplicaciones químicas, como catalizadores, lubricantes y pigmentos [tm 176, J.W. Blossom USGS 1997]. El tantalio y su elemento gemelo el niobio se utilizan en forma de polvos metálicos y carburos. El tantalio en polvo se utiliza principalmente para la producción de condensadores de tantalio.

Niobio y columbio son nombres sinónimos para el mismo elemento. El columbio fue el primer nombre que se le dio, y niobio fue el nombre oficialmente designado por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en 1950 [tm 172, L.D. Cunningham USGS 1997]. Como metal, el titanio es bien conocido por su resistencia a la corrosión y por su elevado índice de tenacidad en relación a su peso. No obstante, alrededor del 85% del titanio se consume en forma de dióxido de titanio (TiO_2), un pigmento blanco en pinturas, papel y plásticos [tm 177, J. Gambogi USGS 1997]. El renio se emplea en catalizadores de reforma del petróleo para la producción de hidrocarburos de alto octanaje, que se utilizan para la producción de gasolina sin plomo [tm 178, J.W. Blossom USGS 1997].

El zirconio es el 18º elemento más abundante en la corteza terrestre, con una abundancia media de cristales de 165 partes por millón. Martin-Heinrich Klaroth descubrió el elemento en 1789 al analizar circón. El zirconio libre de hafnio se utiliza como encamisado para las barras de combustible nuclear. El zirconio de calidad comercial, a diferencia de la calidad nuclear, contiene hafnio y se utiliza en las industrias de proceso químico debido a su excelente resistencia a la corrosión. El hafnio es un elemento metálico plateado brillante, dúctil y lustroso, con un punto de fusión muy elevado. El hafnio metal fue descubierto en 1925 por Anton Edward van Arkel y Jan Hendrik de Boer pasando tetracloruro de hafnio sobre un filamento de tungsteno. El hafnio se utiliza en barras de control nuclear debido a su elevada absorción térmica de neutrones en sección transversal [tm 179, J.B. Hedrick USGS 1997]. Otras aplicaciones de los metales refractarios incluyen el uso como elementos de mezcla para la producción de cerámicas que contienen metales.

Debido a su naturaleza refractaria, los metales se procesan en ocasiones en modos distintos a los metales más comunes. La producción requiere por lo general métodos hidrometálicos para la extracción y purificación [tm 8, HMIP 1993] y la reducción con hidrógeno y carburización para la producción de polvo de metal duro y de carburos de metales duros. Los metales refractarios en bruto y los metales en polvo requieren a menudo técnicas metalúrgicas en polvo con el fin de producir productos acabados o semiacabados.

Los procesos para la fabricación de metales refractarios que incluyen la producción de polvo de metal duro y de carburos metálicos cubren los metales cromo, manganeso, tungsteno, vanadio, molibdeno, titanio, tantalio, niobio y renio, así como la producción de zirconio y hafnio.

1.8.2 Fuentes de materiales

Los metales refractarios pueden producirse a partir de una amplia gama de materias primas primarias y secundarias. Los metales refractarios se producen a partir de materias primas primarias mediante tratamiento hidrometalúrgico de minerales y concentrados oxídicos y sulfurosos y ulterior reducción con hidrógeno y carburización para producir carburos cementados.

La producción a partir de materias primas secundarias se basa normalmente en chatarra

Tabla 1.20: Materias primas primarias y secundarias para la producción de metales refractarios.

Metal	Materia prima primaria (Recursos)				Materia prima secundaria
	Minerales	Contenido	Otros Metales	Yacimientos en la UE	
Cromo	Cromita	Cr < 50%	Fe, Mg, Al	Finlandia y Grecia	• Chatarra de cromo
Manganeso	Pirolusita Braunita Manganita Psilomelana	Mn 63% Mn 66% Mn 62% Mn 45 - 60%	Si Ba	Grecia[2] e Italia[2]	
Tungsteno	Wolframita Scheelita Ferberita Hübnerita	WO_3 76% WO_3 80% WO_3 76% WO_3 76%	Fe, Mn Ca Fe Mn	Austria, Francia, Portugal y Reino Unido	• Chatarra de tungsteno (Virutas y polvo de muela para desbaste) • Chatarra de metal duro
Vanadio	Titanomagnetita[3] Montroseita Corvusita Roscoelita	V 1.5% V 45% V 40% V < 14%	Fe, Al, Ti, Cr Fe Al, Si		• Residuos de caldera • Cenizas de incineradores • Catalizadores consumidos de las industrias petroquímica y química. • Sales residuales de la producción de alúmina
Molibdeno	Molibdenita Wulfenita Powelita Ferrimolibdita Calcopirita[4]		Re Pb Ca, W Fe Cu		• Catalizadores que contienen molibdeno del refinado de petróleo.
Titanio	Rutilo Ilmenita Leucoxeno Escoria rica en TiO_2 de ilmenita	TiO_2 94% TiO_2 < 70% TiO_2 80%			• Chatarra de titanio, principalmente de la producción de productos semiacabados. • Virutas de titanio.
Tantalio	Tantalita Wodginita Microlita Columbita (Casiterita)[5]	Ta_2O_5 42 - 84% Ta_2O_5 60 - 70% Ta_2O_5 1 - 40%	Fe, Mn, Nb Nb,Sn,Mn,Fe Na,Ca,Nb Fe,Mn,Nb		• Chatarra de tantalio metálico sin oxidar. • Anodos de tantalio. • Condensadores • Granos sinterizados • Chatarra de tantalio oxidada relacionada con otros metales oxidados • Anodos de tantalio recubiertos con manganeso oxidado
Niobio	Tantalita Columbita Microlita	Nb_2O_5 2 - 40% Nb_2O_5 40 - 75%	Fe, Mn, Ta Fe, Mn, Ta Na, Ca, Ta		• Chatarra de metal duro
Renio	Molibdenita		Mo		• Catalizadores de platino-renio utilizados en la industria petrolífera
Zirconio	Circón[6]		Hf		
Hafnio	Circón[6]		Zr		

Notas:
[1] La lista no contiene todas las posibles materias primas, sólo un resumen de las fuentes de materias primas más importantes.
[2] Los yacimientos de manganeso en Grecia e Italia contienen minerales de baja calidad y se han utilizado sólo de forma eventual.
[3] Los yacimientos de titanomagnetita que contienen vanadio son de origen magmatogénico y existen en muchas partes del mundo [tm 107, Ullmanns 1996]. A partir del mineral de titanomagnetita puede producirse una escoria de vanadio, la fuente para producir compuestos de vanadio.
[4] Concentrado de sulfuro de cobre-molibdeno que se utiliza como mineral secundario.
[5] La producción de estaño a partir de casiterita produce una chatarra que contiene tantalio y niobio, que es la fuente principal de materia prima para la producción de tantalio y niobio.
[6] Zirconio y hafnio son a veces subproductos de yacimientos de arenas pesadas, que siempre contienen titanio y otros metales de tierras raras.

de metales duros de otros procesos de producción, como catalizadores consumidos. El hecho de que el reciclaje juega un importante papel queda demostrado por el hecho de que alrededor del 30% del suministro mundial de tungsteno se produce a partir de materias primas secundarias. La industria de proceso de tungsteno puede tratar cualquier tipo de chatarra o residuo que contenga tungsteno para recuperar el tungsteno y otros elementos valiosos si los hubiere.

La tabla 1.20 ofrece una vista general de las materias primas primarias y secundarias más importantes utilizadas para la producción de metales refractarios. También proporciona información acerca de los depósitos de minerales dentro de la Unión Europea.

También se utilizan una serie de otras materias primas como coque, carbón, carbón vegetal, silicio, aluminio, calcio y magnesio como agentes reductores. Son necesarios distintos agentes químicos, como ácido sulfúrico, para las operaciones de lixiviación, purificación, precipitación, intercambio iónico y electrólisis.

1.8.3 Producción y consumo

La producción europea y mundial de metales refractarios es muy sensible a la situación política y económica de los países que producen las materias primas. El consumo mundial de tungsteno primario, por ejemplo, fue fuerte en 1997 y se mantuvo bastante por encima de la producción minera mundial. Aproximadamente un tercio del suministro mundial fue de mineral de tungsteno liberado de existencias acumuladas en Rusia y Kazajstán. La liberación de existencias han mantenido el mercado con un exceso de suministro y han mantenido el precio del tungsteno primario por debajo del coste operativo de la mayoría de las minas. Debido a ello, muchas minas han cerrado, y la capacidad mundial de producción de tungsteno ha caído a alrededor del 75% del consumo mundial. Asimismo, China continúa siendo un fuerte competidor en caso de que aumente su producción de metales refractarios. No obstante, debido a las ventajosas propiedades de los metales refractarios y a la comprensión creciente de sus aplicaciones, la producción aumentará, al menos a largo plazo. Por ejemplo, el consumo futuro de los carburos cementados de tungsteno, que es el mayor sector de aplicación, se estima que crecerá más de un 5% en relación a las cifras de 1998 [tm 175, K. B. Shedd USGS 1997]. La producción mundial de cromo metal se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 1.21: Capacidad mundial de producción de cromo metal [tm 173, J.F. Papp USGS 1997]

País	Capacidad de producción [t/a]
Brasil	500
China	4.000
Francia	7.000
Alemania	1.000
India	500
Japón	1.000
Kazajstán	1.000
Rusia	13.000
Reino Unido	10.000
EE.UU.	3.000

1.8.4 Centros de producción

La producción de metales refractarios en la Unión Europea se basa en un número reducido de empresas. Por ejemplo, dos grandes empresas producen principalmente cromo metal. Son London and Scandinavian Metallurgical Co Limited, que operan una nueva y moderna fábrica de cromo construida en 1997, y Delachaux en Francia, que acaba de reportar la finalización de su planta de cromo metal en Valeciennes.

Las siguientes empresas, Kennametal Hertel AG, Widia GmbH y HC Stark GmbH en Alemania, Treibacher Industrie AG y Plansee AG en Austria, Sandvik y Seco Tools en Suecia, y Eurotunstène Poudres en Francia [tm 182, ITIA 1999] producen tungsteno metal en polvo y carburos de tungsteno en Europa.

Las empresas arriba mencionadas para la producción de tungsteno metal en polvo producen algunos otros metales refractarios. En la tabla 1.22 se presenta un resumen de las mayores empresas mundiales de producción de tantalio y niobio y sus productos. Lamentablemente no hay disponible información sobre los productores chinos, por lo que no se incluyen en la tabla.

1.8.5 Aspectos medioambientales

El principal impacto medioambiental de la producción de metales refractarios es el polvo con contenido metálico y el polvo de metales duros, así como los vapores de los procesos de fundición, por ejemplo para producir cromo metal. Las emisiones de polvo se derivan del almacenamiento y la manipulación de las materias primas y los productos, así como del funcionamiento de los hornos, en el que tanto las emisiones controladas como fugitivas juegan un importante papel.

El uso de hidrógeno como agente reductor implica el posible riesgo de incendios. El fluoruro de hidrógeno, que se utiliza en diversos procesos, es altamente tóxico y por lo tanto debe ser manipulado con sumo cuidado para evitar problemas de salud del personal de la planta. Otro impacto medioambiental de la producción de metales duros es el elevado nivel radiactivo de algunas materias primas (ej. pirocloro) y la toxicidad de compuestos metálicos como los de cobalto y níquel.

Los residuos y subproductos del proceso son escorias, lodos con metales, polvo de filtros y refractarios consumidos. Estos materiales ya se reciclan y reutilizan en gran medida cuando es posible. Debido a los niveles radiactivos de algunas materias primas, los residuos de tales procesos metálicos pueden ser radiactivos.

Las emisiones al agua se derivan de los efluentes de refrigeración, granulación y otros relacionados con el proceso o con el emplazamiento concreto. Un aspecto importante es el agua residual generada por los sistemas de eliminación de limpieza húmeda.

Las emisiones al aire, al agua y al suelo y por consiguiente el impacto medioambiental son relativamente bajas en comparación con otros sectores de la industria de metales no férreos. Esto es debido a las pequeñas cantidades de metales refractarios producidos y al elevado valor de dichos metales. Esto hace que sea muy importante recoger, filtrar y reciclar el máximo posible desde un punto de vista económico. El tratamiento de pequeños volúmenes de gas de escape es también menos difícil, al poder utilizarse de forma ventajosa filtros de bolsa de alto rendimiento.

Tabla 1.22: Principales productores mundiales de niobio y tantalio [tm 172, L.D. Cunnigham USGS 1997]

País	Empresa	Productos (N 1)
Austria	Treibacher Chemische Werke AG	Oxido/carburo de Nb y Ta, FeNb, NiNb.
Brasil	Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineracao (CBNM	Oxido/metal de Nb FeNb, NiNb.
	Cia. Industrial Fluminense (N 2)	Oxido de Nb y Ta.
	Mineracao Catalao de Goias S.A. (Catalao)	FeNb.
Canadá	Cainbior Inc., and Teck Corp. (Niobec)	FeNb.
Estonia	Silmet	Oxido/metal de Nb.
Alemania	Gesellschaft Fur Elektrometallurgie mbH (GFE) (N 2) H.C. Stark GmbH & Co. KG	FeNb, NiNb. Oxido/metal/carburo de Nb y T, sal K, FeNb, NiNb, Polvo para condensadores de Ta.
Japón	Mitsui Mining & Smelting Co.	Oxido/metal/carburo de Nb y Ta
	Showa Cabot Supermetals (N 3)	Polvo para condensadores de Ta.
	H.C. Stark-V Tech Ltd. (N 4)	Polvo para condensadores de Ta.
Kazajstán	Ulba Metallurgical	Oxido/metal de Ta.
	Irtysh Chemical & Metallurgical Works	Oxido/metal de Nb
Rusia	Solikamsk Magnesium Works	Oxido de Nb y Ta.
Tailandia	H.C. Starck (Thailand) Co. Ltd. (N 4)	Sal K, Ta metal.
Estados Unidos	Cabot Corp.	Oxido/metal de Nb y Ta, Sal K, FeNb, NiNb,
		Polvo para condensadores de Ta.
	H.C. Starck Inc. (N 5)	Nb y Ta metal, polvo para condensadores de Ta.
	Kennametal, Inc.	Carburo de Nb y Ta.
	Reading Alloys, Inc.	FeNb, NiNb.
	Shieldalloy Metallurgical Corp. (N 2)	FeNb, NiNb.
	Wah Chang (N 6)	Oxido/metal de Nb, FeNb, NiNb.
	H.C. Starck-TTI, Inc. (N 4)	Polvo para condensadores de Ta

Notas:
(N 1) Nb, niobio; Ta, tantalio; FeNb, ferroniobio; NiNb, níquel-niobio; Sal K: fluotantalato potásico; óxido, pentóxido.
(N 2) Subsidiaria al 100% de Metallurg Inc., New York-.
(N 3) Empresa conjunta entre Showa Denko y Cabot Corp.
(N 4) Subsidiaria de H.C. Starck GmbH & Co. KG.
(N 5) Propiedad conjunta de Bayer USA y H.C. Starck GmbH & Co. KG.
(N 6) Subsidiaria de Allegheny Teledyne Inc.

1.9 Ferroaleaciones

1.9.1 Información General

Las ferroaleaciones son aleaciones maestras que contienen algo de hierro y uno o más metales no férreos como elementos aleados. Las ferroaleaciones permiten la introducción segura y económica en el proceso metalúrgico de elementos de aleación como cromo, silicio, manganeso, vanadio, molibdeno etc., lo que confiere ciertas propiedades deseables al metal aleado, por ejemplo para aumentar su resistencia a la corrosión, su dureza o su resistencia al desgaste.

Su importancia ha crecido con el progreso de la metalurgia del acero, que implica la creación de elementos de aleación más diversificados, en cantidades mejor controladas, en acero más puro. la industria de las ferroaleaciones se ha convertido en un proveedor clave de la industria del acero.

Las ferroaleaciones se clasifican normalmente en dos grupos:

- Ferroaleaciones en masa (ferrocromo, ferrosilicio junto con silicio-metal, ferromanganeso y silicomanganeso), que se producen en grandes cantidades en hornos de arco eléctrico.
- Las ferroaleaciones especiales (ferrotitanio, ferrovanadio, ferrotungsteno, ferroniobio, ferromolibdeno, ferroboro y aleaciones ternarias/cuaternarias), que se producen en cantidades menores, pero cuy importancia es creciente.

Las ferroaleaciones en masa se utilizan exclusivamente en la fabricación de acero y en fundiciones de acero o hierro. Los usos de ferroaleaciones especiales son bastante más variados, y la proporción empleada en la fabricación de acero ha disminuido a favor de las empleadas en la industria del aluminio y la industria química, especialmente los productos con silicio. Las siguientes figuras muestran el uso de las ferroaleaciones en masa y de las ferroaleaciones especiales en los distintos sectores para 1994.

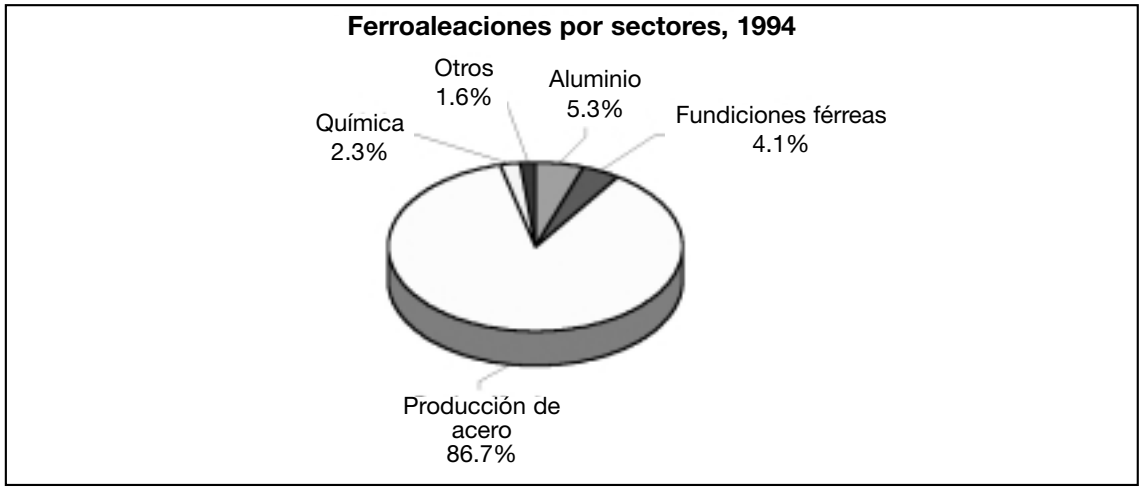


Figura 1.9: Uso de ferroaleaciones en distintos sectores industriales en 1994. [tm 36, Panorama 1997].

1.9.2 Fuentes de materiales

Las materias primas (elementos de aleación) para la producción de ferroaleaciones se obtienen mediante extracción expresa en minas (cuarcita para silicio, cromita para cromo…) o como subproductos de otra producción (ej. molibdeno de la minería del cobre). Por supuesto, ambas fuentes pueden existir simultáneamente.

También pueden recuperarse de chatarra, caso que a menudo suele ocurrir para la parte de hierro de la composición, que procede de la chatarra de hierro y aluminio, pero también para el elemento de aleación en sí, por ejemplo titanio. Los residuos de acerías, como polvo de hornos de arco eléctrico y de filtros de convertidores, así como el polvo de granallado y de desbaste, suponen una materia prima secundaria significativa con una importancia cada vez mayor. Las principales fuentes de materias y yacimientos minerales para los elementos de aleación son:

- La cromita, que se concentra en dos grandes yacimientos, situados en Sudáfrica y Kazajstán. Existen yacimientos menores en otras partes del mundo, especialmente en Europa (Finlandia, Turquía, Albania, Grecia).

Figura 1.10: Uso de ferroaleaciones en masa y especiales en distintos sectores industriales en 1994 [tm 36, Panorama 1997].

- La materia prima para producir ferrosilicio y silicio metal se encuentra disponible en todas partes del mundo, aunque no todas las fuentes permiten la producción en condiciones económicas y de calidad de todas las gamas de aleaciones de silicio.
- Los minerales de manganeso se encuentran principalmente en Sudáfrica, Ucrania, Gabón y Australia. Existen yacimientos menores en Brasil, India, México y Birmania. La calidad (contenido de manganeso y nivel/naturaleza de las impurezas) del mineral pueden influir considerablemente en la economía de la producción de ferroaleaciones.
- Los elementos de aleación especiales se concentran muy a menudo en unos pocos países (molibdeno en Norteamérica, Chile y China; niobio en Brasil), y los precios y la disponibilidad son muy sensibles a las condiciones económicas.

1.9.3 Producción y consumo

Durante los últimos 15 a 20 años, el patrón mundial del mercado de las ferroaleaciones ha cambiado profundamente:

- El consumo de los países desarrollados ha aumentado enormemente con el desarrollo de su producción de acero.
- Su producción ha aumentado incluso más dado que han ido copando una cuota creciente del mercado tradicional de los mercados industrializados, en los que la producción de acero estaba estancada o creciendo lentamente.

- La industria de la ferroaleación se enfrenta a una cantidad creciente de importaciones, primero de los nuevos países industrializados y en años recientes de los países de Europa del Este y de la CEI.

En consecuencia, la producción de ferroaleaciones se ha visto sometida a una competencia difícil que ha tenido como consecuencia una tendencia decreciente de la cantidad total de ferroaleaciones producidas. Aunque los últimos años han registrado una cierta estabilización, incluso un ligero aumento de la producción, la industria europea sigue siendo muy sensible. En el gráfico inferior y la tabla de la página siguiente se muestra la producción actual de ferroaleaciones en masa en la UE expresada en toneladas al año. La información sobre las cifras de producción se ha tomado de [tm 180, M. Tenton USGS 1997] y ha sido suministrada por el grupo de expertos en ferroaleaciones.

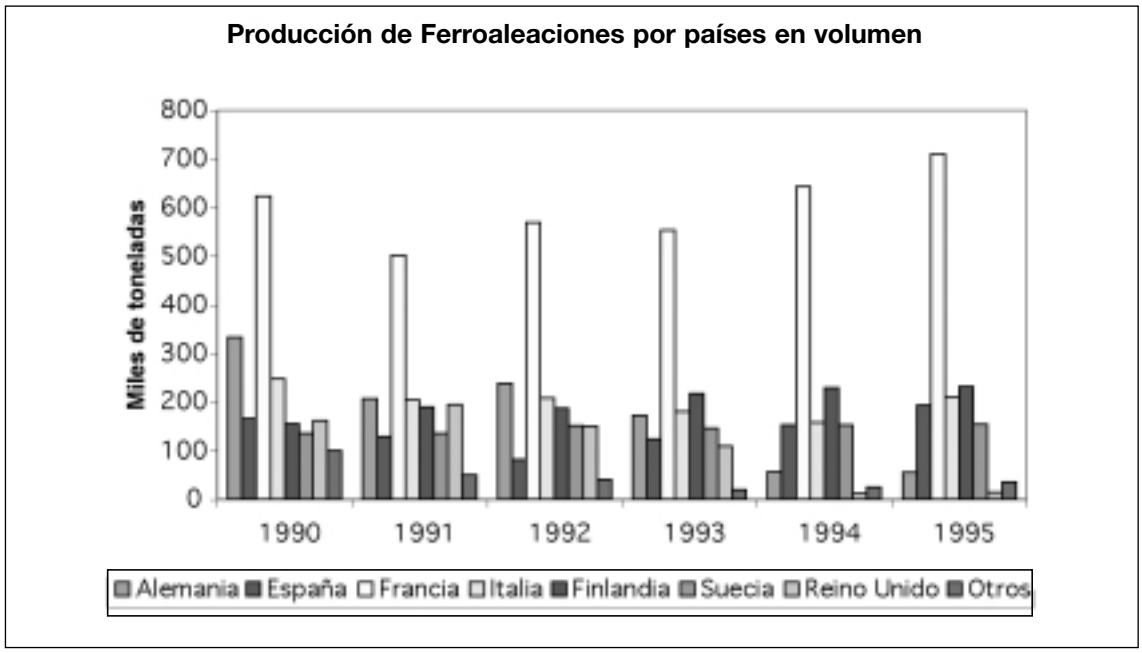


Figura 1.11: Producción de ferroaleaciones en masa en Europa [tm 36, Panorama 1997].

En la tabla 1.23 se muestra la producción europea total de ferroaleaciones en masa, dividida en las distintas aleaciones y los hornos en que se producen. Las cifras presentadas pueden no reflejar las capacidades de producción exactas y deben considerarse cifras indicativas.

Tabla 1.23: Producción europea de ferroaleaciones en masa en toneladas anuales [tm 180, M. Tenton USGS 1997]

Producción	1993	1994	1995	1996	1997
Austria: Horno eléctrico:					
Ferroníquel 1/	8.000	5.250	6.200	5.000	5.000
Otras e/	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
Total	13.900	11.150	12.100	10.900	10.900
Bélgica: Horno eléctrico, ferromanganeso e/	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
Finlandia: Horno eléctrico, ferrocromo	218.370	229.000	232.300	236.100r/	236.652 6/
Francia:					
Alto horno, ferromanganeso	300.000	294.000	384.000 r/	337.000 r/	326.000
Electric furnace:					
Ferromanganeso	57.000	66.200	46.000 r/	65.000 r/	60.000
Ferrosilicio	84.000	111.000	108.000	130.000 r/e/	130.000
Siliciomanganeso e/ 2/	80.000	66.000 r/	71.000 r/	61.000 r/	66.000
Silicio-metal	59.000	66.000	71.450 r/	73.800 r/	74.000
Otras e/	29.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Total e/	609.000	623.000 r/	664.000 r/	687.000 r/	676.000
Alemania: e/					
Alto horno, ferromanganeso3/	100.000	--	--	--	--
Horno eléctrico:					
Ferrocromo	16.400 6/	17.283 6/	21.665 r/6/	25.303 r/6/	25.856 6/
Ferromanganeso 4/	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Ferrosilicio	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Silicio-metal	500	500	500	500	500
Otras 5/	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Total	187.000	87.800	92.200 r/	95.800 r/	96.400
Grecia:					
Ferroníquel	10.930	16.190	17.170	17.800	17.610
Islandia: Horno eléctrico, ferrosilicio	67.375	66.003	71.410	70.520 r/	71.000
Italia: Horno eléctrico: e/					
Ferrocromo	53.504 6/	22.650 6/	51.017 6/	29.915 6/	11.295 6/
Ferromanganeso	17.000	16.000	20.216 r/6/	25.143 r/6/	16.000
Silicomanganeso	50.000	40.000	103.961 r/6/	100.353 r/6/	100.000
Silicio-metal	10.000	--	10.000 r/	14.000 r/	15.000
Otras 6/	12.000	12.000	12.000	10.000	10.000
Total	143.000	90.700	197.000 r/	179.000 r/	152.000
Noruega: Horno eléctrico:					
Ferrocromo	80.000	120.000	148.000 r/	108.900 r/	145.124 6/
Ferromanganeso	226.018	248.648	213.000 r/	215.000 r/	215.000
Ferrosilicio	399.559	452.984	474.875 r/	462.423 r/	470.000
Silicomanganeso	218.566	197.328	210.000 r/e/	210.000 r/e/	210.000
Silicio-metal	81.000	92.000	101.000	110.000 e/	110.000
Otras e/ 2/	14.000	14.000	15.000	15.000	15.000
Total e/	1.020.000	1.120.000	1.160.000 r/	1.120.000	1.170.000
España: Horno eléctrico: e/					
Ferrocromo	2.390 6/	2.300 6/	1.320 6/	805 6/	490 6/
Ferromanganeso	40.000	35.000	25.000	30.000 r/	35.000
Ferrosilicio	30.000	25.000	30.000	30.000	30.000
Silicomanganeso	35.000	35.000	50.000	70.000 r/	100.000
Silicio-metal	5.000	3.000	5.000	5.000	15.000
Otras e/ 10/	5.000	4.000	5.000	5.000	5.000
Total e/	117.000	104.000	116.000	141.000 r/	185.000

Producción		1993	1994	1995	1996	1997
Suecia:	Horno eléctrico					
	Ferrocromo	127.543	134.076	130.170	138.110	101.842 6/
	Ferrosilicio	20.381	21.392	21.970	21.287 r/	22.000
	Total	147.924	155.468	152.140	159.397 r/	124.000
Suiza:	Horno eléctrico					
	Ferrosilicio	3.000	--	--	--	--
	Silicio-metal	2.000	--	--	--	--
	Total	5.000	--	--	--	--
Reino Unido:						
	Alto horno, ferromanganeso	45.000	--	--	--	--
	Horno eléctrico, otras e/	10.000	--	--	--	--
	Total e/	55.000				

Notas: e/ estimado; r/ revisado; 1/ Cifra reportada; 2/ Incluye fundición especular de silicio, si la hay; 3/ Incluye fundición especular, si la hay; 4/ Incluye silicomanganeso si lo hay; 5/ Incluye ferrocromosilicio y ferroníquel, si los hay; 6/ La serie excluye calcio-silicio.

En la tabla siguiente se indica la capacidad total mundial de producción de ferroaleaciones dividida en las distintas aleaciones y los hornos en que se producen. Las cifras presentadas pueden no reflejar las capacidades de producción exactas y deben considerarse cifras indicativas.

Tabla 1.24: Producción mundial de ferroaleaciones en masa [tm 180, M. Tenton USGS 1997].

Tipo de horno, 1/2 de aleacción 3/	1993	1994	1995	1996	1997
Gran total:	15.700.000 r/	16.300.000 r/	17.700.000 r/	17.900.000 r/	17.600.000
dividido en:					
Alto horno:					
Ferromanganeso 4/	1.210.000	1.010.000	874.000 r/	927.000 r/	871.000
Fundiciones especulares 5/	12.000	10.000	9.500	9.500	9.500
Otras 28/	225.000	230.000	230.000	220.000	220.000
Total, alto horno	1.450.000	1.250.000	1.110.000 r/	1.160.000 r/	1.100.000
Horno de arco eléctrico:					
Ferrocromo 6/	3.270.000 r/	3.530.000 r/	4.550.000 r/	4.010.000 r/	4.470.000
Ferrocromosilicio	62.500	89.500	90.700	52.200	50.000
Ferromanganeso 7/ 8/	2.320.000	2.770.000 r/	2.780.000 r/	3.050.000 r/	2.900.000
Ferroníquel	755.000 r/	772.000 r/	964.000 r/	923.000 r/	913.000
Ferrosilicio	4.010.000 r/	3.830.000 r/	4.070.000 r/	4.370.000 r/	4.130.000
Silicomanganeso 8/ 9/	2.740.000 r/	2.850.000 r/	3.010.000 r/	3.110.000 r/	3.000.000
Silicio- metal	564.000	559.000	588.000 r/	649.000 r/	662.000
Otras10/	575.000 r/	635.000 r/	589.000 r/	589.000 r/	383.000
Total, horno eléctrico	14.300.000 r/	15.000.000	16.600.000 r/	16.700.000 r/	16.500.000

Notas: (toneladas, peso bruto). e/ Estimato. r/ Revisado.
1/ La producción de ferroaleaciones de manganeso, ferrosilicio, y silicio metal se inició en 1996 para Arabia Saudita, pero los datos de producción real no estaban disponibles.
2/ En la medida de lo posible, la producción de ferroaleaciones se ha dividido de acuerdo con el tipo de horno con el que se obtiene la producción; la producción derivada de hornos metalotérmicos se incluye con la producción en hornos eléctricos.
3/ En la medida de lo posible, la producción de ferroaleaciones de cada país se ha dividido para mostrar los siguientes tipos principales de ferroaleaciones individuales: ferrocromo, ferrocromosilicio, ferromanganeso, ferroníquel, ferrosilicio, silicomanganesp, silicio-metal, y fundiciones especulares. Las ferroaleaciones distintas de las listadas que se han identificado específicamente en fuentes, así como las ferroaleaciones no identificadas específicamente, pero que excluyen claramente las listadas anteriormente en esta nota al pie, se reportan como "Otras". Cuando una o más de las ferroaleaciones individuales listadas separadamente en esta nota al pie han resultado inseparables de otras ferroaleaciones debido al modo de información de un determinado país, las desviaciones se indican mediante notas al pie individuales.
4/ Las fundiciones especulares, si las hay, se incluyen con el ferromanganeso de alto horno.
5/ Incluye ferrofósforo y los datos contenidos en "Alto Horno: Otras".
6/ El ferrocromo incluye ferrocromosilicio, si lo hay, para Japón, Sudáfrica, y Estados Unidos.
7/ El ferromanganeso incluye silicomanganeso, si lo hay, para los países con la nota al pie 12 en la línea de datos de "Ferromanganeso". 3 I/ Producción de EE.UU. bajo "Otras".
8/ Incluye fundiciones especulares de silicio, si las hay, para Francia.
9/ Incluye calcio-silicio, ferromolibdeno, ferrovanadio, y los datos contenidos en "Horno eléctrico".
10/ Distintas para cada país indicado.

Debido a los avances técnicos y metalúrgicos y a los cambios en la producción de hierro y acero, también el patrón de consumo de las ferroaleaciones ha cambiado, especialmente en los países industrializados:

- La producción de acero al carbono, bastante estancada, se produce cada vez más en hornos de arco eléctrico a partir de chatarra, lo que permite la recuperación de los elementos de aleación, reduciendo el consumo relativo de ferroaleaciones.
- Una producción más eficaz de acero al carbono (colada continua, por ejemplo) y una metalurgia más avanzada han producido un caída significativa en el consumo de manganeso (desde 7 kg/tonelada de acero hasta 5 kg/tonelada en 20 años) y de ferrosilicio (desde 5 kg/tonelada de acero hasta 3,5 kg/tonelada en 20 años).
- La necesidad creciente de elementos de aleación metalúrgicamente sofisticados (niobio, molibdeno) y de elementos de tratamiento (calcio) ha producido un mayor consumo de aleaciones especiales.
- La producción creciente de acero inoxidable ha producido un aumento significativo del consumo de aleaciones de cromo (principalmente acero al ferrocromo con alto contenido en carbono).

Teniendo todos estos factores en consideración, el consumo en Europa Occidental ha estado más o menos estancado en unos 4,2 millones de toneladas/año, y su producción ha descendido desde 4 millones de toneladas a 3 millones de toneladas durante los últimos 10 años.

1.9.4 Centros de producción

En Europa hay una serie de empresas que producen distintas ferroaleaciones en unos 60 centros de producción industrial. El principal país europeo productor de ferroaleaciones es Noruega para la producción de ferroaleaciones en masa, y Francia y España especialmente para la producción de aleaciones de manganeso y silicio. Finlandia es un importante productos de ferrocromo a partir de una mina local de mineral de cromo. En Suecia se produce principalmente ferrocromo y ferrosilicio. En el Reino Unido, Bélgica, Austria y Alemania se producen ferroaleaciones especiales como ferromolibdeno, ferrovanadio y ferrotitanio

1.9.5 Aspectos medioambientales

La producción de ferroaleaciones comporta por lo general el uso de hornos de arco eléctrico y de crisoles de reacción en los que se cargan productos naturales (ej. cuarzo, cal, diversos minerales, madera, etc.) con composiciones físicas relativamente fluctuantes. Debido a ello, el principal impacto medioambiental en la producción de ferroaleaciones es la emisión de polvo y humo de los procesos de fundición. También se producen emisiones de polvo del almacenamiento, la manipulación y el pretratamiento de materias primas en las que las emisiones fugitivas de polvo juegan un importante papel. Según la materia prima y el proceso utilizado, otras emisiones a la atmósfera son SO_2, NOx, CO gas, CO_2, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), COVs y metales volátiles. Puede ser posible la formación de dioxinas en la zona de combustión y en la zona de enfriamiento del sistema de tratamiento de gases de escape (síntesis de novo).

Los residuos y subproductos de proceso con cantidades significativas son las escorias, el polvo de filtro y los lodos, así como los refractarios consumidos. Estos materiales ya se reciclan y reutilizan en gran medida cuando es posible. Las escorias ricas, lo que significa escorias con una proporción relativamente alta de óxidos metálicos, se utiliza como materia prima en la producción de otras ferroaleaciones. Por ejemplo, la escoria rica de la producción de ferromanganeso es una de las materias primas más importantes para la producción de silicomanganeso.

Las emisiones al agua se derivan de los efluentes de refrigeración, granulación y otros relacionados con el proceso o con el emplazamiento concreto. Un aspecto importante es el agua residual generada por los sistemas de eliminación de limpieza húmeda.

La industria de las ferroaleaciones, cuya herramienta básica es el horno de arco eléctrico en el que los óxidos metálicos son reducidos con carbono, es un importante consumidor de energía y un productor de dióxido de carbono. Por consiguiente, la reducción del consumo de energía se ha considerando siempre una prioridad vital. Las leyes de la termodinámica, que gobiernan las reacciones empleadas, limitan la reducción de la energía necesaria para el proceso de fundición. Por consiguiente, la reducción del consumo global de energía sólo es posible utilizando un sistema eficaz de recuperación de energía. La energía recuperada puede transformarse en energía eléctrica o utilizarse como calor para diversos fines. Los gases de escape ricos en CO de los hornos cerrados pueden usarse asimismo como combustible secundario o materia prima para procesos químicos. La recuperación de energía reduce el uso de otros recursos de energía naturales y por lo tanto el impacto sobre el calentamiento global.

1.10 Metales Alcalinos y Alcalinotérreos

1.10.1 Información General

Los metales alcalinos, que químicamente pertenecen al primer grupo de la tabla periódica de los elementos, incluyen metales como litio, sodio, potasio, así como un elemento radiactivo extremadamente rara: el francio. Lo metales alcalinos se caracterizan por su bajo punto de fusión y densidad. Tienen un color blanco plateado y son más blandos que otros metales. Los metales alcalinos tienen un único electrón muy móvil en su capa más externa. Debido a ello, son altamente reactivos, especialmente con oxígeno o agua, donde pueden asimismo reaccionar violentamente produciendo hidrógeno gas y calor.

Los metales alcalinotérreos son similares a los metales alcalinos en diversos modos, pero reaccionan menos vigorosamente con el agua. Los metales alcalinotérreos son los elementos del segundo grupo de la tabla periódica. En orden creciente de número atómico, así como de su importancia metalúrgica y técnica, son magnesio, calcio y estroncio.

1.10.2 Fuentes de materiales

El sodio y sus compuestos son ampliamente utilizados en la industria para la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, en procesos metalúrgicos y en una serie de otros productos de uso cotidiano. E sodio metal se produce normalmente por la electrólisis de cloruro sódico fundido.

El litio metal se produce de forma muy similar al sodio metal. La producción se realza mediante la electrólisis de una mezcla eutéctica fundida de cloruro de litio y cloruro potásico a unos 450 ºC en una célula de Downs.

El potasio, que fue descubierto en 1807 por el químico ingles Humphry Davy, aparece en muchas rocas y minerales de silicato, de los que la mayor fuente comercial son los yacimientos de sal. El potasio metal es de color blanco plateado y fue el primer metal aislado por electrólisis. A escala industrial, el potasio metal sólo se produce mediante la reducción de cloruro potásico con sodio metal.

Al igual que con el potasio, Humphry Davy descubrió el magnesio como elemento metálico en 1808. Se trata de un metal blanco plateado, dúctil y químicamente activo que pertenece al grupo de los metales alcalinotérreos. El magnesio puede producirse por electrólisis de cloruro

magnésico obtenido a partir de la materia prima dolomita y agua de mar, magnesita, carnalita o salmueras, o de dolomita que se reduce mediante ferrosilicio y/o aluminio en un proceso de reducción térmica. El magnesio también se recupera y produce como magnesio secundarios de una amplia gama de residuos que contienen magnesio y de chatarra de magnesio metálico.

La mayoría del magnesio se emplea en aleaciones con aluminio, aunque el mayor índice de crecimiento se registra en el uso de aleaciones de magnesio en el moldeo de piezas en las que la ligereza es importante, como la industria de automoción. Otro gran campo de aplicación es la desulfurización del acero con magnesio en polvo. El uso creciente de residuos de magnesio secundario de la desulfurización del acero está reduciendo el crecimiento en la producción de magnesio en polvo primario. A continuación se muestra el uso mundial del magnesio metal en los distintos mercados [tm 1,HMIP 1993].

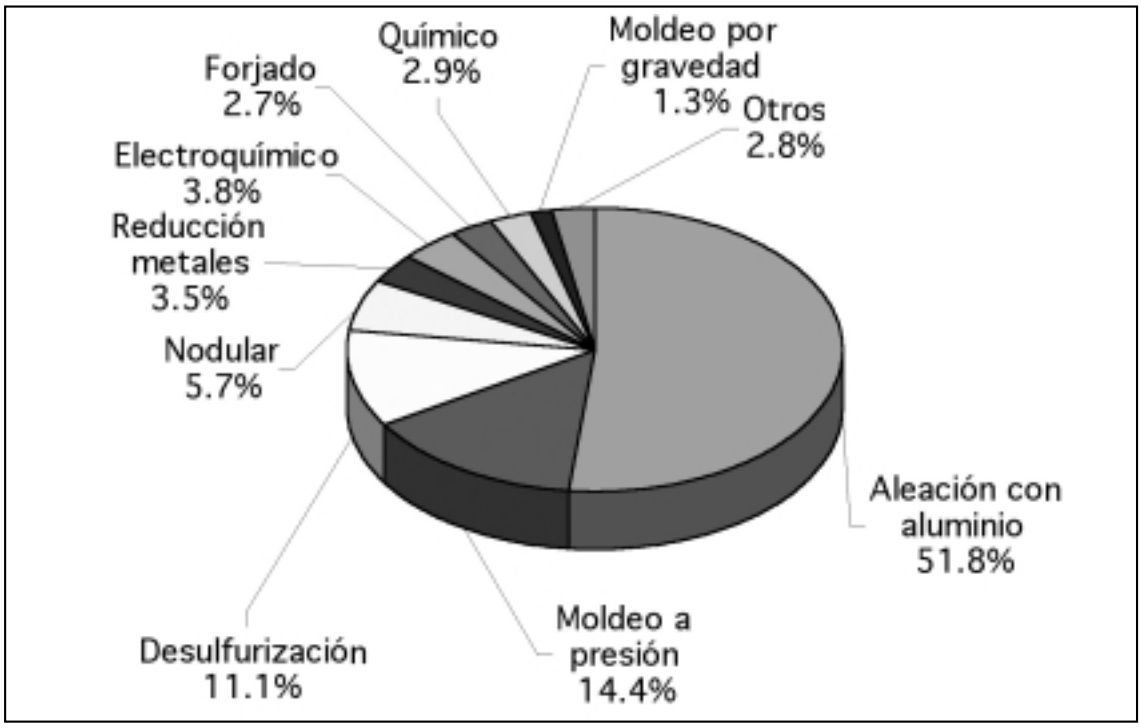


Figura 1.12: Uso mundial del magnesio metal.

El calcio y el estroncio metales se utilizan para distintas aplicaciones. El calcio como elemento de aleación mejora la calidad de los aceros, especialmente las propiedades mecánicas como la conformabilidad, el trefilado y la mecanización. Debido a su gran capacidad para formar óxidos y sulfitos, el calcio es importante en la producción de acero ultralimpio. El calcio metal puede también emplearse en la desbismutación del plomo. El estroncio metal se utiliza en el refinado de aluminio, así como en el refinado de escorias de acero.

1.10.3 Producción y consumo

La producción de metales alcalinos y alcalinotérreos, especialmente para la producción de sodio, litio, calcio y estroncio metal, es realizada sólo por unas pocas empresas. La capacidad mundial de producción de magnesio primario es del orden de 400.000 toneladas al año, mientras que la producción europea es de unas 57.000 toneladas al año. Las tablas siguientes ofrecen un resumen de la capacidad de producción de magnesio primario y de las cantidades producidas a nivel mundial de magnesio primario y secundario por países [tm 189, D. Kramer, USGS 1997].

Tabla 1.25: Producción mundial de magnesio primario por países.

Continente y país	Capacidad productores	Número de
Norteamérica:		
Canadá	49.000	2
Estados Unidos	80.000	2
Europa:		
Francia	17.000	1
Kazajstán (N 3)	10.000	1
Noruega	35.000	1
Rusia (N 3)	45.000	2
Serbia y Montenegro	5.000	1
Ucrania (N 3)	24.000	1
Otros		
China	~150.000 - 200.000	~200
India	900	1
Brasil	10.000	1
Israel	27.500	1
Total mundial (N 1,2)	503.400	~215

Notas:
N 1 Incluye la capacidad en las plantas operativas, así como las plantas en fase de puesta en funcionamiento
N-2 Los datos se redondean a tres cifras significativas; los totales indicados pueden no ser exactos.
N 3 Excluida la capacidad de producción de magnesio que se utiliza exclusivamente para la producción de titanio.

Tabla 1.26: Cantidades producidas de magnesio primario y secundario en toneladas anuales

País	1993	1994	1995	1996	1997
Producción primaria:					
Brasil e/	9.700	9.700	9.700	9.000	9.000
Canadá e/	23.000	28.900	48.100	54.000	57.700
China e/	11.800	24.000	93.600	73.100 r/	92.000
Francia	10.982	12.280	14.450	14.000 e/	12.000
Israel	--	-	-	-	8.000
Japón	7.471	3.412	-	--	--3/
Kazajstán e/	2.000	- 3/	9.000 r/	9.000 r/	8.972 3/
Noruega	27.300	27.635	28.000 e/	28.000 r/ e/	28.000
Rusia e/ 4/	30.000	35.400	37.500	35.000	39.500
Serbia y Montenegro	- e/	-	2.560	2.500 e/	2.500
Ucrania e/	14.900	12.000	10.000 r/	10.000 r/	10.000
Estados Unidos	132.000	128.000	142.000	133.000	125.000 3/
Total	269.000	282.000	395.000 r/	368.000 r/	392.000
Producción secundaria:					
Brasil e/	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Japón	13.215	19.009	11.767	21.243 r/	22.797 3/
URSS e/ 5/	6.000	5.000	6.000	6.000	n.a.
Reino Unido e/ 6/	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Estados Unidos	58.900	62.100	65.100	70.200 r/	80.200 3/
Total	80.700	88.700	85.500	100.000 r/	106.000

Notas:
1/ Los totales mundiales y los datos estimados se redondean a tres cifras significativas: los totales indicados pueden no ser exactos.
2/ La tala incluye los datos disponible a 22 de julio de 1998.
3/ Cifra reportada.
4/ Incluye producción secundaria.
5/ Disuelta en diciembre de 1991; no obstante, no se dispone de información fiable para formular estimaciones fiables para los países individuales de la antigua URSS.
6/ Incluye aleaciones r/ revisado e/ estimado

1.10.4 Centros de producción

En la Unión Europea sólo hay unos pocos centros de producción de sodio, litio y potasio. El sodio metal es producido por Associated Octel, una empresa radicada en el Reino Unido, y por una empresa que realiza una producción de sodio en Francia. Para la producción de magnesio primario hay dos empresas en Europa. Hydro magnesium (NHM) opera una planta de magnesio primario en Porsgrunn, Noruega, basada en dolomita y agua de mar como materias primas. Pechiney Électrométallurgie (PEM) opera una planta de reducción térmica en Marignac en Francia, basada en el proceso Magnetherme desarrollado por la propia Pechiney. Hay alguna otras empresas, en su mayoría pequeñas, que producen magnesio secundario en la Unión Europea. Sólo una empresa de la Unión Europea produce calcio metal y también existe una sola empresa dedicada a la producción de estroncio metal. Ambas plantas son operadas por Pechiney Électrométallurgie (PEM) en su fábrica de La Roche de Rame en Francia.

1.10.5 Aspectos medioambientales

El principal problema medioambiental en la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos son las emisiones a la atmósfera y al agua. La generación de la emisiones a la atmósfera es debida a la naturaleza polvorienta de algunos procesos y operaciones que se utilizan en la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos. Por ejemplo, la descarga, trituración y calcinación de las materias primas se asocia con la generación de polvo. Otro aspecto medioambiental importante es la emisión de cloro y de compuestos derivados como hidrocarburos clorados y dioxinas. Los hidrocarburos clorados y las dioxinas son emitidos principalmente en el proceso de cloración que se utiliza en la electrólisis del magnesio. Estos contaminantes deben ser eliminados de los gases de escape. Esto tiene como consecuencia la contaminación del agua de lavado, lo que requiere un tratamiento eficaz de las aguas residuales. También se producen emisiones al agua por el lavado del agregado de filtración del proceso del sodio. Para evitar que el magnesio metal se reoxide por efecto del aire circundante, se utiliza hexafluoruro de azufre (SF6) en el equipo de moldeo, desde donde también se emite a la atmósfera.

1.11 Níquel y Cobalto

1.11.1 Níquel

1.11.1.1 Información General

El níquel [tm 36, Panorama 1997; tm 94, Nickel Expert Group 1998] es un metal blanco plateado con propiedades metálicas típicas. Aunque sólo fue descubierto como metal en 1751, sus aleaciones se han utilizado durante siglos; por ejemplo, los chinos habían estado fabricando “cobre blanco” cuyo aspecto se asemejaba al de la plata. Entre 1870 y 1880, se demostró el uso del níquel en aceros aleados y se desarrolló con éxito el niquelado.

La gran importancia del níquel reside en su capacidad, al alearse con otros elementos, de aumentar la resistencia, la tenacidad y la resistencia a la corrosión de los mismos en una amplia gama de temperaturas. El níquel es por consiguiente un elemento de extrema importancia comercial. Debido a estas ventajosas propiedades, el níquel se emplea en una amplia variedad de productos. La mayor parte del níquel primario se utiliza en aleaciones, la más importante de las cuales es el acero inoxidable. Otras aplicaciones son electroplastia, fundiciones, catalizadores, baterías, acuñado de monedas y otras aplicaciones diversas. El níquel se encuentra en productos de transporte, equipos electrónicos, productos químicos, materiales de construcción, productos

del petróleo, equipos aerospaciales, artículos de consumo duraderos, pinturas y cerámicas. El níquel es un metal vital para las sociedades industrializadas.

Químicamente, el níquel se asemeja al hierro y al cobalto, así como al cobre. El níquel puede formar diversos compuestos, como sulfato, cloruro, óxido e hidróxido. Una propiedad del níquel es su capacidad para reaccionar directamente con monóxido de carbono para formar un complejo carbonílico binario que es volátil a temperatura ambiente. A temperaturas moderadas el níquel es resistente a la corrosión por aire, agua de mar y agentes no oxidantes. Otra propiedad del níquel es su resistencia a la corrosión con álcalis. Por el contrario, el níquel es atacado por soluciones amónicas acuosas.

1.11.1.2 Fuentes de materiales

El níquel es un elemento que se encuentra normalmente en la naturaleza, principalmente en forma de minerales de sulfuro, óxido y silicato. Los yacimientos son de dos tipos principales:

- Los sulfuros de níquel se encuentran a menudo junto con cantidades económicamente recuperables de cobre, cobalto, oro, plata, metales del grupo del platino y varios otros metales. Los yacimientos más importantes se encuentran en Africa, Australia, Canadá y Siberia.

- Las lateritas de níquel son productos de la erosión de rocas ultrabásicas que originalmente contenían muy pequeñas cantidades de níquel. Con el tiempo las impurezas han sido erosionadas de los yacimientos por el agua y el níquel se encuentra presente en forma de un óxido complejo de silicio, hierro y magnesio. El cobalto y el hierro están normalmente asociados con el níquel, pero las lateritas no contienen otros componentes valiosos, Los yacimientos más importantes se encuentran en las zonas tropicales del Sudeste de Asia, Australia, Sudamérica, el Caribe y en la zona de los Balcanes, especialmente en Grecia, que es la única fuente de níquel en Europa en este momento.

La compleja metalurgia del níquel se refleja en la amplia gama de procesos de extracción y refinado que se utilizan. Cada planta presenta un conjunto único de características de proceso y de aspectos medioambientales. El contenido de níquel de los minerales de sulfuro puede normalmente ser concentrado varias veces mediante técnicas relativamente económicas de preparación mecánica de los minerales, antes de fundir el concentrado y refinarlo en productos de níquel.

Los minerales de laterita, por el contrario, sólo son susceptibles de un enriquecimiento limitado por métodos físicos, como técnicas magnéticas o de medios pesados, y por lo tanto casi todo el volumen debe pasar directamente a las plantas metalúrgicas. Por ello, el proceso de la laterita tiende a ser más costoso, aunque los costes de extracción son normalmente mucho menores que para los minerales de sulfuro.

Estas diferencias, más la disponibilidad de un valor añadido por los subproductos, pueden tener una influencia importante a la hora de determinar la viabilidad de un yacimiento específico y de si se produce metal refinado o ferroníquel a partir del mismo.

1.11.1.3 Producción y consumo

Los productos de níquel pueden dividirse en tres grupos de acuerdo con la clasificación de la industria reconocida internacionalmente:

Clase I - Níquel refinado, con un contenido de níquel del 99% o más. Este grupo incluye níquel electrolítico, bolitas, briquetas, gránulos, arandelas y polvo/copos.

Clase II - Níquel de carga, con un contenido de níquel inferior al 99%. Este grupo incluye el ferroníquel, la sinterización de óxido de níquel y el níquel para aplicación general.

Clase III - Productos químicos: óxidos, sulfato, cloruro, carbonato, acetato e hidróxido de níquel, etc.

La producción mundial de níquel se mantuvo por debajo de las 1.000 toneladas al año hasta 1876; actualmente es de aproximadamente 1 millón de toneladas al año. La producción mundial de níquel primario en 1996 fue de unas 950.000 toneladas, y la capacidad de producción de unas 1.200.000 toneladas. En Europa, la capacidad de producción es de unas 200.000 toneladas y el consumo es de unas 330.000 toneladas, por lo que debe importarse níquel.

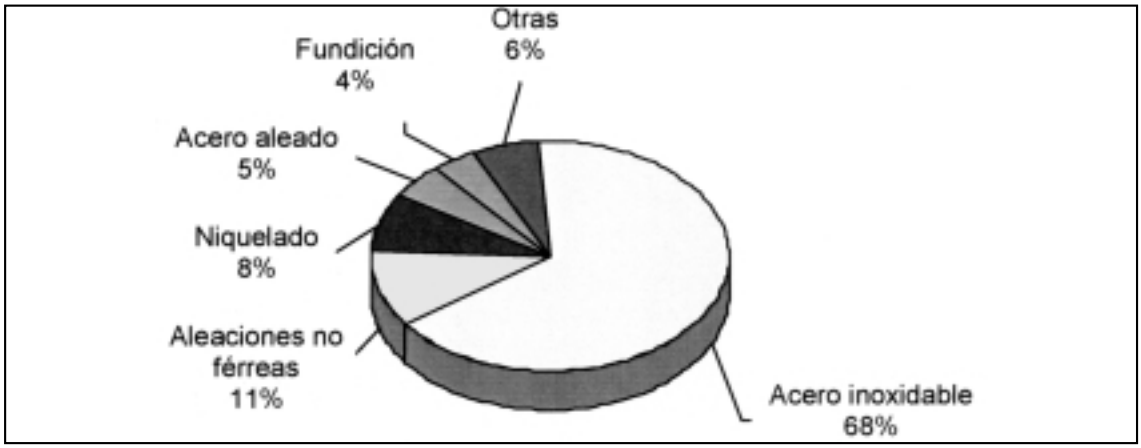


Figura 1.13: Aplicaciones del níquel en Occidente en 1996.

El consumo de níquel en Occidente aumentó en promedio un 6,5% anual entre 1945 y 1974. El consumo cayó bruscamente en 1975 y la demanda de níquel se mantuvo estable durante los diez años siguientes. El consumo níquel en Occidente aumentó de nuevo en 1987. la nueva recuperación en la demanda de níquel se inició en 1993 con un crecimiento del 15% en 1995 y todavía prosigue. El consumo mundial de níquel en 1996 fue de unas 940.000 toneladas y se espera que la demanda se mantenga fuerte.

1.11.1.4 Centros de producción

En Europa, el níquel se produce en los siguientes centros:

Tabla 1.27: Centros de producción de níquel

Productos	Fuente de materia prima	Capacidad de producción t/a Ni	Subproductos
Outokumpu, Finlandia	Finlandia, Noruega y Australia	36.000	Cu, Co, Acido Sulfúrico
Eramet, Francia	Nueva Caledonia	16.000	Cloruro de Cobalto Cloruro Férrico
Falconbridge, Noruega	Canadá y Botswana	85.000	Cu, Co, Acido Sulfúrico
INCO, Reino Unido	Canadá	41.000 (Ni en polvo y grano)	Sulfato de níquel
Treibacher, Austria	Secundaria	4.000	Se produce FeNi
Larco, Grecia	Grecia	20.000	Se produce FeNi
Total		202.000	

La producción total efectiva de estos centros fue de 167.900 toneladas para 1996 en comparación con 144.800 toneladas para 1994.

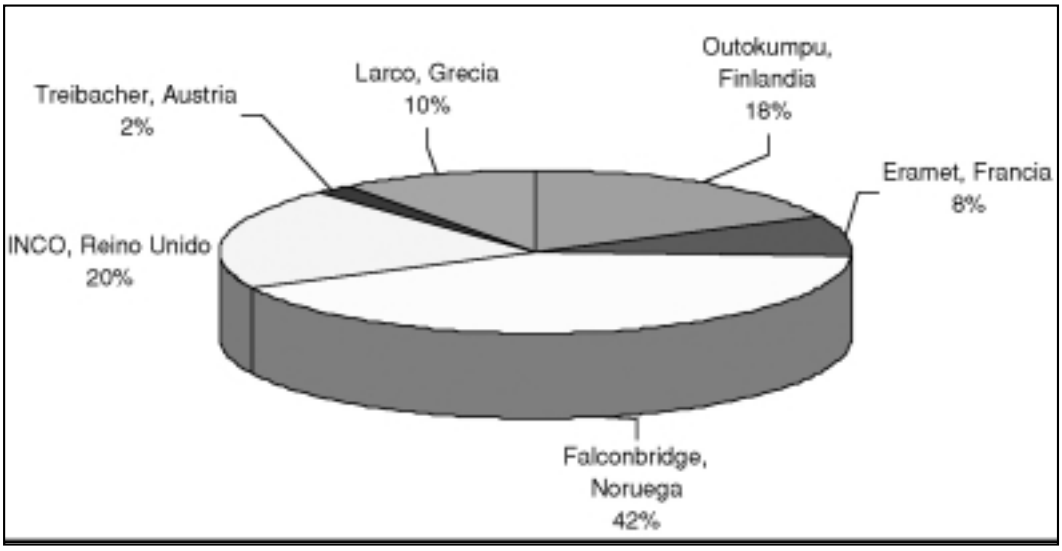


Figura 1.14: Producción europea de níquel.

1.11.1.5 Aspectos medioambientales

La emisión a la atmósfera de dióxido de azufre de la tostación y fundición de concentrados de sulfuro es un aspecto medioambiental potencialmente serio. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen un 98,9% de fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido. Las emisiones fugitivas de polvo, metales y disolventes son también importantes y deben evitarse y controlarse. El uso del cloro en algunos procesos va asociado con poderosas medidas de prevención de fugas y las alarmas correspondientes.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de níquel secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

El estatus de los compuestos de níquel tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el níquel se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II. Un grupo de trabajo técnico bajo la Directiva 96/62/CE sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire está desarrollando una norma de calidad del aire ambiente para el níquel. Por otra parte, el níquel ha demostrado ser un elemento esencial en ciertos microorganismos, animales y plantas.

El níquel es un elemento sostenible, el acero inoxidable y otras aleaciones con níquel son las fuentes principales de níquel secundario. Se estima que alrededor del 80 por ciento del níquel es reciclado a partir de chatarra de acero inoxidable antigua y retorna a ese mismo uso. Otras sustancias que contienen níquel, como los precipitados y residuos, son reciclados a la producción primaria.

En muchas aplicaciones, las aleaciones de níquel son esenciales y no pueden ser sustituidas por otros materiales. El uso del níquel en aplicaciones en las que se explotan sus propiedades de

tenacidad, resistencia a la corrosión, elevada conductividad, características magnéticas y propiedades catalíticas se considera un beneficio medioambiental positivo. Análogamente, el uso del níquel en pilas recargables es también beneficioso para el medio ambiente.

1.11.2 Cobalto

1.11.2.1 Información General

El cobalto [tm 36, Panorama 1997; tm 94, Nickel Expert Group 1998] es un metal blanco plateado con propiedades metálicas típicas, y fue aislado por vez primera en 1735. El cobalto metálico puro tiene pocas aplicaciones, pero su uso como elemento de aleación para aplicaciones resistentes al calor o al desgaste y como fuente de productos químicos lo convierten en un metal estratégicamente importante.

Aunque se utilizó muy poco cobalto metal hasta el siglo XX, sus minerales han sido utilizados durante milenios como agentes colorantes azules para vidrio y cerámica, por ejemplo en la cerámica egipcia de alrededor de 2.600 A.C. y en la cerámica china de alrededor de 700 A.C.. El uso del cobalto como metal data de 1907, cuando E. Haynes patentó una serie de aleaciones de cobalto-cromo denominadas Stellites que fueron las precursoras de las modernas superaleaciones. Su capacidad para mejorar las propiedades de los imanes comerciales fue puesta en evidencia en 1930.

El cobalto se utiliza en aleaciones, incluidas superaleaciones para aeronáutica, aleaciones magnéticas para imanes permanentes de gran potencia, aleaciones de metal duro para fabricar herramientas de corte, carburos cementados, aleaciones resistentes al desgaste o la corrosión, y aleaciones por electrodeposición para aplicar recubrimientos metálicos resistentes al desgaste y la corrosión.

Los productos químicos del cobalto se emplean en pilas recargables; como pigmentos en las industrias del vidrio, la cerámica y las pinturas; como catalizadores en la industria petrolífera; como secantes de pinturas; como aditivos metálicos en trazas para uso agrícola y médico.

1.11.2.2 Fuentes de materiales

Desde el principios del siglo XX, el principal suministro mundial de cobalto se desplazó desde Europa a Africa, Australia, Rusia y Canadá. La producción actual es de unas 30.000 t/a.

El cobalto de produce principalmente como subproducto de la minería y proceso de minerales de cobre y níquel. Los minerales de plata, oro, plomo y zinc pueden contener asimismo considerables cantidades de cobalto, aunque su proceso no siempre conduce a su recuperación. Las fuentes de minerales son:

- Los yacimientos de cobre-cobalto en Congo y Zambia.
- Los yacimientos de mineral de sulfuro en Australia, Canadá, Finlandia y Rusia.
- Los yacimientos de óxido de níquel en Cuba, Nueva Caledonia, Australia y Rusia.

La recuperación a partir de fuentes secundarias puede realizarse mediante la introducción del material reciclado en una etapa apropiada en un proceso primario de refinado o transformación, según sus posibilidades técnicas y económicas. Pueden ser necesarios pasos adicionales o de pretratamiento. Los productos finales pueden ser cátodos, polvos, óxidos, sales o soluciones.

1.11.2.3 Producción y consumo

El cobalto primario siempre se encuentra asociado con otros metales, particularmente cobre y níquel, y estos suelen ser predominantes. Según el material de partida, se han desarrollado diversos procesos que pueden comportar pasos pirometalúrgicos así como hidrometalúrgicos. Estos pasos producen:

- Una solución rica en cobalto en plantas integradas
- Un sulfuro rico en cobalto, hidróxido o carbonato si se realiza un refinado ulterior en otro lugar.
- Una aleación rica en cobalto.

El refinado ulterior es hidrometalúrgico, aunque la etapa final, la producción de un producto comercial, puede ser un proceso a alta temperatura, especialmente cuando el producto es en polvo y la actividad de refinado está integrada en el proceso de transformación. La capacidad de producción mundial es de unas 30.000 toneladas.

El cobalto se utiliza en diversas aplicaciones, que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1.28: Distribución de la producción total del cobalto entre los distintos sectores

Usos	Porcentaje de la producción total de cobalto
Aleaciones	34%
Cerámicas	12%
Metal duro	11%
Imanes	10%
Catálisis	8%
Herramientas de corte	6%
Pilas	6%
Cintas magnéticas	4%
Otras	9%

La demanda de cobalto en Occidente es de alrededor de 25000 t/año, de las que Europa representa aproximadamente un 25%. El uso del cobalto en pilas en una aplicación en crecimiento que requiere cobalto en forma de metal, óxido o hidróxido. La morfología del polvo es un factor importante.

1.11.2.4 Centros de producción

El cobalto y sus compuestos se producen principalmente en los mismos centros que producen níquel. Los centros se indican en la tabla 1.27 (en níquel). Además, Union Minière en Bélgica también produce cobalto.

La producción mundial se muestra en la siguiente figura 1.15.

1.11.2.5 Aspectos medioambientales

El estatus de los compuestos de cobalto tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el cobalto se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II.

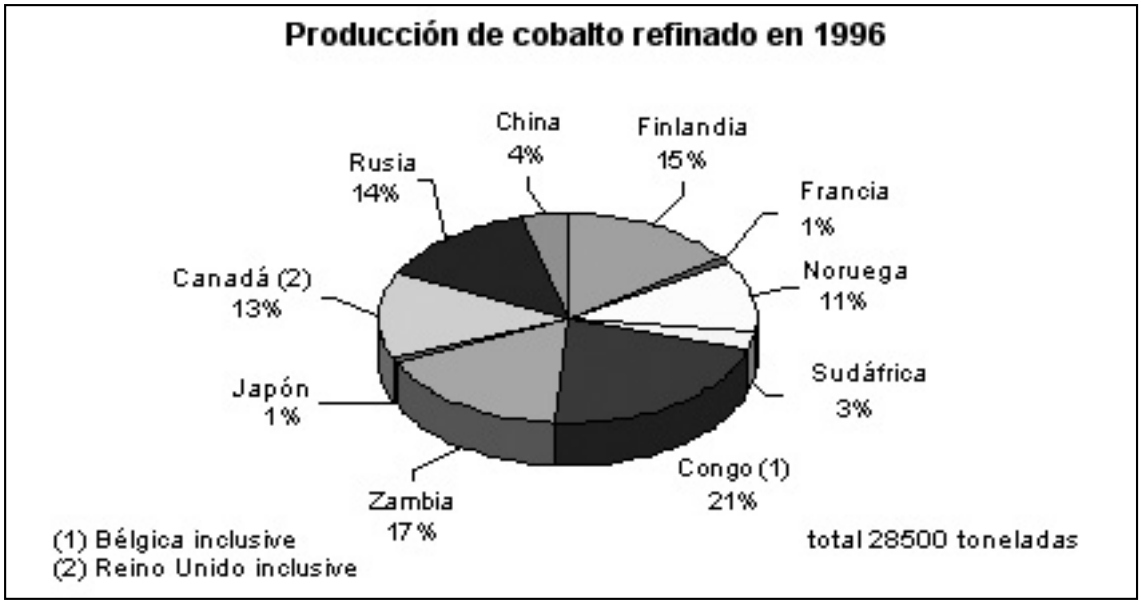


Figura 1.15: Producción mundial de cobalto.

Existe el potencial de emisiones de polvo y metales en las operaciones de desbaste, y en menor grado en las operaciones hidrometalúrgicas; de cloro en la electro-recuperación y de COVs en la extracción con disolventes; de metales en los efluentes de las operaciones hidrometalúrgicas de purificación y recuperación; de residuos sólidos en la purificación y tratamiento de efluentes. La industria utiliza una serie de técnicas para recuperar y producir cobalto que dependen esencialmente de la composición de materias primas y de los productos finales, por lo que la problemática concreta y la importancia de estos temas es específica de cada planta.

El uso del níquel en pilas recargables es beneficioso para el medio ambiente.

1.12 Carbono y Grafito

1.12.1 Información General

Existe una amplia gama de productos de carbono y grafito utilizados en la actualidad. Van desde grandes electrodos a pequeños casquillos y cojinetes. También se fabrican otros productos especializados como fibras de carbono y compuestos de carbono para industrias de alta tecnología que requieren la elevada resistencia y bajo peso de estos materiales.

El carbono existe en tres formas: diamantes, grafito y carbono amorfo. La diferencia entre los alótropos es esencialmente la estructura de los átomos de carbono, y la estructura determina las propiedades del material resultante. Los productos de carbono y grafito se utilizan en múltiples aplicaciones, dado que pueden diseñarse para tener características específicas de resistencia, tenacidad, propiedades eléctricas y mecánicas y especialmente elevada pureza y resistencia química en condiciones sin oxígeno, etc. para cumplir las exigencias de las aplicaciones particulares [tm 207, TGI 1999].

Los materiales de carbono y grafito se aplican principalmente para la conducción de energía eléctrica (cátodos y electrodos de grafito) y como agente reductor en la industria del aluminio (ánodos).

Los productos de carbono y grafito pueden dividirse básicamente en cuatro grupos de productos:

• Mezcla y pasta verde	Se utilizan principalmente en aleaciones de aluminio y ferroaleaciones, y para altos hornos en la industria del acero.
• Anodos	Se utilizan principalmente en la industria del aluminio y como agente de reducción química.
• Carbono y grafito	Se utilizan principalmente para el reciclaje del acero en el horno de arco y como cátodos para electrodos no consumibles en la industria del aluminio.
• Especialidades de carbono y grafito	Una amplia gama de productos que van desde una altísima pureza hasta productos con una enorme resistencia mecánica y térmica.

La aplicación de las especialidades de carbono puede dividirse básicamente en:

- Carbono y grafito de gran pureza.
- Aplicaciones de altas prestaciones mecánicas y térmicas.
- Productos técnicos como las fibras de carbono y grafito.
- Hojas de grafito y equipo de proceso.

Se producen ánodos y revestimientos de horno de carbono y grafito para una variedad de procesos de producción de metales férreos y no férreos, que se consumen durante la producción de los metales. Se producen más de 2000 productos distintos de diversos tamaños, formas y propiedades para otras aplicaciones. Los materiales de carbono y de grafito de alta pureza son esenciales para la producción de semiconductores y microchips, mientras que los electrodos de grafito para el reciclaje de chatarra y el carbono y grafito de elevada resistencia química se utilizan para la recuperación de residuos y el tratamiento de contaminantes.

1.12.2 Fuentes de materiales

La producción de materiales de carbono y grafito se basa principalmente en coque de petróleo y hulla, así como un coque altamente recocido basado en alquitrán de hulla. Las breas de petróleo y de alquitrán se utilizan como material aglomerante, que finalmente se convierte a carbono o grafito sólido inerte. Se utilizan sistemas aglomerantes a base de resinas, que son curados antes de su aplicación.

La calidad del coque depende de su procedencia, pero el factor más importante es el contenido en azufre del coque, ya que se emite como dióxido de azufre durante su fabricación o uso. Normalmente se utilizan coques de petróleo con contenido de azufre medio o medio para el producto principal como pasta, ánodos o electrodos.

Las propiedades de las materias primas deben ser muy constantes y se controlan mediante ensayos físicos y químicos. Se realizan ensayos de producción para probar nuevas materias primas, determinar su adecuación y ajustar los parámetros de producción al nuevo material. La calidad final de las materias primas se basa únicamente en las prestaciones y la aceptación del producto fabricado de carbono y grafito.

En la fabricación de carbonos especiales se utilizan otros materiales como metales, metales en polvo y diversas resinas.

1.12.3 Producción y consumo

El coque o carbono se aglomera normalmente con brea (14 a 18% en peso) para formar una pasta verde. Esta pasta pasa luego por una serie de etapas de conformación, cocción,

impregnación y grafitización para producir el producto final. La pasta verde se emplea directamente para electrodos de Søderberg. El proceso de cocción comporta una pérdida de peso del material de ~ 5%. En ciertos hornos se emplea coque de guarnición, y en estos casos se consume a un ritmo de ~14 kg/t de producto.

El carbono y el grafito se consumen en su mayoría durante su aplicación, convirtiéndose en anhídrido carbónico (por ejemplo, ánodos para electrodos de aluminio y acero). La producción de acero consume electrodos a un ritmo de 1,5 a 3 kg por tonelada de acero. Debido a la reducción significativa en los ritmos de consumo en algunas industrias, se han reducido las cantidades de carbono y grafito empleadas para la producción de aluminio y acero.

Las etapas de proceso y el tamaño del proceso varían según el producto. La industria del aluminio es de largo el mayor usuario de materiales de carbono y de ánodos de precocción, pasta de Søderberg y bloques catódicos. Generalmente las áreas de producción de especialidades de grafito son de menor escala que las de elecrodos. La siguiente tabla muestra el tamaño de las distintas áreas de producción.

Tabla 1.29: Producción anual de carbono y grafito en la UE y Noruega.

Tipo de producto	Producción t/a
Mezcla verde para electrodos de Søderberg o pasta	410.000
Anodos para Al primario	1.380.000
Electrodos	420.000
Especialidades de carbono y grafito	25.000

1.12.4 Centros de producción

Los productos de carbono y grafito se fabrican en 88 centros de la UE con una capacidad anual de ~ 2 millones de toneladas.

Tabla 1.30: Producción de la UE de carbono y grafito en miles de toneladas en 1998

País	Pasta verde	Anodos	Electrodos, formas grandes	Especialidades de carbono y grafito
Alemania		450(4)	117(3)	6.2(4)
Austria			15(1)	0.2(1)
Bélgica			18(1)	
Dinamarca				
España	81(1)	100(1)	52(2)	
Finlandia				
Francia		214(1)	62(2)	16(3)
Grecia		77(1)		81
Holanda		479(2)		
Irlanda				
Islandia				
Italia		85(1)	89(2)	0.2(1)
Luxemburgo				
Noruega	221(3)	162(2)		
Portugal				
Reino Unido	7(1)	148(3)	11(1)	2.2(1)
Suecia	37(1)	13(1)	34	
Suiza				

Notas:
El número entre paréntesis indica el número de productores en la UE.

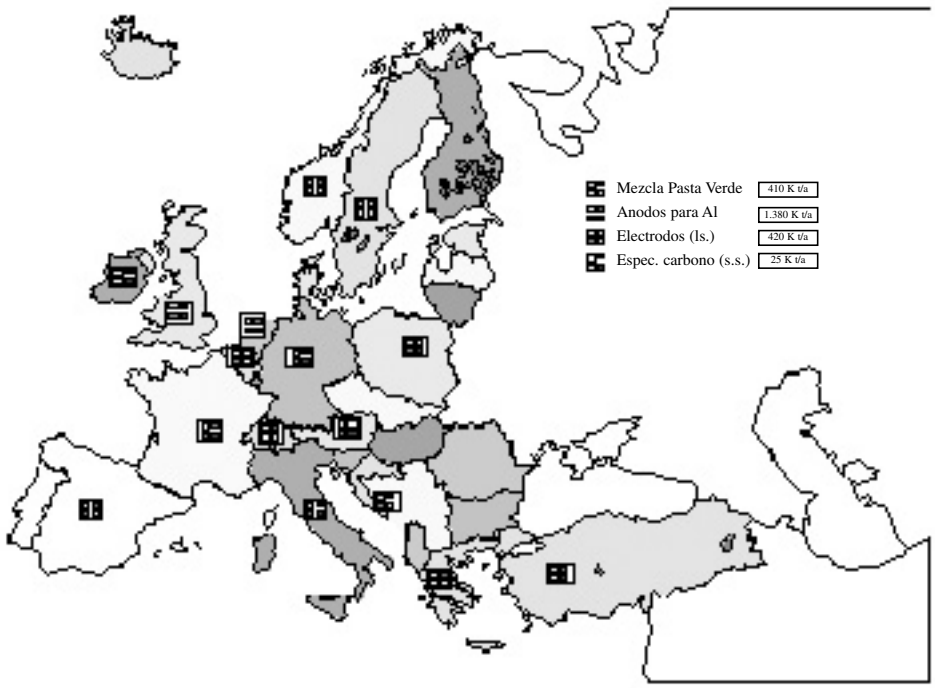


Figura 1.16: Centros de producción europeos de carbono y grafito.

La figura 1.16 muestra la distribución de la industria en Europa.

Hay una fuerte tendencia a cerrar la producción in situ de ánodos y pasar a un suministro externo. Algunos de los mayores productores in situ con capacidades de hasta 150.000 t/a suministran asimismo ánodos a las fundiciones de aluminio. La mayor planta europea, y posiblemente mundial, de producción de carbono, se encuentra en Holanda, con una capacidad de producción de 340.000 t/a que se ampliará a 375.000 t/a. No obstante, las mayores cantidades de ánodos se producen todavía en numerosas unidades in situ.

Una serie de empresas producen sólo cátodos debido al hecho de que la industria del aluminio requiere un periodo de vida útil muy largo. El ciclo de vida útil de un bloque catódico está entre 6 y 10 años. Las propiedades deben garantizar un buen rendimiento por lo que respecta a vida útil, resistencia eléctrica y resistencia a la abrasión.

1.12.5 Aspectos medioambientales

El principal impacto medioambiental de estos procesos es el impacto de las emisiones a la atmósfera de alquitranes y HAPs, dióxido de azufre del coque y combustibles y COVs de los agentes de impregnación. Se han desarrollado una serie de nuevos procesos de eliminación para destruir los alquitranes y los HAPs utilizando novedosos sistemas de postcombustión.

El principal aspecto medioambiental de la producción de carbono y grafito es el uso de mezclas complejas poliaromáticas de breas aglomerantes y de impregnación.

Las breas liberan compuestos de hidrocarburos polinucleados al ser carbonizadas. El benzopireno se utiliza como sustancia de referencia para controlar el carácter de las emisiones. Las emisiones se producen durante el almacenamiento, la mezcla y la conformación de la brea, en la carbonización en los hornos de cocción y durante la impregnación.

Si se utilizan coques con elevado contenido de azufre o aditivos sulfurados durante la producción de especialidades de carbono, puede formarse y emitirse dióxido de azufre.

Las emisiones de polvo o partículas son potencialmente importantes. Normalmente no se emplean materiales de grano fino para la producción de pastas, ánodos y electrodos, aunque sí para otros productos.

El progreso en las técnicas aplicadas para controlar el impacto sobre el medio ambiente ha sido considerable.

La contaminación del agua es en general un tema menor de la industria del carbono, ya que los procesos de producción son secos y generalmente utilizan sistemas cerrados de agua de refrigeración. Excepcionalmente puede usarse agua de superficie para refrigeración, cuando sea apropiado por las condiciones locales.

La industria del carbono y el grafito ha obtenido importantes éxitos en el reciclaje de los materiales de carbono (usados y sin usar) y en la apertura de nuevos campos de aplicación de dichos materiales, sustituyendo a otros recursos naturales.

1 INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Procesos cubiertos por el ámbito del trabajo

Existen muchas similitudes entre la producción primaria y secundaria de metales no férreos, y en muchos casos es imposible hacer distinciones entre las técnicas empleadas. La producción secundaria de metales no férreos incluye la producción de metal a partir de materias primas secundarias (incluida chatarra), así como los procesos de refundición y aleación. Este documento BREF cubre las técnicas para la producción de los metales no férreos tanto primarios como secundarios.

La producción de ánodos de carbono y grafito (Sección 6.8 del Anexo I de la Directiva sobre IPPC) se incluye dado que en algunas fundiciones de aluminio la producción de ánodos es parte integral del proceso de producción.

Se ha estudiado la producción de los 42 metales no férreos y la producción de ferroaleaciones en países que están obligados a poner en práctica la IPPC. Se identificaron 10 grupos de metales con métodos de producción similares. El estudio recogió datos sobre la base de estos grupos, y este documento se estructura sobre esta base.

Los grupos son:

- **Cu y sus aleaciones, Sn y Be**
- **Al y sus aleaciones**
- **Zn, Pb, Cd, Sb y Bi**
- **Metales Preciosos**
- **Mercurio**
- **Metales Refractarios, como Cr, W, V, Ta, Nb, Re, Mo**
- **Ferroaleaciones, como FeCr, FeSi, FeMn, SiMn, FeTi, FeMo, FeV, FeB**
- **Metales Alcalinos y Alcalinotérreos, Na, K, Li, Sr, Ca, Mg y Ti**
- **Ni y Co**
- **Electrodos de carbono y grafito**

La producción de metales radiactivos queda excluida del trabajo. Se excluye asimismo la producción de componentes como semiconductores.

Las instalaciones bajo el Anexo 2. del Anexo I de la directiva – sinterización y tostación – son cubiertas por el presente documento. Las operaciones de tostación y sinterización se cubren en dos áreas: - a) las que forman parte del proceso 2.5a) para producir el metal, -b) aquellas en las que la tostación y la sinterización se realizan independientemente, por ejemplo la tostación de molibdeno.

Hay interconexiones con el Sector Químico, pero existen temas específicos y diferencias que deben tenerse en consideración cuando estos procesos están asociados con la producción de metales o cuando se producen compuestos metálicos como subproductos de la producción de metal. Los siguientes procesos se incluyen en el ámbito de este trabajo:

La producción de productos de azufre como azufre básico, dióxido de azufre y ácido sulfúrico cuando está asociada con la producción de un metal no férreo. En el caso del ácido sulfúrico, se produce a partir del dióxido de azufre de los gases emitidos en las diversas etapas del proceso. La concentración de gas, la temperatura y las trazas contaminantes incluyen en el diseño del proceso y en la elección del catalizador.

- La producción de óxido de zinc a partir de vapores durante la producción de otros metales,

- La producción de compuestos de níquel a partir de las soluciones producidas durante la producción de un metal,
- La producción de CaSi y Si que tiene lugar en el mismo horno que la producción de ferrosilicio.
- La producción de óxido de aluminio a partir de bauxita antes de la producción de aluminio primario. Se trata de una etapa de pretratamiento, que puede realizarse en la mina o en la fundición. Es parte integral de la producción del metal cuando se realiza en la fundición y se incluye en el BREF.

La laminación, el trefilado y el prensado de metales no férreos, cuando están directamente integrados con la producción de metal, son objeto de un permiso y por consiguiente se incluyen en este documento. Los procesos de fundición no se incluyen en este trabajo y se cubrirán en otros documentos.

1.2 Visión General de la Industria

La Industria Europea de Metales No Férreos tiene una importancia económica y estratégica que trasciende lo que indican las estadísticas de empleo, capital y facturación. Por ejemplo, el cobre de alta pureza es esencial para la producción y distribución de energía, y pequeñas cantidades de níquel mejoran la resistencia a la corrosión del acero.

Los metales no férreos y sus aleaciones están en el corazón de la vida moderna, y muchos desarrollos de alta tecnología, particularmente en las industrias de la informática, electrónica, telecomunicaciones y transporte, dependen de ellos.

1.2.1 Metales no férreos y aleaciones

Todos los metales no férreos considerados en este documento y detallados en el punto 1.1 anterior tienen sus propias propiedades y aplicaciones individuales. Sin embargo, en algunos casos, como el cobre y aluminio, las aleaciones se utilizan en más aplicaciones que los metales puros, al haber sido diseñadas para tener una resistencia, tenacidad, etc. específica para los requisitos de aplicaciones particulares.

Los metales son inherentemente reciclables y pueden reciclarse una y otra vez sin perder ninguna de sus propiedades. De este modo suponen una contribución significativa al desarrollo sostenible. Normalmente no es posible distinguir entre un metal refinado producido a partir de materias primas primarias o secundarias, de uno producido sólo a partir de materias primas secundarias (ej. chatarra, etc.).

1.2.2 Ámbito de la industria

La producción de la industria se deriva de una gran variedad de materias primas primarias y secundarias. Las materias primas primarias se derivan de minerales que se extraen en minas y que luego se tratan antes de ser procesados metalúrgicamente para producir metal bruto. El tratamiento de los minerales se realiza cerca de las minas, al igual que, cada vez más, la producción de metales. Las materias primas secundarias son la chatarra y los residuos autóctonos.

En Europa, los yacimientos de minerales que contienen metales en concentraciones viables se han agotado progresivamente y quedan pocos yacimientos autóctonos. La mayor parte de concentrados se importan a Europa desde diversas procedencias de todo el mundo.

La producción de la industria es metal refinado o lo que se conoce como semifabricados,

como lingotes moldeados de metal y aleaciones metálicas o formas forjadas, extrusionadas, papel metálico, chapa, bandas, barras, etc.

En este Documento BREF no se han incluido las fundiciones no férreas que producen productos de metal moldeados, sino que son cubiertas por el Documento BREF sobre Talleres de Forja y Fundiciones. La recogida, clasificación y suministro de materias primas secundarias para la industria se basan en la industria de reciclaje de metales, que de nuevo no se considera en este BREF.

Aunque haya una aparente contradicción en los términos, la producción de ferroaleaciones, que se utilizan principalmente como aleaciones principales en la industria del hierro y el acero, se considera parte de la industria de metales no férreos. Sus elementos de aleación, como metales refractarios, cromo, silicio, manganeso y níquel, son todos metales no férreos.

El sector de los metales preciosos se considera asimismo como parte de la industria de metales no férreos a efectos del presente documento.

1.2.3 Estructura de la industria

La estructura de la industria varía de un metal a otro. No hay ninguna empresa que produzca todos, ni siquiera la mayoría de metales no férreos, aunque hay unas pocas compañías paneuropeas que producen varios metales, como cobre, plomo, zinc, cadmio, etc.

El tamaño de las empresas que producen metales y aleaciones metálicas en Europa va desde unas pocas empresas con más de 5000 empleados hasta gran número de empresas que tienen entre 50 y 200 empleados.

La propiedad varía entre grupos metalúrgicos paneuropeos y nacionales, holdings industriales, empresas públicas y compañías privadas.

1.2.4 Economía de la industria

Las estadísticas clave de la Industria Europea de Metales No Férreos definida a efectos del presente documento son:

Producción	18 - 20 millones de toneladas
Ventas	40.000 - 45.000 millones de €
Empleados	más de 200.000

Muchos metales no férreos refinados son valores internacionales. Los metales principales (aluminio, cobre, plomo, níquel, estaño y zinc) cotizan en uno o dos mercados de futuros, la Bolsa de Metales de Londres y Comex en Nueva York. Los metales denominados colectivamente como ‘menores’ no tienen un mercado central; sus niveles de precios vienen impuestos por productores o por comerciantes que operan en los mercados libres. En la mayoría de aplicaciones, los metales no férreos compiten con otros materiales, en especial las cerámicas, plásticos y otros metales férreos y no férreos.

La rentabilidad de cada metal o grupo de metales, y por lo tanto la viabilidad económica de la industria varía, tanto de forma absoluta como a corto plazo, según el precio actual del metal y una amplia gama de otros factores económicos.

No obstante, se aplica la regla económica general, es decir, que cuanto más se aproxima un material o producto a las condiciones del mercado global y al estado de valor internacional, menor es el beneficio sobre el capital invertido.

Existen pues importantes limitaciones en la disponibilidad de capital para inversiones no productivas en mejoras de protección medioambiental. Estas son normalmente parte del desarrollo y mejora general del proceso. Las inversiones den mejoras medioambientales y de proceso necesitan en general ser competitivas en un entorno global, ya que la industria europea está en competencia con plantas similares en otros países desarrollados o en vías de desarrollo.

1.2.5 Comportamiento medioambiental

Ha habido una mejora constante, y en algunos casos muy significativa, en el comportamiento medioambiental y la eficacia energética de la industria a lo largo de los últimos veinticinco años, desde la adopción de la Directiva 84/360/CEE 'Sobre el Control de la Contaminación de las Plantas Industriales'. El requisito de utilizar las Mejores Técnicas Disponibles para minimizar la contaminación ha sido bien asumido por la industria en la mayoría de Estados miembros.

El nivel de reciclaje de la industria no tiene parangón en ningún otro sector industrial.

1.3 Cobre y sus Aleaciones

1.3.1 Información general

El cobre se ha utilizado a lo largo de muchos siglos; tiene una muy elevada conductividad térmica y eléctrica y es relativamente resistente a la corrosión. El cobre usado puede reciclarse sin pérdida de calidad. Estas propiedades hacen que el cobre se utilice en diversos sectores como ingeniería eléctrica, automoción, construcción, instalaciones sanitarias, maquinaria, construcción naval, aeronáutica e instrumentos de precisión. El cobre se alea frecuentemente con Zn, Sn, Ni, Al y otros metales para formar diversas gamas de latones y bronces [tm 36, Panorama 1997].

La producción de Cu se basa en cátodos de cobre de calidad A, con un 99,95% de Cu. La designación de calidad A viene del vocabulario empleado en la Bolsa de Metales de Londres para cátodos y hace referencia a una norma British Standard. Esta ha sido sustituida recientemente por una Norma CEN Europea - EN 1978, en la que la calidad se designa como Cu CATH1 o, en el nuevo sistema alfanumérico europeo, como CR001A.

Las impurezas máximas tolerables en % son las siguientes:

- Ag 0,0025 - As 0,0005 - Bi 0,00020 - Fe 0,0010 - Pb 0,0005 - S 0,0015 - Sb 0,0004 - Se 0,00020
- Te 0,00020 con As+Cd+Cr+Mn+P+Sb 0,0015
- Bi+Se+Te 0,0003
- Se+Te 0,0003
- Ag+As+Bi+Cd+Co+Cr+Fe+Mn+Ni+P+Pb+S+Sb+Se+Si+Sn+Te+Zn 0,0065

1.3.2 Fuentes de materiales

El cobre refinado se produce a partir de materias primas primarias y secundarias en un número relativamente pequeño de refinerías de cobre: su producto es cátodo de cobre. Este producto se funde, alea y procesa para producir barras, perfiles, hilos, chapas, bandas, tubos, etc. Este paso puede estar integrado con la refinería, pero con frecuencia se realiza en otro centro.

Alrededor del 55% de los suministros de entrada a las refinerías de cobre se compran en el mercado internacional en forma de concentrados de cobre, cobre negro, ánodos o chatarra. El 45% restante procede de concentrados de cobre de procedencia nacional, así como de residuos o chatarra de cobre de origen nacional.

La UE cuenta con pocos recursos de cobre primario, pero sus actividades de metalurgia de cobre tienen gran importancia. La producción minera de cobre de cierta importancia sólo se da en Portugal (inicio de la actividad minera en Neves Corvo en 1989, 106.500 toneladas de cobre en 1997) y en Suecia (86.600 toneladas). Con unas 239.000 toneladas de cobre extraídas de minerales domésticos en 1997, la UE representa alrededor del 2% de la producción minera mundial de cobre.

La capacidad de refinado y de fabricación de semis se ha desarrollado en línea con los requisitos de su gran consumo, utilizando materias primas primarias importadas y chatarra tanto nacional como importada. El acceso a los suministros primarios se ha ido haciendo cada vez más difícil durante los últimos años, ya que los países con minas de cobre han desarrollado sus propias instalaciones de refinado cerca de sus minas, reduciendo con ello la disponibilidad de materias primas en el mercado internacional.

El reciclaje constituye un componente importante de los suministros de materias primas a las instalaciones de refinado y fabricación de cobre. En total, las materias primas secundarias representan alrededor del 45% del uso de cobre y sus aleaciones en Europa, bien en refinerías como la totalidad o parte de su material de entrada, bien utilizadas directamente por los fabricantes de semis.

La calidad de las materias primas secundarias varía enormemente, y muchas fuentes de estos materiales no son adecuadas para uso directo por los fabricantes de semis. Se recurre a la industria de la chatarra para el suministro de material de distintas calidades con la limpieza adecuada para la industria, y aunque hay especificaciones acordadas para chatarra, se registran amplias variaciones. Ello puede hacer necesario el uso de sistemas adicionales de tratamiento o eliminación.

1.3.3 Producción y consumo

La producción anual de cátodo de cobre en el momento de la redacción del presente documento es de 959.000 toneladas de fuentes primarias y de 896.000 toneladas de fuentes secundarias. El berilio no se produce en la UE y no se considera que esté presente en cantidades suficientes en la chatarra para plantear aspectos medioambientales.

Tres de las fundiciones secundarias y casi todas las fundiciones primarias han aumentado su producción. Este considerable aumento en la capacidad de producción se ha realizado simultáneamente con mejoras medioambientales. La chatarra de ordenadores y de placas de circuito impreso se están convirtiendo en fuentes secundarias cada vez más comunes, a pesar de que el contenido en cobre es bajo. La chatarra es pretratada por la industria de chatarra y por algunas fundiciones. Esto proporciona una salida para estos materiales.

El nivel de reciclaje es elevado, ya que el cobre puede ser reprocesado sin pérdida de sus propiedades intrínsecas y hay disponibles muchas materias primas secundarias. La actividad de refinado de cobre en la UE ha podido crecer principalmente gracias a la obtención de materias primas en el mercado internacional y al uso de chatarra de cobre o latón y residuos generados por consumidores y procesadores.

Los fabricantes de semis de cobre de la UE tienen una producción tres veces mayor que la producción de refinado de la UE. Se sirven del mercado internacional para obtener volúmenes adecuados de cobre y latón, junto con materiales de aleación (principalmente zinc, estaño y níquel). Esta parte de la industria es un exportador neto de unas 500.000 toneladas anuales.

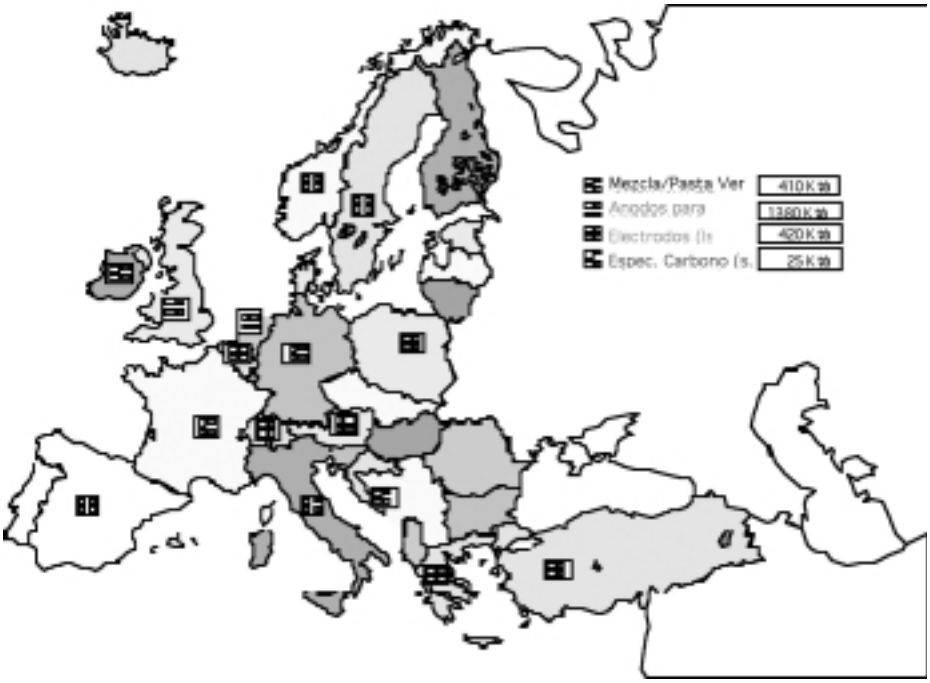


Figura 1.1: Producción mundial de cobre en 1997.

Tabla 1.1: Producción en la UE (y Estados Asociados Europeos) de cobre y sus aleaciones en miles de toneladas en 1997
La producción de mineral en Europa representa ~30% del material de entrada primario.

País	Producción minera	Cátodo primario (ánodo)	Cátodo secundario (ánodo)	Producción de Semis
Alemania		296	378	1.406
Austria			77	58
Bélgica		203 (35)	183 (126)	392
Dinamarca				
España	37	229 (+61)	63 (+28)	268
Finlandia	9	116 (171)		120
Francia		6	29	684
Grecia			81	
Holanda				
Irlanda				
Islandia				
Italia		6	80	990
Luxemburgo				
Noruega	7*	33		
Portugal	108			
Reino Unido	9	58	483	
Suecia	87	95	34	206
Suiza			70	

Notas: * La producción actual de mineral cesará en 2000.

1.3.4 Centros de producción

Hay diez grandes refinerías en la UE. Cinco de ellas utilizan materias primas primarias y secundarias, y las otras utilizan únicamente materias primas secundarias. Se estima que la industria de refinado de cobre empleaba a más de 7.500 personas en 1997. Tres empresas tienen capacidades superiores a las 250.000 toneladas de cátodo de cobre refinado por año: Atlantic Copper (E), Union Minière (B) y Norddeutsche Affinerie (D). Otras cuatro, MKM Hettstedt (D), Hüttenwerke Kayser (D), Boliden (SW) y Outokumpu (FIN), producen cada una más de 100.000 toneladas al año. La capacidad de producción en las otras instalaciones en Italia, España, Austria, Reino Unido y Bélgica están entre 35.000 y 100.000 de cátodo de cobre por año.

Hay muchas más empresas en el sector de fabricación de Semis. Aquí se utiliza cobre refinado y materias primas secundarias de alta calidad como materiales de entrada. En Europa hay unas 100 empresas, que dan empleo a unas 40.000 personas. El sector puede sufrir de un exceso de capacidad y es vulnerable a los movimientos cíclicos en la demanda. La demanda de cobre en la UE sigue el patrón de crecimiento lento de un mercado maduro.

El sector de alambrón eléctrico representa alrededor de la mitad de la producción de semis. Este sector cuenta con unas 20 empresas, que dan empleo a unas 3.000 personas. Una parte significativa de esta actividad está ligada al sector del cable como fuente integral de material de entrada (Alcatel, Pirelli, BICC etc.), mientras otra parte está vinculada al sector de refinería como fuente integral de material de salida (Deutsche Giessdraht, Norddeutsche Affinerie, Union Minière, Atlantic Copper etc.).

Hay muchas más empresas en la otra industria de fabricación de semis de cobre, que producen varillas, barras, hilos, perfiles, tubos, planchas, chapa y bandas de cobre y de aleaciones de cobre: en la UE hay unas 80 empresas que emplean a unas 35.000 personas. No obstante, el sector está dominado por tres grandes grupos: KME-Europa Metal (D), con actividades de fabricación principales en Francia, Alemania, Italia y España; Outokumpu (FIN) en Finlandia, Suecia, Holanda y España; y Wieland Werke (D) en Alemania. Otras importantes empresas independientes son Boliden (S), con plantas en Suecia, Holanda, Bélgica y el Reino Unido, Carlo Gnutti (I), e IMI (UK).

Durante las dos últimas décadas ha habido una considerable racionalización y consiguiente realización de inversiones en la industria del cobre en Europa. Esto ha sido en respuesta a la creación del mercado único en la UE y a presiones económicas, como el aumento de los costes energéticos, la necesidad de una inversión sustancial en la eliminación de la contaminación y a los cambios frecuentes en los tipos de cambio.

1.3.5. Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de cobre de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen un 98,9% de fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de cobre secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

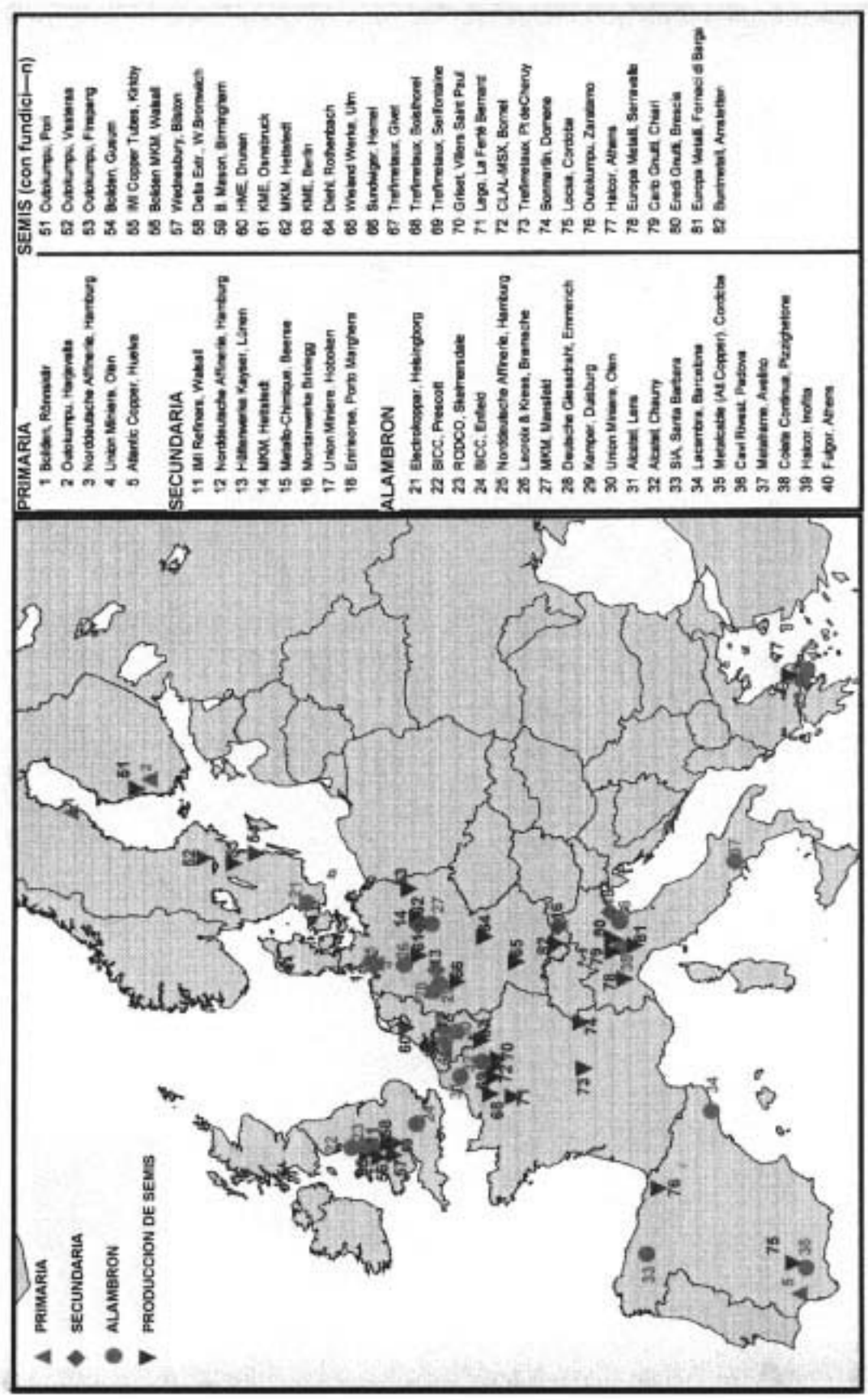


Figura 1.2: Centros de Producción Europeos.

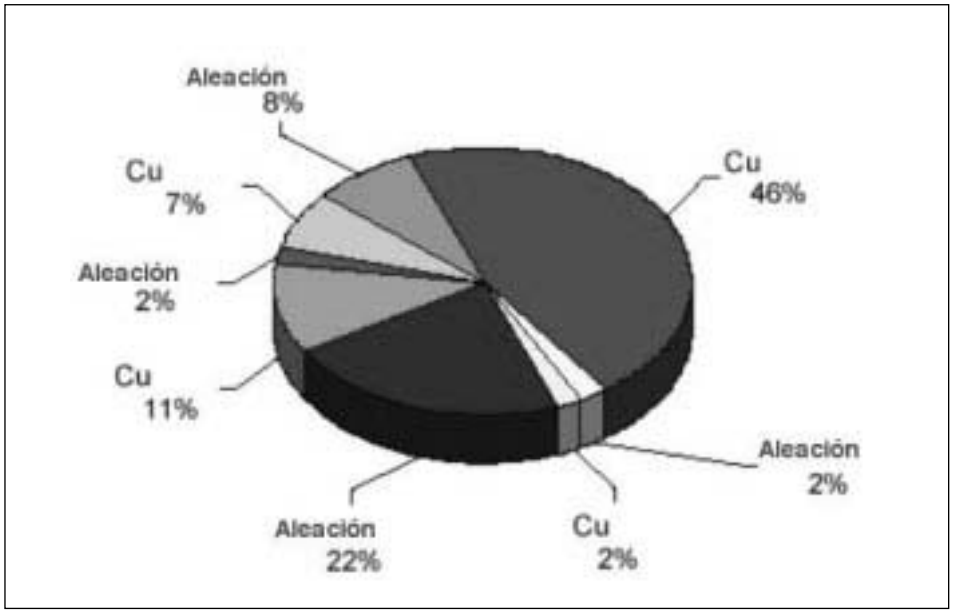


Figura 1.3: Producción de Semis de Cobre en 1995. Total 1995 = 4.700.000 toneladas.

Las emisiones fugitivas o no capturadas son también un tema que está adquiriendo importancia para la producción primaria y secundaria. Se requiere un cuidadoso diseño de plantas y procesos para capturar los gases de proceso.

El control de emisiones al aire y el agua derivadas de la producción de hilo-barra de cobre y de semis de cobre y de aleación de cobre está bien desarrollado. El control de emisiones de monóxido de carbono de los hornos de cuba, especialmente los que operan en condiciones reductoras, se consigue mediante la optimización de los quemadores.

El reciclaje constituye un importante componente de los suministro de materias primas de las instalaciones de refinado y fabricación de cobre. El cobre puede recuperarse de la mayor parte de sus aplicaciones y devolverse al proceso de producción sin pérdida de calidad en el reciclaje. Al disponer de un acceso muy limitado a fuentes primarias propias de cobre, la industria de la UE ha prestado tradicionalmente mucha atención a las denominadas “minas de superficie”, que se basan en gran medida en la chatarra para reducir el gran déficit de su balanza comercial de materias primas de cobre.

Casi el 100% de la chatarra de cobre nueva o procesada se recicla, y según algunos estudios se ha estimado que el 95% de la chatarra de cobre antigua que se halla disponible es también reciclada.

Globalmente, las materias primas secundarias representan la producción de alrededor del 45% del cobre de la UE, pero en algunos casos, como las varillas de latón, el producto se fabrica por completo a partir de cobre y latón reciclados, con tan sólo un pequeño aporte de zinc primario.

La industria del cobre de la UE ha desarrollado tecnologías avanzadas y ha realizado considerables inversiones para poder procesar una amplia gama de chatarra de cobre, incluidos residuos complejos de baja calidad, y para cumplir al mismo tiempo con limitaciones medioambientales cada vez más restrictivas.

La capacidad de la industria para aumentar su índice de reciclaje depende de una serie de factores complejos.

1.4 Aluminio

1.4.1 Información General

El aluminio [tm 36, Panorama 1997] es un material con una amplia gama de aplicaciones, en las industrias del transporte, la construcción y el envasado, el sector eléctrico, en todos los sistemas de distribución de electricidad de alta tensión, electrodomésticos, y en los sectores mecánico y agrícola. Es ligero, tiene una buena conductividad eléctrica y forma una capa de óxido superficial cuando se expone al aire que impide una mayor corrosión. El aluminio es muy reactivo, particularmente en forma de polvo, y se utiliza en reacciones aluminotérmicas para producir una serie de otros metales.

La industria del aluminio es la más joven y la mayor de las industrias de metales no férreos, la fundición de aluminio comenzó hace tan sólo un siglo. La industria del aluminio de la UE da empleo directo a unas 200.000 personas, y su facturación anual es del orden de 25.000 millones de €. La producción total de metal sin forjar ascendió a 3,9 millones de toneladas en 1997. Alrededor del 43% de esta producción procesa chatarra reciclada, un porcentaje en constante aumento.

1.4.2 Fuentes de materiales

El aluminio primario de produce a partir de bauxita y se convierte en alúmina. 100 toneladas de bauxita producen 40 - 50 toneladas de alúmina (óxido de aluminio), que a su vez producen 20 - 25 toneladas de aluminio. La mayor parte de la bauxita se obtiene en minas fuera de Europa, pero hay varias instalaciones de producción de alúmina en Europa.

La industria secundaria depende de las fuentes de chatarra. La chatarra puede clasificarse en "Chatarra Nueva", que se genera durante la producción y fabricación de productos forjados y moldeados, o "Chatarra Antigua", que se recupera de artículos al término de su vida útil. El índice de reciclaje de "Chatarra Nueva" es del 100% de la cantidad producida. El suministro de materias primas a la industria primaria y secundaria de la UE es atendido principalmente por la producción interna de alúmina y el reciclaje de chatarra. No obstante, la producción total de metal no logra cubrir las necesidades de la industria de proceso y en la actualidad cubre sólo un 55% de la demanda de la UE.

1.4.3 Producción y consumo

La industria europea del aluminio incluye minería y producción de alúmina, fundición primaria y secundaria y proceso del metal en productos semiacabados (ej. barras, perfiles, hilos, chapas, láminas, tubos, conductos) o productos especializados (ej. polvos, aleaciones especiales).

Tabla 1.2. Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas)

Zona	Producción	Consumo
Europa	3.216	5.603
EE.UU.	3.603	5.390
Rusia	2.907	509
Canadá	2.327	642
China	1.776	2.013
Australia	1.495	362
Brasil	1.189	479
Venezuela	643	193

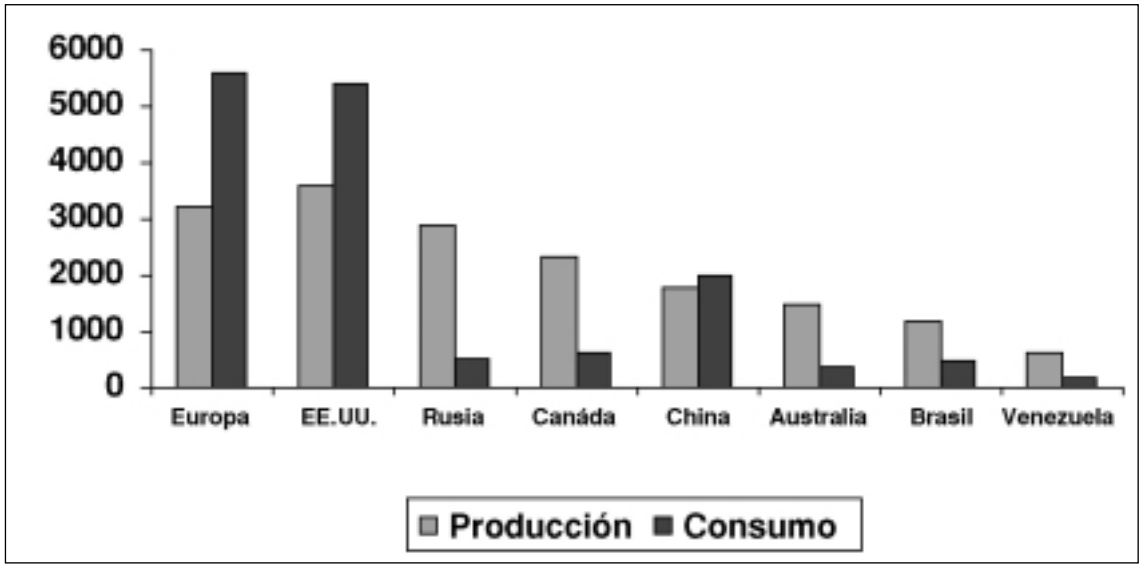


Figura 1.4: Producción de aluminio primario por países en 1997 (miles de toneladas).

Muchas de estas actividades están integradas, aunque una serie de fabricantes de la UE centran su actividad sólo en un segmento particular, como el reciclaje y la fundición secundaria o la fabricación de semis.

La UE representó el 10% de la producción mundial total en 1997. La producción de aluminio a partir de materias primas secundarias en la UE es una de las mayores del mundo, con 1,7 millones de toneladas en 1997, lo que representa el 23% de la producción de materiales reciclados de los países occidentales.

1.4.4. Centros de producción

Al principio de 1998, en la UE operaban veintidós fundiciones primarias de aluminio, y otros 8 en los estados europeos asociados. El número de empresas productoras es, de hecho, mucho menor: las principales son Aluminium Pechiney (F), VAW aluminium (D), Alcoa España (E), Alcoa Italia (I), Hoogovens (NL), British Alcan (UK), Hydro (N) y Alusuisse (CH). Algunas de estas empresas explotan plantas en distintos países europeos o tienen filiales o sucursales en otras partes del mundo, o son parte de grupos multinacionales.

El número de empresas involucradas en la producción secundaria de aluminio es mucho mayor. Existen unas 200 empresas cuya producción anual de aluminio secundario es de más de 1000 toneladas al año [tm 116, Alfed 1998]. Hay una buena integración de la actividad de laminación en los procesos de producción, aunque la industria de la extrusión está mucho menos integrada, con unos 200 centros de producción diseminados por el territorio de la UE.

Tabla 1.3: Producción europea de aluminio en 1997

País	**Producción de Bauxita** en miles de toneladas	**Producción de Aluminio** en miles de toneladas	**Aluminio Primario** en miles de toneladas	**Aluminio Secundario** en miles de toneladas	**Producción de Semis**
Alemania		750	572	433	1.797
Austria				98	189
Bélgica					353
Dinamarca				14	18
España		1.110	360	154	330
Finlandia				33	35
Francia		600	399	233	741
Grecia	2.211	640	133	10	213
Holanda			232	150	200
Irlanda		1.250			
Islandia			123		
Italia		880	188	443	862
Luxemburgo					
Noruega			919	59	250
Portugal				3	
Reino Unido		120	248	257	507
Suiza			27	6	131
Suecia			98	26	131
Total Europa	2.211	5.350	3.216	1.803	5.757

1.4.5 Aspectos medioambientales

Los principales aspectos medioambientales de la producción de aluminio primario son la producción de hidrocarburos polifluorados y fluoruros durante la electrólisis, la producción de residuos sólidos de las células y la producción de residuos sólidos durante la producción de alúmina. De forma similar, para la producción de aluminio secundario existen posibles emisiones de polvo y dioxinas de hornos mal mantenidos o con mala combustión, así como la producción de residuos sólidos (escoria salina, revestimientos de hornos consumidos, escorias y polvo de filtros). La industria ha hecho progresos en la reducción de estas emisiones. En los últimos quince años se han reducido en un factor entre cuatro y diez, según el tipo de emisión y el proceso empleado.

El principal coste de la producción de aluminio primario es la electricidad, por lo que la producción tiende a concentrarse en lugares donde hay disponible electricidad a bajo coste, lo que influye en la distribución de los centros. La industria europea del aluminio ha realizado esfuerzos considerables por reducir su consumo de electricidad, rebajándolo desde 17 kWh por kg producido en 1980 a 15 kWh por kg en 1998. La producción y refinado de aluminio secundario requiere mucha menos energía y consume menos del 5% de la energía necesaria para producir aluminio primario.

Existen muchas iniciativas para mejorar la reutilización de la chatarra de aluminio, y la industria tiene un papel activo en este campo. El reciclaje de latas de bebidas usadas (LBUs) es un ejemplo de ello. El material recogido se recicla en un circuito cerrado para producir más latas de bebidas con la misma especificación de aleación. La industria secundaria presta mucha atención a producir la correcta composición de aleación, y la clasificación previa de los tipos de chatarras es importante. Un ejemplo de ello es la segregación de la chatarra de extrusión para preservar la aleación particular.

1.5 Zinc, Plomo y Cadmio

1.5.1 Zinc

1.5.1.1 Información General

El zinc [tm 36, Panorama 1997; tm 120, TU Aachen 1998] es el tercer metal no férreo más utilizado, después del aluminio y el cobre. Tiene un punto de fusión relativamente bajo y se utiliza en la producción de una serie de aleaciones, como el latón. Puede aplicarse fácilmente en la superficie de otros metales como el acero (galvanización), y cuando se utiliza como recubrimiento metálico, el zinc se corroe preferentemente como recubrimiento de sacrificio. El zinc se utiliza asimismo en las industrias farmacéutica, alimenticia, de la construcción, de pilas y baterías y química.

Tabla 1.4: Usos del zinc en el Mundo y en Europa

Uso comercial del zinc	Mundo 1975 [%]	Mundo 1984 [%]	Mundo 2005 [%]	Europa 1995 [%]
Galvanización	38.0	48.5	54.8	43
Latón	19.8	17.6	16.6	23
Colada a presión	18.3	14.3	10.5	13
Productos semiacabados	8.5	7.3	6.4	12
Productos químicos	12.7	9.6	8.0	8
Otros	2.8	2.7	3.7	1

El zinc se suministra al mercado en diversas calidades, la calidad más alta es la calidad especial (SGH) o Z1, que contiene un 99.995% zinc, mientras que la calidad más baja es la calidad ordinaria (GOB) o Z5, con una pureza de alrededor del 98%. Se fabrican productos de extrusión, como barras, varillas e hilos (principalmente de latón); productos laminados como láminas y bandas; aleaciones moldeadas; y polvos y compuestos químicos, como óxidos.

Entre los usos finales hay una amplia gama de aplicaciones, la más importante de las cuales es la protección del acero contra la oxidación en los sectores de automoción, electrodomésticos y construcción. Las aleaciones de zinc (ej. latón, bronce, aleaciones de moldeo a presión) y los semis de zinc son respectivamente la segunda y tercera áreas principales de consumo, con aplicaciones también en los sectores de construcción, electrodomésticos y automoción.

Tabla 1.5: Calidades de zinc primario.

Clasificación de Calidades	Código de Color	Contenido Nominal de Zinc	1 Pb máx.	2 Cd* máx.	3 Fe máx.	4 Sn máx.	5 Cu máx.	6 Al máx.	Total de 1 a 6 máx.
Z1	blanco	99,995	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005
Z2	amarillo	99,99	0,005	0,005	0,003	0,001	0,002	–	0,01
Z3	verde	99,95	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	–	0,05
Z4	azul	99,5	0,45	0,01	0,05	–	–	–	0,5
Z5	negro	98,5	1,4	0,01	0,05	–	–	–	1,5

Notas:
* Durante un periodo de cinco años a partir de la fecha de ratificación de este estándar, el contenido máximo de Cd de las calidades Z3, Z4 y Z5 será de 0,020, 0,050 y 0,050 respectivamente.

Tabla 1.6: Calidades de zinc secundario.

Calidad	Contenido Nominal	1 Pb de Zinc	2 Cd máx.	3 Fe máx.	4 Sn máx.	5 Cu máx.	6 Al máx.	Total de 1 a 6 máx.	Comentarios
ZS1	98,5	1,4	0,05	0,05	*)	…	…	1,5**)	Calidades producidas
ZS2	98	1,6	0,07	0,12	*)	–	–	2,0**)	principalmente por
ZS3	97,75	1,7	0,09	0,17	–	–	–	2,25	reciclado de chatarra y productos usados.
ZSA	98,5	1,3	0,02	0,05	–	–	–	1,5	Calidad compuesta principalmente de Zn con residuos, cenizas.

Notas:

*) Sn máx 0,3% para producción de latón, 0,7% para galvanización. Cuando está presente a estos niveles, el contenido real de Zn puede ser menor que el contenido nominal.

**) Excluido Sn cuando está presente a los niveles indicados en *).

1.5.1.2 Fuentes de materiales

El metal se produce a partir de una gama de concentrados de zinc por procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Algunos concentrados contienen elevadas proporciones de plomo, y este metal también se recupera. El zinc también se asocia con el cadmio, y los concentrados son una fuente de este metal.

Los concentrados de la UE solían cubrir más del 45% de los requisitos de las refinerías hace 10 años, pero ahora representan sólo menos del 25% de los mismos. El déficit se compensa con un aumento de las importaciones, ya que la capacidad de producción minera está aumentando actualmente en Norteamérica, Australia y algunos países de Sudamérica.

Las materias primas secundarias como residuos de galvanización (cenizas, escorias superficiales, lodos, etc.), el polvo de combustión de las plantas de acero y la chatarra de proceso de latón y de moldeo a presión son también fuentes de zinc. La producción de metal de fuentes secundarias supuso más del 8% de la producción total de zinc refinado en la UE en 1994. El reciclaje de zinc y de productos que contienen zinc es un tema clave para la industria.

1.5.1.3 Producción y consumo

La producción minera de la UE se realiza principalmente en Irlanda y España y fue de 383.000 toneladas de concentrados de zinc en 1994. Este valor supuso una reducción desde las 397.000 toneladas en 1993, debido al agotamiento de las reservas y a la menor calidad de los minerales de algunas explotaciones mineras. La producción de metal retrocedió por debajo de 1,8 millones de toneladas, valor que se había sobrepasado en 1992, mientras que el consumo de zinc refinado aumentó desde 1.640.000 toneladas a 1.770.000 toneladas, lo que representa el 30% de la demanda de zinc en los países de economía de mercado.

La UE es el líder mundial en la producción de zinc, muy por delante de Canadá y Japón, que están en segundo y tercer lugar respectivamente. En 1994, la producción de la UE fue de 1.749.000 toneladas de metal, lo que representó casi un 33% del total de los países con economía de mercado, que fue de 5.376.000 toneladas. La UE es también la zona de mayor consumo de zinc entre los países con economía de mercado. Las 1.770.000 toneladas de zinc consumidas en 1994 superaban en un 49% al segundo mercado de consumo (EE.UU.) y en un 145% al tercero (Japón).

Tabla 1.7: Producción de concentrados de zinc [tm 36, Panorama 1997]

País	Producción en 1992 (en miles de toneladas)	Producción en 1993 (en miles de toneladas)	Producción en 1994 (en miles de toneladas)
Canadá	1.325	1.004	1.008
Australia	1.014	1.007	928
Perú	626	668	682
EE.UU.	551	513	601
Unión Europea	500	411	383

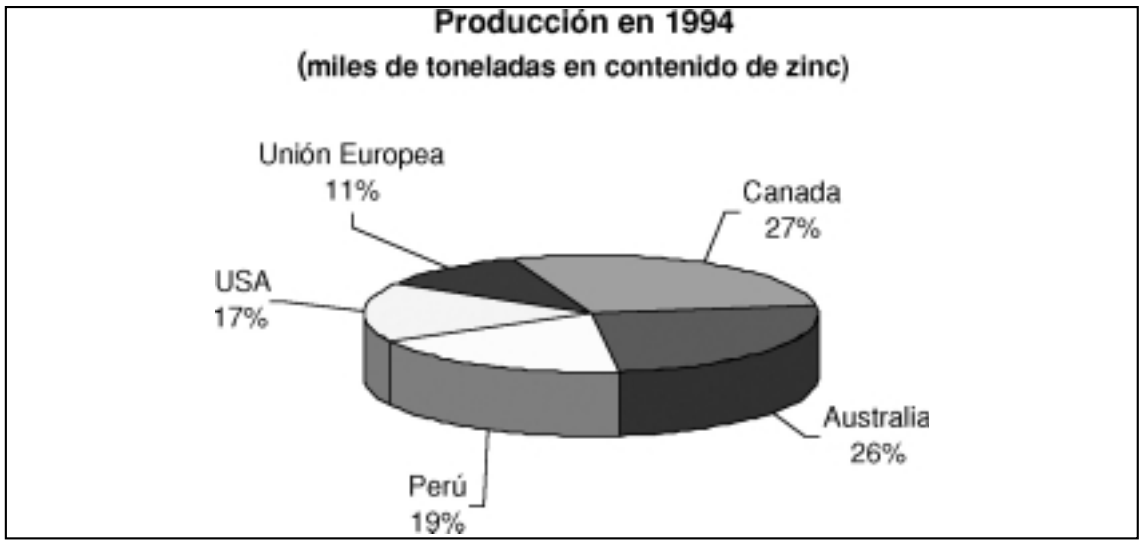


Figura 1.5: Producción mundial de zinc a partir de concentrados en 1994.

Tabla 1.8: Producción de zinc refinado

País	Producción en 1992 (en miles de toneladas)	Producción en 1993 (en miles de toneladas)	Producción en 1994 (en miles de toneladas)
Unión Europea	1.844	1.819	1.749
Canadá	672	662	693
Japón	729	696	666
EE.UU.	400	382	356
Australia	333	317	318
CSI		431	390

1.5.1.4 Centros de producción

El zinc se produce mediante los procesos de tostación, lixiviación y electro-recuperación en el proceso de destilación con Horno de Fundición Imperial. Las siguientes tablas muestran el emplazamiento y las capacidades de los centros en la UE.

Tabla 1.9: Principales productores europeos en capacidad anual, 1994

País	Empresa	Emplazamiento	Proceso	Capacidad [t/a]
Bélgica	Union Minière	Balen-Wezel	E	200000
Alemania	Ruhr-Zink	Datteln	E	96000
	MIM Hüttenwerke Duisburg	Duisburg-Wanheim	HFI-RC	100000
	Metaleurop Weser Zink	Nordenham	E	130000
España	Asturiana de Zinc	Sun Juan de Nieva	E	320000
	Española del Zinc	Cartagena	E	60000
Francia	Union Minière Francia	Auby	E	220000
	Metaleurop	Noyelles Godault	HFI-RC	100000
Finlandia	Outokumpu Zinc Oy	Kokkola	E	175000
Italia	Enirisorse	Porte Vesme (Sardegna)	HFI-RC	75000
		Porte Vesme (Sardegna)	E	100000
	Pertusola Sud	Crotone (Calabria)	E	80000
Holanda	Budelco (Pasminco)	Budel-Dorplein	E	210000
Noruega	Norzink		E	140000
Reino Unido	Britannia Zinc (MIM Holdings)	Avonmouth	HFI-RC	105000

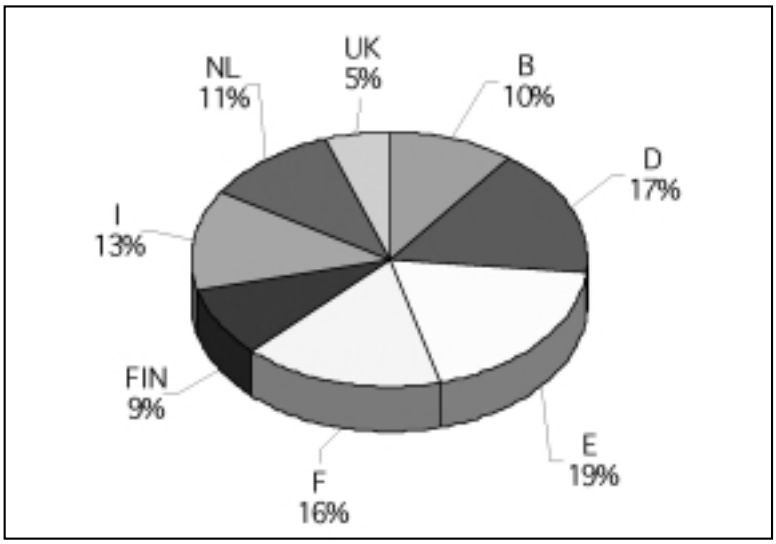


Figura 1.6: Producción de zinc metal en la UE (1994).

1.5.1.5 Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de zinc de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen una elevada fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

La lixiviación del calcinado y otros materiales produce una solución que contiene hierro. La eliminación del hierro produce importantes cantidades de residuo sólido que contiene una serie de metales. El desecho de este residuo debe hacerse con un estándar muy elevado de contención y control.

Las emisiones fugitivas de la tostación y calcinación son también muy importantes y deben considerarse para todas las etapas del proceso. Las emisiones fugitivas y nieblas ácidas de la electro-recuperación de zinc son un ejemplo particular de ello.

El zinc y los productos que lo contienen pueden reciclarse en gran medida. Las estimaciones basadas en el consumo histórico y los ciclos vida de los productos indican que se ha alcanzado un índice de recuperación del 80% del zinc recuperable. El sistema de reciclaje del zinc está muy avanzado, no sólo como zinc metal, sino también en distintas formas.

1.5.2 Plomo

1.5.2.1 Información General

El plomo [tm 36, Panorama 1997] es el metal pesado más abundante en la corteza terrestre, y se ha utilizado desde hace muchos siglos. Se encuentra en forma de minerales de galena pura o actualmente más en minerales mixtos en los que está asociado con zinc y pequeñas cantidades de plata y cobre. El plomo es un metal blando, tiene un bajo punto de fusión y es resistente a la corrosión. Estas propiedades le dan un gran valor funcional, tanto en su forma pura como en aleaciones y compuestos.

El plomo se clasifica en términos de la composición del producto. La tabla siguiente muestra la composición química del plomo de acuerdo con la nueva Norma Europea.

Tabla 1.10: Calidades de plomo

Calidad desig-nación	Pb mín.	1 Bi máx.	2 Ag máx.	3 Cu máx.	4 Zn máx.	5 Ni máx.	6 Cd máx.	7 Sb máx.	8 Sn máx.	9 As máx.	Total de 1 al 9 máx.
PB 990	99,990	0,010	0,0015	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,010
PB 985	99,985	0,015	0,0025	0,0010	0,0002	0,0005	0,0002	0,0005	0,0005	0,0005	0,015
PB 970	99,970	0,030	0,0050	0,0030	0,0005	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,030
PB 940	99,940	0,060	0,0080	0,0050	0,0005	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,060

Notas: La norma alemana DIN 1719 es la base de la nueva Norma Europea EN 12659,

Ha habido grandes cambios en la forma de uso del plomo. La industria de las baterías crea alrededor del 70% de la demanda y es bastante estable, pero otros usos del plomo, como los pigmentos y compuestos, la protección contra la radiación, los productos laminados y de extrusión para el sector de la construcción, el blindaje de cables, los proyectiles o los aditivos para la gasolina, están en declive.

Tabla 1.11: Usos del plomo en el mundo

Uso comercial	1973 %	1983 %	1993 %	1994 %
Baterías	38	48	56	59
Productos químicos	24	27	22	22
Productos semiacabados y moldeo	17	17	16	16
Cables	15	5	2.5	2.0
Aleaciones	2	3	1.1	0.8
Otros	4	–	1.6	0.2

1.5.2.2 Fuentes de materiales

El plomo refinado se deriva del material primario en forma de minerales y concentrados de plomo, y de materiales secundarios en forma de chatarra y residuos. La producción primaria requiere la fusión de minerales que contienen plomo para producir un lingote de plomo que luego se refina. La economía de la producción de mineral de plomo primario está ligada al contenido de planta y zinc de los minerales. La producción del plomo metal requiere el tratamiento del contenido de azufre de los minerales a tratar para producir ácido sulfúrico. La mayoría de fundiciones primarias de plomo llevan asociado un proceso de refinado complejo, así como procesos asociados para recuperar el contenido de plata en forma de una aleación de Ag-Au. El refinado primario está por consiguiente ligado a la economía de la extracción de minerales de plomo-zinc. El contenido en zinc y plata de los minerales es la principal fuente de beneficios.

La UE dispone de escasos recursos mineros de plomo, pero la producción de plomo es una industria grande e importante. Durante los últimos diez años, el consumo y la producción de la UE han experimentado sólo un crecimiento modesto, lo que ha producido una reducción de la cuota de la UE en los mercados mundiales.

La industria de refinado secundario suministra en la actualidad más del 50% del plomo consumido. Las baterías ácidas de plomo de los automóviles son la principal fuente de chatarra para el refinado secundario. La industria realiza pasos decididos para alentar el reciclaje de estas baterías, por lo que este porcentaje aumenta a medida que aumenta el parque automovilístico mundial y aumenta el índice de reciclaje de baterías antiguas. La producción secundaria puede también requerir instalaciones de refinado si las materias primas secundarias contienen compuestos indeseados.

1.5.2.3 Producción y consumo

La producción de plomo de la UE es alta, ocupando el primer lugar entre los países con economía de mercado con 1.398.000 toneladas en 1994, de las que un 52% se produjeron a partir de materias primas secundarias. La industria responde a la preocupación medioambiental recuperando cantidades cada vez mayores de plomo, por lo que la producción primaria decae progresivamente.

La UE es el territorio de mayor producción de plomo en todo el mundo, por delante de Estados Unidos. En 1994, estas dos regiones representaron el 59% de la producción total refinada de los países con economía de mercado, que fue de 4,5 millones de toneladas. El Reino Unido, Alemania, Francia e Italia son los principales productores y, en promedio, el 49% de su producción se basa en materias primas secundarias. La media de la UE del 52% en este aspecto es considerablemente inferior al 72% de los EE.UU., que es la más alta del mundo, pero se mantiene bastante por encima de cualquier otro país de economía de mercado.

La UE es segunda tras Estados Unidos en cuanto a consumo, representando el 28% del consumo de plomo de los países con economía de mercado en 1994, mientras que la cuota de EE.UU. está cercana al 30%. Los cuatro principales Estados miembros productores de la UE son también el principal mercado de consumo.

1.5.2.4 Centros de producción

Dentro de la UE hay 7 grandes fundiciones/refinerías cuya capacidad de producción está entre 40.000 y 245.000 toneladas anuales. Las principales refinerías son principalmente multinacionales y se encuentran distribuidas en el Reino Unido (Britannia refined metals), Francia (Metaleurop), Alemania (Ecobat, Metaleurop), Bélgica (Union Minière) e Italia

(Enirisorse). Todas las plantas funden concentrado de plomo o de plomo/zinc antes de refinar lingotes de plomo, y también refinan lingotes brutos de otras fuentes para recuperar los metales preciosos. Britannia refined metals refina asimismo lingotes brutos de plomo importados de su casa matriz MIM en Australia. Con la excepción de Union Minière, todas estas refinerías primarias realizan asimismo reciclaje/refinado secundario.

La industria secundaria se caracteriza por un gran número de pequeñas refinerías, muchas de las cuales son independientes. En la UE hay unas treinta fundiciones/refinerías con producciones entre 5.000 y 65.000 toneladas anuales. Reciclan y refinan chatarra generada en su región local. El número de estas refinerías se está reduciendo, ya que las grandes compañías multinacionales, así como los principales grupos fabricantes de baterías, adquieren las instalaciones secundarias de menor tamaño o abren sus propias instalaciones nuevas de reciclaje.

Tabla 1.12: Capacidades anuales de los procesos de plomo en Europa.

País	Capacidad anual de altos hornos de plomo* t/a	Capacidad anual de fundición directa* t/a	Capacidad anual hornos rotatorios secundarios t/a	Capacidad total de refinado de plomo t/a
Austria			32.000	32.000
Bélgica	115.000		20.000	175.000
Francia	110.000		162.000	299.000
Alemania	35.000	220.000	130.000	507.000
Grecia			12.000	12.000
Italia		90.000	125.000	235.000
Holanda		20.000	20.000	
España	14.000		62.000	76.000
Suecia	50.000	65.000		155.000
Reino Unido		40.000 (capacidad de refinado 200.000 t/a)	107.000	307.000

Notas:
* Materias primas primarias y/o secundarias.

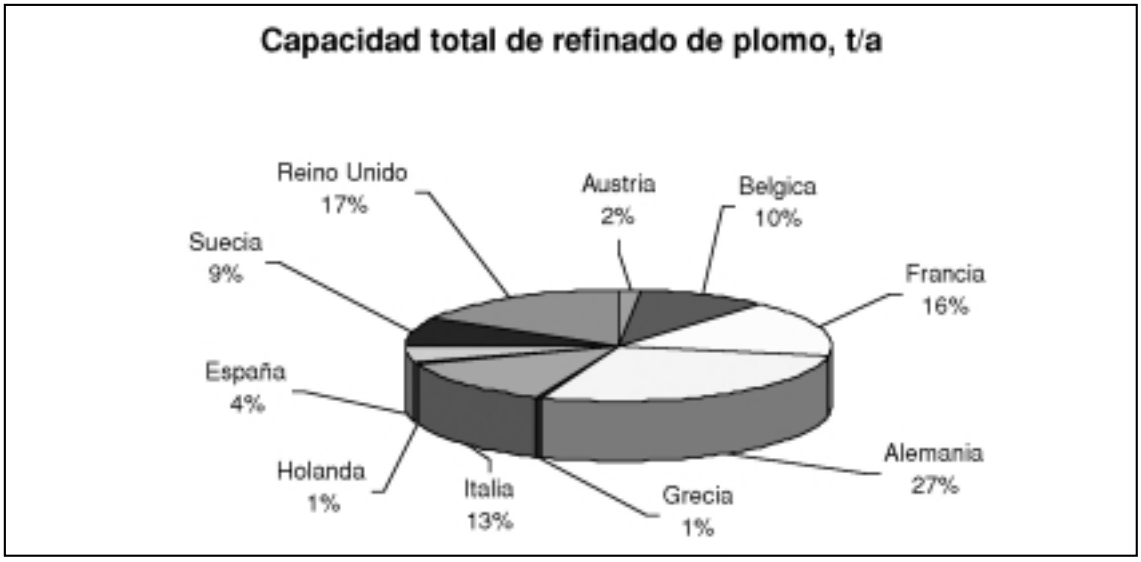


Figura 1.7: Capacidad de refinado de plomo en Europa.

1.5.2.5 Aspectos medioambientales

Históricamente, el principal problema medioambiental asociado con la producción de plomo de fuentes primarias era la emisión de dióxido de azufre al aire de la tostación y fusión de concentrados de sulfuro. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen una elevada fijación de azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de plomo secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

El plomo es objeto de gran preocupación medioambiental y muchos compuestos de plomo están clasificados como tóxicos. Normalmente, la política general es restringir las emisiones a los mínimos niveles practicables dado el estado de la tecnología, procediéndose al reciclaje cuando es apropiado y económico. La mayoría de medidas de control tienen por misión reducir la exposición humana (las emisiones de plomo afectan mucho a las personas), aunque hay ciertos casos en los que los animales pueden estar expuestos al plomo en el medio ambiente.

La legislación medioambiental requiere inversiones para reducir las emisiones atmosféricas con plomo. En años recientes se han desarrollado y aplicado nuevas tecnologías que ofrecen métodos más eficaces para la fundición de concentrados de plomo. Estos procesos han reducido asimismo las emisiones al medio ambiente. Los procesos existentes se han mejorado utilizando modernos sistemas de control y eliminación.

Las baterías, que suponían el 52% del consumo de plomo en la UE en 1994, se reciclan con una eficacia de más del 90%.

Los reglamentos relativos al plomo se dividen en tres categorías principales: exposición laboral, emisiones (calidad del aire ambiente) y controles en el agua y productos alimentarios. La exposición laboral se trata en la Directiva de la UE 82/605/CEE del 28 de julio de 1992, sobre la protección de los trabajadores respecto a los riesgos de relacionados con la exposición al plomo metálico y a sus compuestos iónicos en el trabajo. Esta directiva establece límites al nivel de plomo en el aire en el lugar de trabajo y en ciertos indicadores biológicos que reflejan el nivel de exposición de los trabajadores. Los valores límite se complementan con reglamentos sobre la protección del personal, que regulan el uso de equipos de protección, máscaras e instalaciones de lavado, o reglamentos específicos sobre alimentos, bebidas, tabaco, etc.

El plomo en la atmósfera general está limitado por la directiva 82/844/CEE del 3 de diciembre de 1982, que establece un límite a los niveles de plomo en el aire en toda la UE. Estos valores límite están siendo objeto de revisión en la actualidad. Los niveles de plomo en el agua se controlan asimismo en una serie de directivas relativas al agua atendiendo a su tipo y uso, como agua destinada al consumo humano, agua para instalaciones sanitarias, aguas de pesca, etc.

1.5.3 Cadmio

1.5.3.1 Información General

El cadmio pertenece al subgrupo del zinc en la tabla periódica de los elementos y fue descubierto por Strohmeyer in 1817 durante una investigación con $ZnCO_3$. Está asociado con el zinc en minerales en una relación Cd:Zn de 1:200. Físicamente es similar al zinc pero es más

denso, blando y puede pulirse. A diferencia del zinc, es también resistente a los álcalis. El cadmio es un buen absorbente de neutrones y por consiguiente se emplea con frecuencia en reactores nucleares.

En sus compuestos tiene un estado de oxidación de 2^+. El cadmio se encuentra ampliamente distribuido en el mundo, con una concentración entre 0,1 y 1 ppm en la capa vegetal superior.

1.5.3.2 Fuentes de materiales

Sólo hay unos pocos minerales de cadmio, como la Greenockita (CdS) o la Otavita ($CdCO_3$), o el mineral de CdO. Ninguno de estos minerales es importante desde el punto de vista industrial. Los minerales de zinc, que contiene cadmio como componente isomórfico a concentraciones de alrededor del 0,2% tienen importancia económica para la recuperación del cadmio. Además, los minerales de plomo y de cobre pueden contener pequeñas cantidades de cadmio.

1.5.3.3 Producción y consumo

A diferencia de otros metales pesados, el cadmio ha sido refinado y utilizado en épocas relativamente recientes; su producción y uso han aumentado sólo durante los últimos 40 - 50 años. Sus principales usos hoy son:

- recubrimientos de cadmio por electroplastia,
- pilas de níquel-cadmio,
- algunos pigmentos y estabilizantes para plásticos,
- aleaciones para soldadura, en protección antiincendios, para barras de control en reactores nucleares, para conductores eléctricos.

Se utilizan pequeñas cantidades para paneles solares.

Desde 1970, la producción de cadmio en occidente se ha mantenido bastante constante entre 12.000 y 16.000 t/a. La producción mundial es de unas 20.000 t/a. El uso de cadmio en diversas aplicaciones ha variado desde 1970 y se ha visto afectado por factores técnicos, económicos y medioambientales. Esto ha influido en los precios del metal. Los precios del metal en los setenta alcanzaron los 3 $USA/lb, y en los ochenta oscilaron entre 1,1 y 6,9 $USA/lb. Desde entonces, el precio del cadmio cayó hasta 1 $USA/lb, bajando incluso hasta 0,45 $USA/lb, lo que equivale al nivel de precios del zinc.

Los principales países productores y consumidores se muestran en la tabla 1.13:

Tabla 1.13: Principales productores y consumidores de cadmio en 1996

País	Producción t/a	Consumo t/a
Canadá	2.832	107
Japón	2.357	6.527
Bélgica	1.579	2.017
RP China	1.300	600
Estados Unidos	1.238	1.701
Alemania	1.145	750
Finlandia	600	-
Francia	205	1.276

El cadmio se recupera:

- De la recuperación pirometalúrgica de Pb-Cu en el polvo de combustión de la operación de fundición.
- De la recuperación pirometalúrgica de Pb-Zn en el polvo de combustión de las operaciones de sinterización / tostación y del zinc bruto.

Los polvos de combustión se lixivian generalmente con H_2SO_4 para separar el cadmio que luego se precipita como $CdCO_3$ o se reduce a esponja de cadmio con más del 90% de cadmio. La esponja puede fundirse con NaOH o destilarse al vacío, o disolverse y electrolizarse para producir cadmio de gran pureza [≥ 99,99% de cadmio].

El zinc bruto puede destilarse en columnas New Jersey para producir zinc puro y una aleación de Cd-Zn con más de un 60% de cadmio. La aleación de CD/Zn de la destilación New Jersey debe destilarse dos veces para poder producir cadmio puro.

Existe reciclaje, pero muy pocas empresas lo realizan. Principalmente consiste en el reciclaje de baterías usadas para recuperar cadmio y Ni.

1.5.3.4. Aspectos medioambientales

El estatus de los compuestos de cadmio tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el cadmio se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II. Un grupo de trabajo técnico bajo la Directiva 96/62/CE sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire está desarrollando una norma de calidad del aire ambiente para el cadmio. Estos factores se deben tener en consideración.

El cadmio ha estado ubicuamente distribuido en el entorno natural durante millones de años. La producción industrial ha afectado a su distribución total sólo de forma insignificante, pero en algunas áreas restringidas se han desarrollado problemas medioambientales. Un proceso típico de producción de zinc puede producir 600 toneladas anuales de cadmio. La producción de cadmio se controla estrechamente para evitar emisiones fugitivas y eliminar el polvo con un estándar muy estricto.

Más del 90% de la ingesta de cadmio de los no fumadores se produce a través de los alimentos. En consecuencia, la contaminación por cadmio del suelo cultivable debe reducirse y controlarse. Los valores límite de las emisiones de cadmio al aire son < 0,2 mg/Nm^3, y para el agua son < 0,2 mg/l.

El efecto crítico del cadmio es la disfunción de los conductos renales. El daño en los conductos es irreversible, por lo que su prevención es más importante que su diagnóstico. El largo periodo de semidescomposición biológica del cadmio puede producir un aumento continuo en los niveles renales a lo largo de muchos años, por lo que las exposiciones pasadas son con frecuencia más importantes que la exposición actual.

En muchas aplicaciones, las aleaciones de cadmio son esenciales y no pueden ser sustituidas por otros materiales. Análogamente, el uso de cadmio en pilas recargables puede también ser un beneficio medioambiental.

1.6 Metales Preciosos

1.6.1 Información General

En los metales preciosos [tm 36, Panorama 1997] se incluyen metales muy conocidos como el oro y la plata, así como los seis metales del grupo del platino (MGP): platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio. Se denominan metales preciosos por su rareza y resistencia a la corrosión.

La UE dispone de la mayor capacidad de refinado y producción de metales preciosos del mundo, incluso aunque sus actuales recursos minerales de dichos metales sean muy limitados. El reciclaje de metales preciosos a partir de chatarra y residuos industriales ha sido siempre una importante fuente de materias primas en la industria de la UE.

El consumo de oro en la UE es principalmente para joyería, utilizándose cantidades menores en electrónica y otras aplicaciones industriales y decorativas. Los principales usuarios de plata son las industrias fotográfica y de joyería. Los metales del grupo del platino se emplean extensivamente como catalizadores, y la imposición de límites de emisiones muy estrictos en los vehículos vendidos en la UE ha estimulado la demanda de su uso en catalizadores.

1.6.2 Fuentes de materiales

Minas de todas las partes del mundo envían grandes cantidades de metales preciosos, como mineral bruto o en forma de subproductos, a las refinerías de la UE. Las refinerías de metales preciosos de considerable capacidad se encuentran en Bélgica, Alemania, Suecia Finlandia y el Reino Unido. Estas refinerías recuperan normalmente metales preciosos de los minerales de plomo y zinc, cobre o níquel, así como de chatarras de baja calidad de todo tipo, y suministran los metales puros en barras o placas, granos o esponja.

Existen pequeños yacimientos de minerales de metales preciosos en Europa. La tabla 1.14 muestra los recursos primarios en 1997. Estos recursos representan aproximadamente el 4,5% de la plata primaria mundial, el 1,1% del oro primario mundial y el 0,08% de los MGP primarios. Actualmente se está iniciando la explotación de nuevos yacimientos de oro en Grecia, y su contribución será significativa en los próximos años.

Tabla 1.14: Recursos primarios de metales preciosos en 1997

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
España	6,2	5,4	
Finlandia	11,0	1,0	0,1
Francia	0,1	5,7	
Grecia	1,2		
Irlanda	0,4		
Italia	0,3		
Portugal	1,1		
Suecia	8,8	6,3	

Europa tiene una serie de empresas especializadas en la recogida, proceso preliminar y comercialización de chatarra y materiales secundarios antes de las etapas de análisis y refinado. Los artículos más frecuentes son placas de circuito impreso desechadas, ordenadores obsoletos, película fotográfica antigua, placas y soluciones radiográficas, baños de electroplastia consumidos, etc.

1.6.3. Producción y consumo

El coste de recuperación y reciclaje está más que justificado por el elevado valor intrínseco de los metales preciosos contenidos en estas chatarras y residuos. El reciclaje de metales preciosos se ve alentado no sólo por los aspectos económicos, sino también por los aspectos medioambientales, en los que se están fijando límites más estrictos en los contenidos de metales tolerables en los residuos para desecho.

El refinado de oro, plata y de los metales del grupo del platino en la UE se produce en empresas especializadas en el refinado y la fabricación de metales preciosos o en las refinería de metales de base. La capacidad total de refinado de metales preciosos de las empresas de la UE es la mayor del mundo.

Tabla 1.15: Capacidad anual de las refinerías europeas (toneladas)

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
Alemania	2.700	193	92
Austria	190	70	1
Bélgica	2.440	60	45
España	830	30	5
Francia	1.520	135	12
Holanda	130	15	1
Italia	1.050	115	15
Luxemburgo			
Reino Unido	2.320	300	100
Suecia	250	15	1
Suiza	620	565	14
Otros países de la UE	50	10	5

La capacidad de las refinerías es aproximadamente el doble de la cantidad procesada, por lo que puede mantenerse una rápida circulación del metal procesado.

La mayoría de los metales preciosos se fabrican de forma bastante fácil, como metales puros o como aleaciones. El oro en particular se convierte normalmente en aleaciones específicas para joyería o aplicaciones dentales con objeto de mejorar su resistencia al desgaste o su color. Debido a su elevado valor intrínseco y a la amplia gama de formas y aleaciones requeridas, estos metales se fabrican normalmente en cantidades relativamente pequeñas en comparación con los metales de base. Uno de los pocos productos de metales preciosos fabricados en cantidades de toneladas es el nitrato de plata para la industria fotográfica.

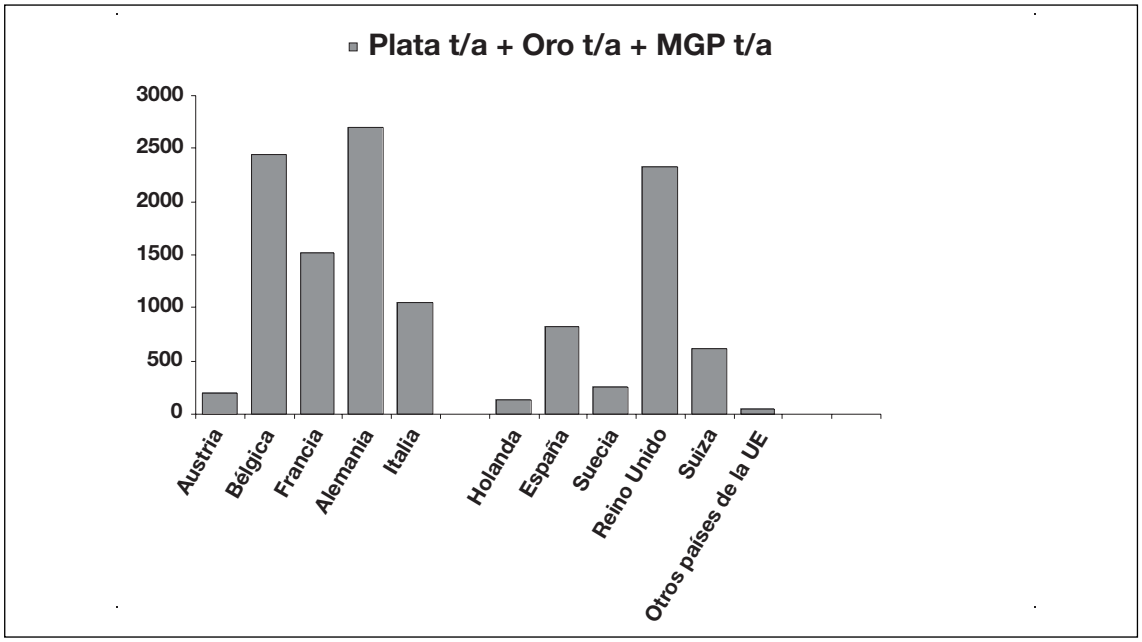


Figura. 1.8: Capacidad total europea de refinado de metales preciosos.

La demanda europea de metales preciosos es alta. El sector de la joyería es el que registra el mayor consumo de oro, y el sector fotográfico el de plata. El mayor consumo de platino es para la producción de catalizadores para vehículos. Otros usos principales son en productos químicos, en odontología y en inversión, por ejemplo para acuñar monedas. A continuación se muestra la demanda de metales preciosos en 1996.

Tabla 1.16: Demanda de Metales Preciosos en 1996

País	Plata t/a	Oro t/a	MGP t/a
Demanda Europea Total	5.710	881	85
Demanda Mundial Total	19.600	2.621	360

1.6.4 Centros de Producción

Los principales fabricantes y refinerías de metales preciosos de la UE operan a escala internacional y son líderes mundiales en su campo. Nombres destacados son Degussa y Heraeus en Alemania y Johnson Matthey en el Reino Unido. La firma estadounidense de metales preciosos Engelhard Corporation ha estado operando en la UE desde hace años y a finales de 1994 anunció la creación de una empresa conjunta con la empresa francesa de metales preciosos CLAL.

Importantes refinerías de metales de base de la UE con considerable participación en los metales preciosos son Union Minière en Bélgica, Norddeutsche Affinerie en Alemania, Outokumpu en Finlandia y Boliden en Suecia.

1.6.5 Aspectos Medioambientales

Las refinerías de metales preciosos de la UE constituyen una industria de tecnología avanzada y altas prestaciones fuertemente centrada en la investigación y el desarrollo. Los procesos utilizan a menudo reactivos peligrosos como HCl, HNO_3, Cl_2 y disolventes orgánicos. Se utilizan técnicas de proceso avanzadas para contener estos materiales, y la producción a pequeña escala permite el uso eficaz de estas técnicas para minimizar y eliminar las posibles emisiones. Esto abarca no sólo las nuevas aplicaciones de los metales preciosos, sino también el descubrimiento de técnicas para economizar las cantidades de metales preciosos utilizadas en las aplicaciones existentes. Las materias primas son sometidas a muestreos y análisis intensivos, y todos los residuos de los procesos se analizan con idéntico rigor.

La recuperación de estos metales a partir de materias primas secundarias es particularmente importante, y muchas de estas materias están clasificadas como residuos de otras industrias. Hay una cierta lentitud en el movimiento de materias primas debido a la legislación sobre Expedición Internacional de Residuos, lo cual puede suponer un obstáculo para el reciclaje.

1.7 Mercurio

1.7.1 Información General

El mercurio es el único metal que es líquido a temperatura ambiente, y tiene los puntos de fusión y de ebullición más bajos de todos los metales. También tiene una elevada conductividad eléctrica, y estas características se utilizan en una serie de aplicaciones, como interruptores eléctricos y fabricación de pilas. El mercurio forma fácilmente aleaciones con una serie de otros metales, que se denominan Amalgamas y son ampliamente utilizadas en odontología. El principal

uso del mercurio es como cátodo de circulación en el proceso Cloro-Alcali. Este proceso utiliza la elevada conductividad el mercurio y la formación de una amalgama con el sodio.

El mercurio se caracteriza por la toxicidad del metal y de sus vapores, así como por la extrema toxicidad de algunos de sus compuestos. A consecuencia de ello, el mercurio está siendo sustituido por materiales alternativos en muchos de sus usos, por lo que la demanda y producción de mercurio ha decrecido rápidamente. Esto tiene implicaciones de cara al futuro, ya que es probable que algunas existencias de mercurio salgan al mercado o se conviertan incluso en residuos.

1.7.2 Fuentes de materiales

El mercurio se encuentra en la naturaleza en forma de cinabrio (sulfuro de mercurio), que está asociado con gangas muy duras como la cuarcita y los basaltos. También está presente en forma de otros componentes como óxidos, sulfatos, cloruros o seleniuros. Estos son raros y están siempre asociados con el cinabrio, y generalmente tienen escasa relevancia. Hay excepciones, como la livinstonita (HgSbS), que se ha utilizado en México. La calidad de los minerales primarios varía considerablemente desde un 0,1% de mercurio hasta más del 3%.

Otras fuentes de mercurio son los minerales y concentrados de otros metales como cobre, plomo y zinc, etc.. El mercurio se produce a partir de los gases de purificación emitidos durante la producción de estos metales. El mercurio puede también recuperarse a partir de materiales secundarios como amalgama dental y pilas, y también se obtiene del refinado de aceite.

1.7.3 Producción y consumo

La descomposición del cinabrio es completa a temperaturas de 600 ºC, según la reacción abajo indicada. El mercurio metal se condensa a temperatura ambiente. El calentamiento puede realizarse en hornos “Herreschoff”, de mufla o rotatorios. Los dos últimos no se utilizan con mucha frecuencia.

$$HgS + O_2 \rightarrow Hg + SO_2$$

Tabla 1. 17: Fuentes de mercurio

Fuente	Contenido de mercurio en el mineral [%]	Producción [t/a]
Almadén, España	> 3	390
Mc Dermitt, USA	0.5	
Nikitovska, Ucrania	0.1	

En el caso de minerales ricos, de más de un 2% de mercurio, sólo se requiere pretratamiento mediante triturado y clasificación y el mineral triturado puede alimentarse directamente al horno. En caso de minerales pobres con un 0,5% de mercurio, se utiliza flotación diferencial para separar la roca de sílice y obtener concentrados con un contenido medio de mercurio del 70%. Para minerales con menos del 0,1% de mercurio, el mineral se tuesta tras el triturado. Se utilizan hornos de gran capacidad (1000 t/día).

La producción de mercurio a partir de la producción de otros metales no férreos en Europa para 1997 se estima en 350 toneladas. Estos procesos generalmente producen mercurio o calomel en un rango de 0,02 a 0,8 kg de mercurio por tonelada de metal producido según el contenido de mercurio del concentrado.

El declive de la producción de mercurio puede apreciarse en la producción europea para 1960, 1970 y 1980.

Tabla 1.18: Producción de mercurio en Europa Occidental

Año	Producción [t/a]
1960	4.250
1970	3.700
1980	1.100

1.7.4. Aspectos Medioambientales

La toxicidad del mercurio y de sus componentes es un factor significativo. El mercurio en el medio ambiente puede interaccionar con diversos compuestos orgánicos para producir compuestos organomercúricos de gran toxicidad. La actual legislación impone por consiguiente normas muy estrictas a la industria para evitar las emisiones, para reducir su uso en diversos procesos y para eliminar el mercurio del medio ambiente.

El mercurio es una sustancia incluida en la Lista 1 de la Directiva 76/464/CEE, sobre contaminación causada por ciertas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. La Directiva 84/156/CEE establece valores límites de emisión de mercurio para la UE.

1.8 Metales Refractarios

1.8.1 Información General

El término de metales refractarios hace referencia a un grupo de metales (en algunos casos metales de tierras raras) que pueden caracterizarse en su mayoría por poseer las mismas propiedades físicas. Estas propiedades son, para la mayoría de metales refractarios, un elevado punto de fusión, una alta densidad, propiedades eléctricas especiales, el ser inertes y, en particular, la capacidad de conferir, mediante la adición de pequeñas cantidades al acero y otros metales, excepcionales mejoras en sus características físicas. A continuación se indican as propiedades físicas seleccionadas de algunos metales.

Tabla 1.19: Propiedades físicas de los metales refractarios

Metal	Símbolo	Número Atómico	Peso Atómico	Punto de Fusión [ºC]	Punto de Ebullición [ºC]	Densidad [g/cm³]
Cromo	Cr	24	51,99	1857	2672	7,19
Manganeso	Mn	25	54,94	1220	2150	7,44
Tungsteno	W	74	183,85	3410	5900	19,3
Vanadio	V	23	50,94	1929	3450	6,11
Molibdeno	Mo	42	95,94	2610	5560	10,22
Tantalio	Ta	73	180,95	2996	5425	16,65
Titanio	Ti	22	47,88	1725	3260	4,5
Niobio	Nb	41	92,90	2468	4927	8,57
Renio	Re	75	186,2	3180	5900	21,02
Hafnio	Hf	72	178,4	2230	4602	13,09
Zirconio	Zr	40	91,22	1857	3580	6,5

Los metales refractarios y los metales duros en polvo se utilizan para una amplia gama de aplicaciones industriales. El cromo metal es importante formando aleaciones con el acero y como recubrimiento metálico en la industria galvánica. Entre una serie de otros usos como las

aleaciones con acero, el manganeso es el componente clave en ciertas aleaciones de aluminio ampliamente usadas, y se utiliza en forma de óxido en pilas secas [tm 174, T.S. Jones USGS 1997]. El mayor uso del tungsteno es en los carburos cementados, también denominados metales duros. Los carburos cementados son materiales resistentes al desgaste que se utilizan en los sectores de metalurgia, minería y construcción. Los cables, electrodos y/o contactos de tungsteno metal se utilizan en aplicaciones de iluminación, electrónica, calefacción y soldadura [tm 175, K.S. Shedd USGS 1997]. El molibdeno encuentra un considerable uso en numerosas aplicaciones químicas, como catalizadores, lubricantes y pigmentos [tm 176, J.W. Blossom USGS 1997]. El tantalio y su elemento gemelo el niobio se utilizan en forma de polvos metálicos y carburos. El tantalio en polvo se utiliza principalmente para la producción de condensadores de tantalio.

Niobio y columbio son nombres sinónimos para el mismo elemento. El columbio fue el primer nombre que se le dio, y niobio fue el nombre oficialmente designado por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en 1950 [tm 172, L.D. Cunningham USGS 1997]. Como metal, el titanio es bien conocido por su resistencia a la corrosión y por su elevado índice de tenacidad en relación a su peso. No obstante, alrededor del 85% del titanio se consume en forma de dióxido de titanio (TiO_2), un pigmento blanco en pinturas, papel y plásticos [tm 177, J. Gambogi USGS 1997]. El renio se emplea en catalizadores de reforma del petróleo para la producción de hidrocarburos de alto octanaje, que se utilizan para la producción de gasolina sin plomo [tm 178, J.W. Blossom USGS 1997].

El zirconio es el 18º elemento más abundante en la corteza terrestre, con una abundancia media de cristales de 165 partes por millón. Martin-Heinrich Klaroth descubrió el elemento en 1789 al analizar circón. El zirconio libre de hafnio se utiliza como encamisado para las barras de combustible nuclear. El zirconio de calidad comercial, a diferencia de la calidad nuclear, contiene hafnio y se utiliza en las industrias de proceso químico debido a su excelente resistencia a la corrosión. El hafnio es un elemento metálico plateado brillante, dúctil y lustroso, con un punto de fusión muy elevado. El hafnio metal fue descubierto en 1925 por Anton Edward van Arkel y Jan Hendrik de Boer pasando tetracloruro de hafnio sobre un filamento de tungsteno. El hafnio se utiliza en barras de control nuclear debido a su elevada absorción térmica de neutrones en sección transversal [tm 179, J.B. Hedrick USGS 1997]. Otras aplicaciones de los metales refractarios incluyen el uso como elementos de mezcla para la producción de cerámicas que contienen metales.

Debido a su naturaleza refractaria, los metales se procesan en ocasiones en modos distintos a los metales más comunes. La producción requiere por lo general métodos hidrometálicos para la extracción y purificación [tm 8, HMIP 1993] y la reducción con hidrógeno y carburización para la producción de polvo de metal duro y de carburos de metales duros. Los metales refractarios en bruto y los metales en polvo requieren a menudo técnicas metalúrgicas en polvo con el fin de producir productos acabados o semiacabados.

Los procesos para la fabricación de metales refractarios que incluyen la producción de polvo de metal duro y de carburos metálicos cubren los metales cromo, manganeso, tungsteno, vanadio, molibdeno, titanio, tantalio, niobio y renio, así como la producción de zirconio y hafnio.

1.8.2 Fuentes de materiales

Los metales refractarios pueden producirse a partir de una amplia gama de materias primas primarias y secundarias. Los metales refractarios se producen a partir de materias primas primarias mediante tratamiento hidrometalúrgico de minerales y concentrados oxídicos y sulfurosos y ulterior reducción con hidrógeno y carburización para producir carburos cementados.

La producción a partir de materias primas secundarias se basa normalmente en chatarra

Tabla 1.20: Materias primas primarias y secundarias para la producción de metales refractarios.

Metal	Materia prima primaria (Recursos)				Materia prima secundaria
	Minerales	Contenido	Otros Metales	Yacimientos en la UE	
Cromo	Cromita	Cr < 50%	Fe, Mg, Al	Finlandia y Grecia	• Chatarra de cromo
Manganeso	Pirolusita Braunita Manganita Psilomelana	Mn 63% Mn 66% Mn 62% Mn 45 - 60%	Si Ba	Grecia[2] e Italia[2]	
Tungsteno	Wolframita Scheelita Ferberita Hübnerita	WO_3 76% WO_3 80% WO_3 76% WO_3 76%	Fe, Mn Ca Fe Mn	Austria, Francia, Portugal y Reino Unido	• Chatarra de tungsteno (Virutas y polvo de muela para desbaste) • Chatarra de metal duro
Vanadio	Titanomagnetita[3] Montroseita Corvusita Roscoelita	V 1.5% V 45% V 40% V < 14%	Fe, Al, Ti, Cr Fe Al, Si		• Residuos de caldera • Cenizas de incineradores • Catalizadores consumidos de las industrias petroquímica y química. • Sales residuales de la producción de alúmina
Molibdeno	Molibdenita Wulfenita Powelita Ferrimolibdita Calcopirita[4]		Re Pb Ca, W Fe Cu		• Catalizadores que contienen molibdeno del refinado de petróleo.
Titanio	Rutilo Ilmenita Leucoxeno Escoria rica en TiO_2 de ilmenita	TiO_2 94% TiO_2 < 70% TiO_2 80%			• Chatarra de titanio, principalmente de la producción de productos semiacabados. • Virutas de titanio.
Tantalio	Tantalita Wodginita Microlita Columbita (Casiterita)[5]	Ta_2O_5 42 - 84% Ta_2O_5 60 - 70% Ta_2O_5 1 - 40%	Fe, Mn, Nb Nb,Sn,Mn,Fe Na,Ca,Nb Fe,Mn,Nb		• Chatarra de tantalio metálico sin oxidar. • Anodos de tantalio. • Condensadores • Granos sinterizados • Chatarra de tantalio oxidada relacionada con otros metales oxidados • Anodos de tantalio recubiertos con manganeso oxidado
Niobio	Tantalita Columbita Microlita	Nb_2O_5 2 - 40% Nb_2O_5 40 - 75%	Fe, Mn, Ta Fe, Mn, Ta Na, Ca, Ta		• Chatarra de metal duro
Renio	Molibdenita		Mo		• Catalizadores de platino-renio utilizados en la industria petrolífera
Zirconio	Circón[6]		Hf		
Hafnio	Circón[6]		Zr		

Notas:
[1] La lista no contiene todas las posibles materias primas, sólo un resumen de las fuentes de materias primas más importantes.
[2] Los yacimientos de manganeso en Grecia e Italia contienen minerales de baja calidad y se han utilizado sólo de forma eventual.
[3] Los yacimientos de titanomagnetita que contienen vanadio son de origen magmatogénico y existen en muchas partes del mundo [tm 107, Ullmanns 1996]. A partir del mineral de titanomagnetita puede producirse una escoria de vanadio, la fuente para producir compuestos de vanadio.
[4] Concentrado de sulfuro de cobre-molibdeno que se utiliza como mineral secundario.
[5] La producción de estaño a partir de casiterita produce una chatarra que contiene tantalio y niobio, que es la fuente principal de materia prima para la producción de tantalio y niobio.
[6] Zirconio y hafnio son a veces subproductos de yacimientos de arenas pesadas, que siempre contienen titanio y otros metales de tierras raras.

de metales duros de otros procesos de producción, como catalizadores consumidos. El hecho de que el reciclaje juega un importante papel queda demostrado por el hecho de que alrededor del 30% del suministro mundial de tungsteno se produce a partir de materias primas secundarias. La industria de proceso de tungsteno puede tratar cualquier tipo de chatarra o residuo que contenga tungsteno para recuperar el tungsteno y otros elementos valiosos si los hubiere.

La tabla 1.20 ofrece una vista general de las materias primas primarias y secundarias más importantes utilizadas para la producción de metales refractarios. También proporciona información acerca de los depósitos de minerales dentro de la Unión Europea.

También se utilizan una serie de otras materias primas como coque, carbón, carbón vegetal, silicio, aluminio, calcio y magnesio como agentes reductores. Son necesarios distintos agentes químicos, como ácido sulfúrico, para las operaciones de lixiviación, purificación, precipitación, intercambio iónico y electrólisis.

1.8.3 Producción y consumo

La producción europea y mundial de metales refractarios es muy sensible a la situación política y económica de los países que producen las materias primas. El consumo mundial de tungsteno primario, por ejemplo, fue fuerte en 1997 y se mantuvo bastante por encima de la producción minera mundial. Aproximadamente un tercio del suministro mundial fue de mineral de tungsteno liberado de existencias acumuladas en Rusia y Kazajstán. La liberación de existencias han mantenido el mercado con un exceso de suministro y han mantenido el precio del tungsteno primario por debajo del coste operativo de la mayoría de las minas. Debido a ello, muchas minas han cerrado, y la capacidad mundial de producción de tungsteno ha caído a alrededor del 75% del consumo mundial. Asimismo, China continúa siendo un fuerte competidor en caso de que aumente su producción de metales refractarios. No obstante, debido a las ventajosas propiedades de los metales refractarios y a la comprensión creciente de sus aplicaciones, la producción aumentará, al menos a largo plazo. Por ejemplo, el consumo futuro de los carburos cementados de tungsteno, que es el mayor sector de aplicación, se estima que crecerá más de un 5% en relación a las cifras de 1998 [tm 175, K. B. Shedd USGS 1997]. La producción mundial de cromo metal se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 1.21: Capacidad mundial de producción de cromo metal [tm 173, J.F. Papp USGS 1997]

País	Capacidad de producción [t/a]
Brasil	500
China	4.000
Francia	7.000
Alemania	1.000
India	500
Japón	1.000
Kazajstán	1.000
Rusia	13.000
Reino Unido	10.000
EE.UU.	3.000

1.8.4 Centros de producción

La producción de metales refractarios en la Unión Europea se basa en un número reducido de empresas. Por ejemplo, dos grandes empresas producen principalmente cromo metal. Son London and Scandinavian Metallurgical Co Limited, que operan una nueva y moderna fábrica de cromo construida en 1997, y Delachaux en Francia, que acaba de reportar la finalización de su planta de cromo metal en Valeciennes.

Las siguientes empresas, Kennametal Hertel AG, Widia GmbH y HC Stark GmbH en Alemania, Treibacher Industrie AG y Plansee AG en Austria, Sandvik y Seco Tools en Suecia, y Eurotunstène Poudres en Francia [tm 182, ITIA 1999] producen tungsteno metal en polvo y carburos de tungsteno en Europa.

Las empresas arriba mencionadas para la producción de tungsteno metal en polvo producen algunos otros metales refractarios. En la tabla 1.22 se presenta un resumen de las mayores empresas mundiales de producción de tantalio y niobio y sus productos. Lamentablemente no hay disponible información sobre los productores chinos, por lo que no se incluyen en la tabla.

1.8.5 Aspectos medioambientales

El principal impacto medioambiental de la producción de metales refractarios es el polvo con contenido metálico y el polvo de metales duros, así como los vapores de los procesos de fundición, por ejemplo para producir cromo metal. Las emisiones de polvo se derivan del almacenamiento y la manipulación de las materias primas y los productos, así como del funcionamiento de los hornos, en el que tanto las emisiones controladas como fugitivas juegan un importante papel.

El uso de hidrógeno como agente reductor implica el posible riesgo de incendios. El fluoruro de hidrógeno, que se utiliza en diversos procesos, es altamente tóxico y por lo tanto debe ser manipulado con sumo cuidado para evitar problemas de salud del personal de la planta. Otro impacto medioambiental de la producción de metales duros es el elevado nivel radiactivo de algunas materias primas (ej. pirocloro) y la toxicidad de compuestos metálicos como los de cobalto y níquel.

Los residuos y subproductos del proceso son escorias, lodos con metales, polvo de filtros y refractarios consumidos. Estos materiales ya se reciclan y reutilizan en gran medida cuando es posible. Debido a los niveles radiactivos de algunas materias primas, los residuos de tales procesos metálicos pueden ser radiactivos.

Las emisiones al agua se derivan de los efluentes de refrigeración, granulación y otros relacionados con el proceso o con el emplazamiento concreto. Un aspecto importante es el agua residual generada por los sistemas de eliminación de limpieza húmeda.

Las emisiones al aire, al agua y al suelo y por consiguiente el impacto medioambiental son relativamente bajas en comparación con otros sectores de la industria de metales no férreos. Esto es debido a las pequeñas cantidades de metales refractarios producidos y al elevado valor de dichos metales. Esto hace que sea muy importante recoger, filtrar y reciclar el máximo posible desde un punto de vista económico. El tratamiento de pequeños volúmenes de gas de escape es también menos difícil, al poder utilizarse de forma ventajosa filtros de bolsa de alto rendimiento.

Tabla 1.22: Principales productores mundiales de niobio y tantalio [tm 172, L.D. Cunnigham USGS 1997]

País	Empresa	Productos (N 1)
Austria	Treibacher Chemische Werke AG	Oxido/carburo de Nb y Ta, FeNb, NiNb.
Brasil	Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineracao (CBNM	Oxido/metal de Nb FeNb, NiNb.
	Cia. Industrial Fluminense (N 2)	Oxido de Nb y Ta.
	Mineracao Catalao de Goias S.A. (Catalao)	FeNb.
Canadá	Cainbior Inc., and Teck Corp. (Niobec)	FeNb.
Estonia	Silmet	Oxido/metal de Nb.
Alemania	Gesellschaft Fur Elektrometallurgie mbH (GFE) (N 2) H.C. Stark GmbH & Co. KG	FeNb, NiNb. Oxido/metal/carburo de Nb y T, sal K, FeNb, NiNb, Polvo para condensadores de Ta.
Japón	Mitsui Mining & Smelting Co.	Oxido/metal/carburo de Nb y Ta
	Showa Cabot Supermetals (N 3)	Polvo para condensadores de Ta.
	H.C. Stark-V Tech Ltd. (N 4)	Polvo para condensadores de Ta.
Kazajstán	Ulba Metallurgical	Oxido/metal de Ta.
	Irtysh Chemical & Metallurgical Works	Oxido/metal de Nb
Rusia	Solikamsk Magnesium Works	Oxido de Nb y Ta.
Tailandia	H.C. Starck (Thailand) Co. Ltd. (N 4)	Sal K, Ta metal.
Estados Unidos	Cabot Corp.	Oxido/metal de Nb y Ta, Sal K, FeNb, NiNb,
		Polvo para condensadores de Ta.
	H.C. Starck Inc. (N 5)	Nb y Ta metal, polvo para condensadores de Ta.
	Kennametal, Inc.	Carburo de Nb y Ta.
	Reading Alloys, Inc.	FeNb, NiNb.
	Shieldalloy Metallurgical Corp. (N 2)	FeNb, NiNb.
	Wah Chang (N 6)	Oxido/metal de Nb, FeNb, NiNb.
	H.C. Starck-TTI, Inc. (N 4)	Polvo para condensadores de Ta

Notas:
(N 1) Nb, niobio; Ta, tantalio; FeNb, ferroniobio; NiNb, níquel-niobio; Sal K: fluotantalato potásico; óxido, pentóxido.
(N 2) Subsidiaria al 100% de Metallurg Inc., New York-.
(N 3) Empresa conjunta entre Showa Denko y Cabot Corp.
(N 4) Subsidiaria de H.C. Starck GmbH & Co. KG.
(N 5) Propiedad conjunta de Bayer USA y H.C. Starck GmbH & Co. KG.
(N 6) Subsidiaria de Allegheny Teledyne Inc.

1.9 Ferroaleaciones

1.9.1 Información General

Las ferroaleaciones son aleaciones maestras que contienen algo de hierro y uno o más metales no férreos como elementos aleados. Las ferroaleaciones permiten la introducción segura y económica en el proceso metalúrgico de elementos de aleación como cromo, silicio, manganeso, vanadio, molibdeno etc., lo que confiere ciertas propiedades deseables al metal aleado, por ejemplo para aumentar su resistencia a la corrosión, su dureza o su resistencia al desgaste.

Su importancia ha crecido con el progreso de la metalurgia del acero, que implica la creación de elementos de aleación más diversificados, en cantidades mejor controladas, en acero más puro. la industria de las ferroaleaciones se ha convertido en un proveedor clave de la industria del acero.

Las ferroaleaciones se clasifican normalmente en dos grupos:

- Ferroaleaciones en masa (ferrocromo, ferrosilicio junto con silicio-metal, ferromanganeso y silicomanganeso), que se producen en grandes cantidades en hornos de arco eléctrico.
- Las ferroaleaciones especiales (ferrotitanio, ferrovanadio, ferrotungsteno, ferroniobio, ferromolibdeno, ferroboro y aleaciones ternarias/cuaternarias), que se producen en cantidades menores, pero cuy importancia es creciente.

Las ferroaleaciones en masa se utilizan exclusivamente en la fabricación de acero y en fundiciones de acero o hierro. Los usos de ferroaleaciones especiales son bastante más variados, y la proporción empleada en la fabricación de acero ha disminuido a favor de las empleadas en la industria del aluminio y la industria química, especialmente los productos con silicio. Las siguientes figuras muestran el uso de las ferroaleaciones en masa y de las ferroaleaciones especiales en los distintos sectores para 1994.

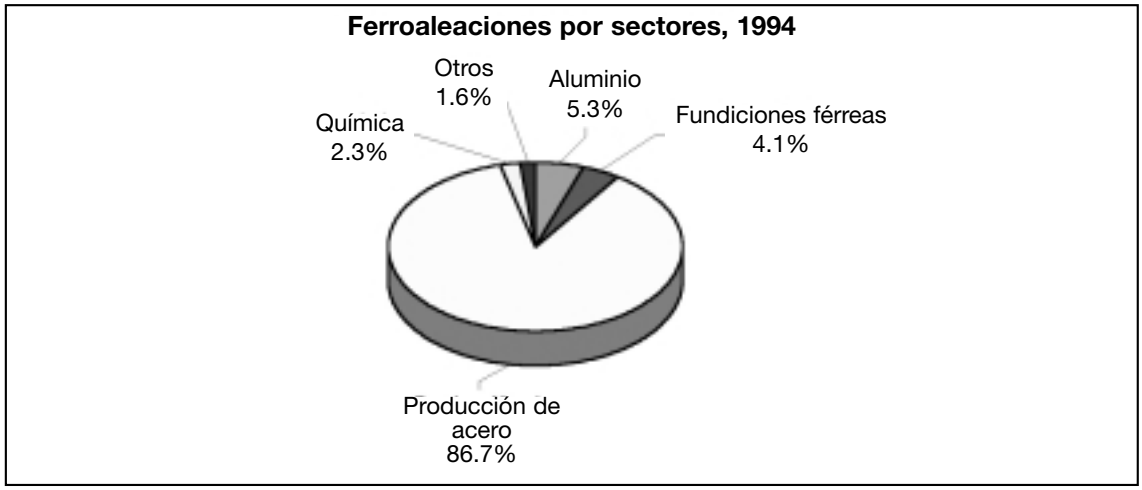


Figura 1.9: Uso de ferroaleaciones en distintos sectores industriales en 1994. [tm 36, Panorama 1997].

1.9.2 Fuentes de materiales

Las materias primas (elementos de aleación) para la producción de ferroaleaciones se obtienen mediante extracción expresa en minas (cuarcita para silicio, cromita para cromo…) o como subproductos de otra producción (ej. molibdeno de la minería del cobre). Por supuesto, ambas fuentes pueden existir simultáneamente.

También pueden recuperarse de chatarra, caso que a menudo suele ocurrir para la parte de hierro de la composición, que procede de la chatarra de hierro y aluminio, pero también para el elemento de aleación en sí, por ejemplo titanio. Los residuos de acerías, como polvo de hornos de arco eléctrico y de filtros de convertidores, así como el polvo de granallado y de desbaste, suponen una materia prima secundaria significativa con una importancia cada vez mayor. Las principales fuentes de materias y yacimientos minerales para los elementos de aleación son:

- La cromita, que se concentra en dos grandes yacimientos, situados en Sudáfrica y Kazajstán. Existen yacimientos menores en otras partes del mundo, especialmente en Europa (Finlandia, Turquía, Albania, Grecia).

Figura 1.10: Uso de ferroaleaciones en masa y especiales en distintos sectores industriales en 1994 [tm 36, Panorama 1997].

- La materia prima para producir ferrosilicio y silicio metal se encuentra disponible en todas partes del mundo, aunque no todas las fuentes permiten la producción en condiciones económicas y de calidad de todas las gamas de aleaciones de silicio.
- Los minerales de manganeso se encuentran principalmente en Sudáfrica, Ucrania, Gabón y Australia. Existen yacimientos menores en Brasil, India, México y Birmania. La calidad (contenido de manganeso y nivel/naturaleza de las impurezas) del mineral pueden influir considerablemente en la economía de la producción de ferroaleaciones.
- Los elementos de aleación especiales se concentran muy a menudo en unos pocos países (molibdeno en Norteamérica, Chile y China; niobio en Brasil), y los precios y la disponibilidad son muy sensibles a las condiciones económicas.

1.9.3 Producción y consumo

Durante los últimos 15 a 20 años, el patrón mundial del mercado de las ferroaleaciones ha cambiado profundamente:

- El consumo de los países desarrollados ha aumentado enormemente con el desarrollo de su producción de acero.
- Su producción ha aumentado incluso más dado que han ido copando una cuota creciente del mercado tradicional de los mercados industrializados, en los que la producción de acero estaba estancada o creciendo lentamente.

- La industria de la ferroaleación se enfrenta a una cantidad creciente de importaciones, primero de los nuevos países industrializados y en años recientes de los países de Europa del Este y de la CEI.

En consecuencia, la producción de ferroaleaciones se ha visto sometida a una competencia difícil que ha tenido como consecuencia una tendencia decreciente de la cantidad total de ferroaleaciones producidas. Aunque los últimos años han registrado una cierta estabilización, incluso un ligero aumento de la producción, la industria europea sigue siendo muy sensible. En el gráfico inferior y la tabla de la página siguiente se muestra la producción actual de ferroaleaciones en masa en la UE expresada en toneladas al año. La información sobre las cifras de producción se ha tomado de [tm 180, M. Tenton USGS 1997] y ha sido suministrada por el grupo de expertos en ferroaleaciones.

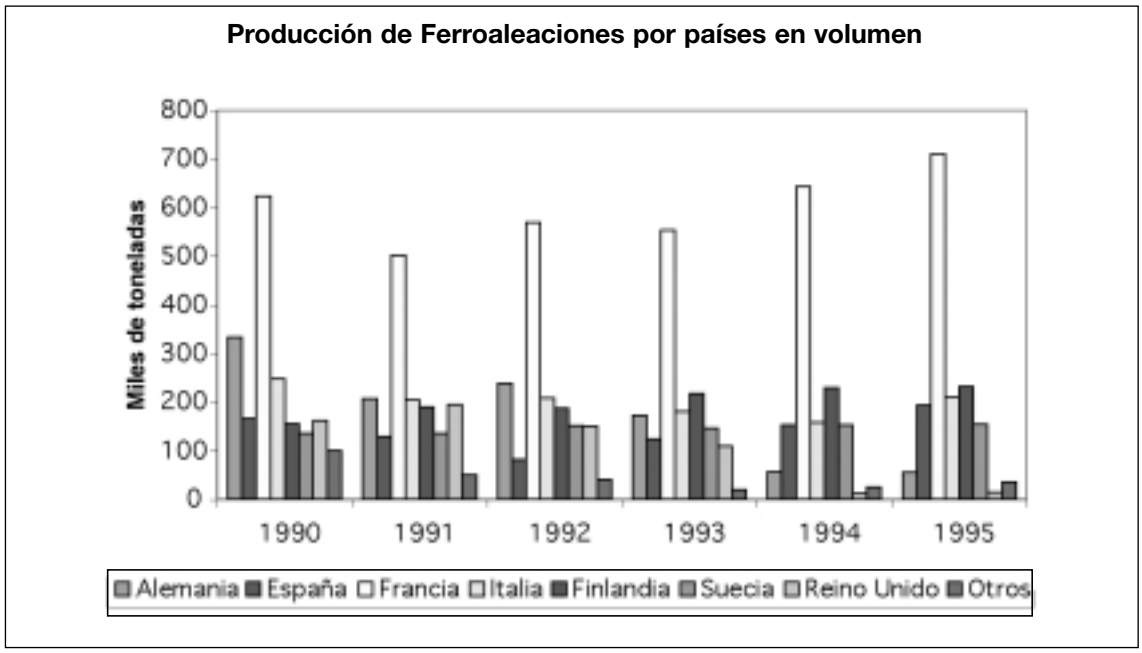


Figura 1.11: Producción de ferroaleaciones en masa en Europa [tm 36, Panorama 1997].

En la tabla 1.23 se muestra la producción europea total de ferroaleaciones en masa, dividida en las distintas aleaciones y los hornos en que se producen. Las cifras presentadas pueden no reflejar las capacidades de producción exactas y deben considerarse cifras indicativas.

Tabla 1.23: Producción europea de ferroaleaciones en masa en toneladas anuales [tm 180, M. Tenton USGS 1997]

Producción	1993	1994	1995	1996	1997
Austria: Horno eléctrico:					
Ferroníquel 1/	8.000	5.250	6.200	5.000	5.000
Otras e/	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
Total	13.900	11.150	12.100	10.900	10.900
Bélgica: Horno eléctrico, ferromanganeso e/	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
Finlandia: Horno eléctrico, ferrocromo	218.370	229.000	232.300	236.100r/	236.652 6/
Francia:					
Alto horno, ferromanganeso	300.000	294.000	384.000 r/	337.000 r/	326.000
Electric furnace:					
Ferromanganeso	57.000	66.200	46.000 r/	65.000 r/	60.000
Ferrosilicio	84.000	111.000	108.000	130.000 r/e/	130.000
Siliciomanganeso e/ 2/	80.000	66.000 r/	71.000 r/	61.000 r/	66.000
Silicio-metal	59.000	66.000	71.450 r/	73.800 r/	74.000
Otras e/	29.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Total e/	609.000	623.000 r/	664.000 r/	687.000 r/	676.000
Alemania: e/					
Alto horno, ferromanganeso3/	100.000	--	--	--	--
Horno eléctrico:					
Ferrocromo	16.400 6/	17.283 6/	21.665 r/6/	25.303 r/6/	25.856 6/
Ferromanganeso 4/	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Ferrosilicio	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Silicio-metal	500	500	500	500	500
Otras 5/	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Total	187.000	87.800	92.200 r/	95.800 r/	96.400
Grecia:					
Ferroníquel	10.930	16.190	17.170	17.800	17.610
Islandia: Horno eléctrico, ferrosilicio	67.375	66.003	71.410	70.520 r/	71.000
Italia: Horno eléctrico: e/					
Ferrocromo	53.504 6/	22.650 6/	51.017 6/	29.915 6/	11.295 6/
Ferromanganeso	17.000	16.000	20.216 r/6/	25.143 r/6/	16.000
Silicomanganeso	50.000	40.000	103.961 r/6/	100.353 r/6/	100.000
Silicio-metal	10.000	--	10.000 r/	14.000 r/	15.000
Otras 6/	12.000	12.000	12.000	10.000	10.000
Total	143.000	90.700	197.000 r/	179.000 r/	152.000
Noruega: Horno eléctrico:					
Ferrocromo	80.000	120.000	148.000 r/	108.900 r/	145.124 6/
Ferromanganeso	226.018	248.648	213.000 r/	215.000 r/	215.000
Ferrosilicio	399.559	452.984	474.875 r/	462.423 r/	470.000
Silicomanganeso	218.566	197.328	210.000 r/e/	210.000 r/e/	210.000
Silicio-metal	81.000	92.000	101.000	110.000 e/	110.000
Otras e/ 2/	14.000	14.000	15.000	15.000	15.000
Total e/	1.020.000	1.120.000	1.160.000 r/	1.120.000	1.170.000
España: Horno eléctrico: e/					
Ferrocromo	2.390 6/	2.300 6/	1.320 6/	805 6/	490 6/
Ferromanganeso	40.000	35.000	25.000	30.000 r/	35.000
Ferrosilicio	30.000	25.000	30.000	30.000	30.000
Silicomanganeso	35.000	35.000	50.000	70.000 r/	100.000
Silicio-metal	5.000	3.000	5.000	5.000	15.000
Otras e/ 10/	5.000	4.000	5.000	5.000	5.000
Total e/	117.000	104.000	116.000	141.000 r/	185.000

Producción		1993	1994	1995	1996	1997
Suecia:	Horno eléctrico					
	Ferrocromo	127.543	134.076	130.170	138.110	101.842 6/
	Ferrosilicio	20.381	21.392	21.970	21.287 r/	22.000
	Total	147.924	155.468	152.140	159.397 r/	124.000
Suiza:	Horno eléctrico					
	Ferrosilicio	3.000	--	--	--	--
	Silicio-metal	2.000	--	--	--	--
	Total	5.000	--	--	--	--
Reino Unido:						
	Alto horno, ferromanganeso	45.000	--	--	--	--
	Horno eléctrico, otras e/	10.000	--	--	--	--
	Total e/	55.000				

Notas: e/ estimado; r/ revisado; 1/ Cifra reportada; 2/ Incluye fundición especular de silicio, si la hay; 3/ Incluye fundición especular, si la hay; 4/ Incluye silicomanganeso si lo hay; 5/ Incluye ferrocromosilicio y ferroníquel, si los hay; 6/ La serie excluye calcio-silicio.

En la tabla siguiente se indica la capacidad total mundial de producción de ferroaleaciones dividida en las distintas aleaciones y los hornos en que se producen. Las cifras presentadas pueden no reflejar las capacidades de producción exactas y deben considerarse cifras indicativas.

Tabla 1.24: Producción mundial de ferroaleaciones en masa [tm 180, M. Tenton USGS 1997].

Tipo de horno, 1/2 de aleacción 3/	1993	1994	1995	1996	1997
Gran total:	15.700.000 r/	16.300.000 r/	17.700.000 r/	17.900.000 r/	17.600.000
dividido en:					
Alto horno:					
Ferromanganeso 4/	1.210.000	1.010.000	874.000 r/	927.000 r/	871.000
Fundiciones especulares 5/	12.000	10.000	9.500	9.500	9.500
Otras 28/	225.000	230.000	230.000	220.000	220.000
Total, alto horno	1.450.000	1.250.000	1.110.000 r/	1.160.000 r/	1.100.000
Horno de arco eléctrico:					
Ferrocromo 6/	3.270.000 r/	3.530.000 r/	4.550.000 r/	4.010.000 r/	4.470.000
Ferrocromosilicio	62.500	89.500	90.700	52.200	50.000
Ferromanganeso 7/ 8/	2.320.000	2.770.000 r/	2.780.000 r/	3.050.000 r/	2.900.000
Ferroníquel	755.000 r/	772.000 r/	964.000 r/	923.000 r/	913.000
Ferrosilicio	4.010.000 r/	3.830.000 r/	4.070.000 r/	4.370.000 r/	4.130.000
Silicomanganeso 8/ 9/	2.740.000 r/	2.850.000 r/	3.010.000 r/	3.110.000 r/	3.000.000
Silicio- metal	564.000	559.000	588.000 r/	649.000 r/	662.000
Otras10/	575.000 r/	635.000 r/	589.000 r/	589.000 r/	383.000
Total, horno eléctrico	14.300.000 r/	15.000.000	16.600.000 r/	16.700.000 r/	16.500.000

Notas: (toneladas, peso bruto). e/ Estimato. r/ Revisado.
1/ La producción de ferroaleaciones de manganeso, ferrosilicio, y silicio metal se inició en 1996 para Arabia Saudita, pero los datos de producción real no estaban disponibles.
2/ En la medida de lo posible, la producción de ferroaleaciones se ha dividido de acuerdo con el tipo de horno con el que se obtiene la producción; la producción derivada de hornos metalotérmicos se incluye con la producción en hornos eléctricos.
3/ En la medida de lo posible, la producción de ferroaleaciones de cada país se ha dividido para mostrar los siguientes tipos principales de ferroaleaciones individuales: ferrocromo, ferrocromosilicio, ferromanganeso, ferroníquel, ferrosilicio, silicomanganesp, silicio-metal, y fundiciones especulares. Las ferroaleaciones distintas de las listadas que se han identificado específicamente en fuentes, así como las ferroaleaciones no identificadas específicamente, pero que excluyen claramente las listadas anteriormente en esta nota al pie, se reportan como "Otras". Cuando una o más de las ferroaleaciones individuales listadas separadamente en esta nota al pie han resultado inseparables de otras ferroaleaciones debido al modo de información de un determinado país, las desviaciones se indican mediante notas al pie individuales.
4/ Las fundiciones especulares, si las hay, se incluyen con el ferromanganeso de alto horno.
5/ Incluye ferrofósforo y los datos contenidos en "Alto Horno: Otras".
6/ El ferrocromo incluye ferrocromosilicio, si lo hay, para Japón, Sudáfrica, y Estados Unidos.
7/ El ferromanganeso incluye silicomanganeso, si lo hay, para los países con la nota al pie 12 en la línea de datos de "Ferromanganeso". 3 I/ Producción de EE.UU. bajo "Otras".
8/ Incluye fundiciones especulares de silicio, si las hay, para Francia.
9/ Incluye calcio-silicio, ferromolibdeno, ferrovanadio, y los datos contenidos en "Horno eléctrico".
10/ Distintas para cada país indicado.

Debido a los avances técnicos y metalúrgicos y a los cambios en la producción de hierro y acero, también el patrón de consumo de las ferroaleaciones ha cambiado, especialmente en los países industrializados:

- La producción de acero al carbono, bastante estancada, se produce cada vez más en hornos de arco eléctrico a partir de chatarra, lo que permite la recuperación de los elementos de aleación, reduciendo el consumo relativo de ferroaleaciones.
- Una producción más eficaz de acero al carbono (colada continua, por ejemplo) y una metalurgia más avanzada han producido un caída significativa en el consumo de manganeso (desde 7 kg/tonelada de acero hasta 5 kg/tonelada en 20 años) y de ferrosilicio (desde 5 kg/tonelada de acero hasta 3,5 kg/tonelada en 20 años).
- La necesidad creciente de elementos de aleación metalúrgicamente sofisticados (niobio, molibdeno) y de elementos de tratamiento (calcio) ha producido un mayor consumo de aleaciones especiales.
- La producción creciente de acero inoxidable ha producido un aumento significativo del consumo de aleaciones de cromo (principalmente acero al ferrocromo con alto contenido en carbono).

Teniendo todos estos factores en consideración, el consumo en Europa Occidental ha estado más o menos estancado en unos 4,2 millones de toneladas/año, y su producción ha descendido desde 4 millones de toneladas a 3 millones de toneladas durante los últimos 10 años.

1.9.4 Centros de producción

En Europa hay una serie de empresas que producen distintas ferroaleaciones en unos 60 centros de producción industrial. El principal país europeo productor de ferroaleaciones es Noruega para la producción de ferroaleaciones en masa, y Francia y España especialmente para la producción de aleaciones de manganeso y silicio. Finlandia es un importante productos de ferrocromo a partir de una mina local de mineral de cromo. En Suecia se produce principalmente ferrocromo y ferrosilicio. En el Reino Unido, Bélgica, Austria y Alemania se producen ferroaleaciones especiales como ferromolibdeno, ferrovanadio y ferrotitanio

1.9.5 Aspectos medioambientales

La producción de ferroaleaciones comporta por lo general el uso de hornos de arco eléctrico y de crisoles de reacción en los que se cargan productos naturales (ej. cuarzo, cal, diversos minerales, madera, etc.) con composiciones físicas relativamente fluctuantes. Debido a ello, el principal impacto medioambiental en la producción de ferroaleaciones es la emisión de polvo y humo de los procesos de fundición. También se producen emisiones de polvo del almacenamiento, la manipulación y el pretratamiento de materias primas en las que las emisiones fugitivas de polvo juegan un importante papel. Según la materia prima y el proceso utilizado, otras emisiones a la atmósfera son SO_2, NOx, CO gas, CO_2, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), COVs y metales volátiles. Puede ser posible la formación de dioxinas en la zona de combustión y en la zona de enfriamiento del sistema de tratamiento de gases de escape (síntesis de novo).

Los residuos y subproductos de proceso con cantidades significativas son las escorias, el polvo de filtro y los lodos, así como los refractarios consumidos. Estos materiales ya se reciclan y reutilizan en gran medida cuando es posible. Las escorias ricas, lo que significa escorias con una proporción relativamente alta de óxidos metálicos, se utiliza como materia prima en la producción de otras ferroaleaciones. Por ejemplo, la escoria rica de la producción de ferromanganeso es una de las materias primas más importantes para la producción de silicomanganeso.

Las emisiones al agua se derivan de los efluentes de refrigeración, granulación y otros relacionados con el proceso o con el emplazamiento concreto. Un aspecto importante es el agua residual generada por los sistemas de eliminación de limpieza húmeda.

La industria de las ferroaleaciones, cuya herramienta básica es el horno de arco eléctrico en el que los óxidos metálicos son reducidos con carbono, es un importante consumidor de energía y un productor de dióxido de carbono. Por consiguiente, la reducción del consumo de energía se ha considerando siempre una prioridad vital. Las leyes de la termodinámica, que gobiernan las reacciones empleadas, limitan la reducción de la energía necesaria para el proceso de fundición. Por consiguiente, la reducción del consumo global de energía sólo es posible utilizando un sistema eficaz de recuperación de energía. La energía recuperada puede transformarse en energía eléctrica o utilizarse como calor para diversos fines. Los gases de escape ricos en CO de los hornos cerrados pueden usarse asimismo como combustible secundario o materia prima para procesos químicos. La recuperación de energía reduce el uso de otros recursos de energía naturales y por lo tanto el impacto sobre el calentamiento global.

1.10 Metales Alcalinos y Alcalinotérreos

1.10.1 Información General

Los metales alcalinos, que químicamente pertenecen al primer grupo de la tabla periódica de los elementos, incluyen metales como litio, sodio, potasio, así como un elemento radiactivo extremadamente rara: el francio. Lo metales alcalinos se caracterizan por su bajo punto de fusión y densidad. Tienen un color blanco plateado y son más blandos que otros metales. Los metales alcalinos tienen un único electrón muy móvil en su capa más externa. Debido a ello, son altamente reactivos, especialmente con oxígeno o agua, donde pueden asimismo reaccionar violentamente produciendo hidrógeno gas y calor.

Los metales alcalinotérreos son similares a los metales alcalinos en diversos modos, pero reaccionan menos vigorosamente con el agua. Los metales alcalinotérreos son los elementos del segundo grupo de la tabla periódica. En orden creciente de número atómico, así como de su importancia metalúrgica y técnica, son magnesio, calcio y estroncio.

1.10.2 Fuentes de materiales

El sodio y sus compuestos son ampliamente utilizados en la industria para la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, en procesos metalúrgicos y en una serie de otros productos de uso cotidiano. E sodio metal se produce normalmente por la electrólisis de cloruro sódico fundido.

El litio metal se produce de forma muy similar al sodio metal. La producción se realza mediante la electrólisis de una mezcla eutéctica fundida de cloruro de litio y cloruro potásico a unos 450 ºC en una célula de Downs.

El potasio, que fue descubierto en 1807 por el químico ingles Humphry Davy, aparece en muchas rocas y minerales de silicato, de los que la mayor fuente comercial son los yacimientos de sal. El potasio metal es de color blanco plateado y fue el primer metal aislado por electrólisis. A escala industrial, el potasio metal sólo se produce mediante la reducción de cloruro potásico con sodio metal.

Al igual que con el potasio, Humphry Davy descubrió el magnesio como elemento metálico en 1808. Se trata de un metal blanco plateado, dúctil y químicamente activo que pertenece al grupo de los metales alcalinotérreos. El magnesio puede producirse por electrólisis de cloruro

magnésico obtenido a partir de la materia prima dolomita y agua de mar, magnesita, carnalita o salmueras, o de dolomita que se reduce mediante ferrosilicio y/o aluminio en un proceso de reducción térmica. El magnesio también se recupera y produce como magnesio secundarios de una amplia gama de residuos que contienen magnesio y de chatarra de magnesio metálico.

La mayoría del magnesio se emplea en aleaciones con aluminio, aunque el mayor índice de crecimiento se registra en el uso de aleaciones de magnesio en el moldeo de piezas en las que la ligereza es importante, como la industria de automoción. Otro gran campo de aplicación es la desulfurización del acero con magnesio en polvo. El uso creciente de residuos de magnesio secundario de la desulfurización del acero está reduciendo el crecimiento en la producción de magnesio en polvo primario. A continuación se muestra el uso mundial del magnesio metal en los distintos mercados [tm 1,HMIP 1993].

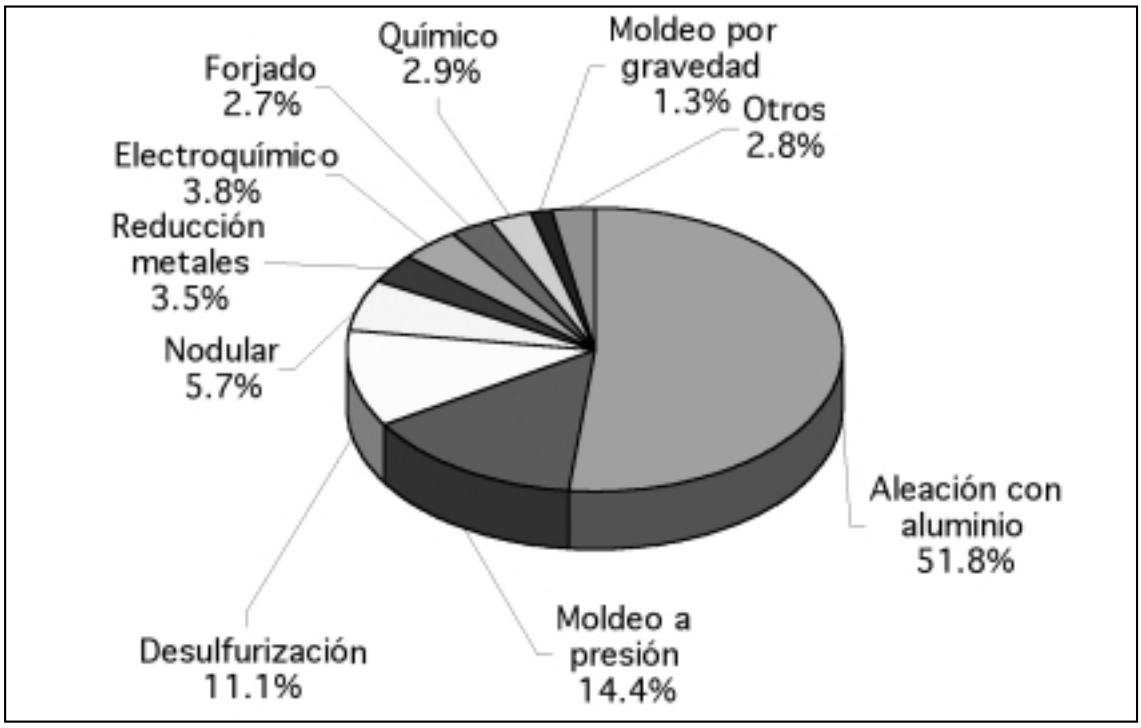


Figura 1.12: Uso mundial del magnesio metal.

El calcio y el estroncio metales se utilizan para distintas aplicaciones. El calcio como elemento de aleación mejora la calidad de los aceros, especialmente las propiedades mecánicas como la conformabilidad, el trefilado y la mecanización. Debido a su gran capacidad para formar óxidos y sulfitos, el calcio es importante en la producción de acero ultralimpio. El calcio metal puede también emplearse en la desbismutación del plomo. El estroncio metal se utiliza en el refinado de aluminio, así como en el refinado de escorias de acero.

1.10.3 Producción y consumo

La producción de metales alcalinos y alcalinotérreos, especialmente para la producción de sodio, litio, calcio y estroncio metal, es realizada sólo por unas pocas empresas. La capacidad mundial de producción de magnesio primario es del orden de 400.000 toneladas al año, mientras que la producción europea es de unas 57.000 toneladas al año. Las tablas siguientes ofrecen un resumen de la capacidad de producción de magnesio primario y de las cantidades producidas a nivel mundial de magnesio primario y secundario por países [tm 189, D. Kramer, USGS 1997].

Tabla 1.25: Producción mundial de magnesio primario por países.

Continente y país	Capacidad productores	Número de
Norteamérica:		
Canadá	49.000	2
Estados Unidos	80.000	2
Europa:		
Francia	17.000	1
Kazajstán (N 3)	10.000	1
Noruega	35.000	1
Rusia (N 3)	45.000	2
Serbia y Montenegro	5.000	1
Ucrania (N 3)	24.000	1
Otros		
China	~150.000 - 200.000	~200
India	900	1
Brasil	10.000	1
Israel	27.500	1
Total mundial (N 1,2)	503.400	~215

Notas:
N 1 Incluye la capacidad en las plantas operativas, así como las plantas en fase de puesta en funcionamiento
N-2 Los datos se redondean a tres cifras significativas; los totales indicados pueden no ser exactos.
N 3 Excluida la capacidad de producción de magnesio que se utiliza exclusivamente para la producción de titanio.

Tabla 1.26: Cantidades producidas de magnesio primario y secundario en toneladas anuales

País	1993	1994	1995	1996	1997
Producción primaria:					
Brasil e/	9.700	9.700	9.700	9.000	9.000
Canadá e/	23.000	28.900	48.100	54.000	57.700
China e/	11.800	24.000	93.600	73.100 r/	92.000
Francia	10.982	12.280	14.450	14.000 e/	12.000
Israel	--	-	-	-	8.000
Japón	7.471	3.412	-	--	--3/
Kazajstán e/	2.000	- 3/	9.000 r/	9.000 r/	8.972 3/
Noruega	27.300	27.635	28.000 e/	28.000 r/ e/	28.000
Rusia e/ 4/	30.000	35.400	37.500	35.000	39.500
Serbia y Montenegro	- e/	-	2.560	2.500 e/	2.500
Ucrania e/	14.900	12.000	10.000 r/	10.000 r/	10.000
Estados Unidos	132.000	128.000	142.000	133.000	125.000 3/
Total	269.000	282.000	395.000 r/	368.000 r/	392.000
Producción secundaria:					
Brasil e/	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Japón	13.215	19.009	11.767	21.243 r/	22.797 3/
URSS e/ 5/	6.000	5.000	6.000	6.000	n.a.
Reino Unido e/ 6/	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Estados Unidos	58.900	62.100	65.100	70.200 r/	80.200 3/
Total	80.700	88.700	85.500	100.000 r/	106.000

Notas:
1/ Los totales mundiales y los datos estimados se redondean a tres cifras significativas: los totales indicados pueden no ser exactos.
2/ La tala incluye los datos disponible a 22 de julio de 1998.
3/ Cifra reportada.
4/ Incluye producción secundaria.
5/ Disuelta en diciembre de 1991; no obstante, no se dispone de información fiable para formular estimaciones fiables para los países individuales de la antigua URSS.
6/ Incluye aleaciones r/ revisado e/ estimado

1.10.4 Centros de producción

En la Unión Europea sólo hay unos pocos centros de producción de sodio, litio y potasio. El sodio metal es producido por Associated Octel, una empresa radicada en el Reino Unido, y por una empresa que realiza una producción de sodio en Francia. Para la producción de magnesio primario hay dos empresas en Europa. Hydro magnesium (NHM) opera una planta de magnesio primario en Porsgrunn, Noruega, basada en dolomita y agua de mar como materias primas. Pechiney Électrométallurgie (PEM) opera una planta de reducción térmica en Marignac en Francia, basada en el proceso Magnetherme desarrollado por la propia Pechiney. Hay alguna otras empresas, en su mayoría pequeñas, que producen magnesio secundario en la Unión Europea. Sólo una empresa de la Unión Europea produce calcio metal y también existe una sola empresa dedicada a la producción de estroncio metal. Ambas plantas son operadas por Pechiney Électrométallurgie (PEM) en su fábrica de La Roche de Rame en Francia.

1.10.5 Aspectos medioambientales

El principal problema medioambiental en la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos son las emisiones a la atmósfera y al agua. La generación de la emisiones a la atmósfera es debida a la naturaleza polvorienta de algunos procesos y operaciones que se utilizan en la producción de metales alcalinos y alcalinotérreos. Por ejemplo, la descarga, trituración y calcinación de las materias primas se asocia con la generación de polvo. Otro aspecto medioambiental importante es la emisión de cloro y de compuestos derivados como hidrocarburos clorados y dioxinas. Los hidrocarburos clorados y las dioxinas son emitidos principalmente en el proceso de cloración que se utiliza en la electrólisis del magnesio. Estos contaminantes deben ser eliminados de los gases de escape. Esto tiene como consecuencia la contaminación del agua de lavado, lo que requiere un tratamiento eficaz de las aguas residuales. También se producen emisiones al agua por el lavado del agregado de filtración del proceso del sodio. Para evitar que el magnesio metal se reoxide por efecto del aire circundante, se utiliza hexafluoruro de azufre (SF6) en el equipo de moldeo, desde donde también se emite a la atmósfera.

1.11 Níquel y Cobalto

1.11.1 Níquel

1.11.1.1 Información General

El níquel [tm 36, Panorama 1997; tm 94, Nickel Expert Group 1998] es un metal blanco plateado con propiedades metálicas típicas. Aunque sólo fue descubierto como metal en 1751, sus aleaciones se han utilizado durante siglos; por ejemplo, los chinos habían estado fabricando “cobre blanco” cuyo aspecto se asemejaba al de la plata. Entre 1870 y 1880, se demostró el uso del níquel en aceros aleados y se desarrolló con éxito el niquelado.

La gran importancia del níquel reside en su capacidad, al alearse con otros elementos, de aumentar la resistencia, la tenacidad y la resistencia a la corrosión de los mismos en una amplia gama de temperaturas. El níquel es por consiguiente un elemento de extrema importancia comercial. Debido a estas ventajosas propiedades, el níquel se emplea en una amplia variedad de productos. La mayor parte del níquel primario se utiliza en aleaciones, la más importante de las cuales es el acero inoxidable. Otras aplicaciones son electroplastia, fundiciones, catalizadores, baterías, acuñado de monedas y otras aplicaciones diversas. El níquel se encuentra en productos de transporte, equipos electrónicos, productos químicos, materiales de construcción, productos

del petróleo, equipos aerospaciales, artículos de consumo duraderos, pinturas y cerámicas. El níquel es un metal vital para las sociedades industrializadas.

Químicamente, el níquel se asemeja al hierro y al cobalto, así como al cobre. El níquel puede formar diversos compuestos, como sulfato, cloruro, óxido e hidróxido. Una propiedad del níquel es su capacidad para reaccionar directamente con monóxido de carbono para formar un complejo carbonílico binario que es volátil a temperatura ambiente. A temperaturas moderadas el níquel es resistente a la corrosión por aire, agua de mar y agentes no oxidantes. Otra propiedad del níquel es su resistencia a la corrosión con álcalis. Por el contrario, el níquel es atacado por soluciones amónicas acuosas.

1.11.1.2 Fuentes de materiales

El níquel es un elemento que se encuentra normalmente en la naturaleza, principalmente en forma de minerales de sulfuro, óxido y silicato. Los yacimientos son de dos tipos principales:

- Los sulfuros de níquel se encuentran a menudo junto con cantidades económicamente recuperables de cobre, cobalto, oro, plata, metales del grupo del platino y varios otros metales. Los yacimientos más importantes se encuentran en Africa, Australia, Canadá y Siberia.

- Las lateritas de níquel son productos de la erosión de rocas ultrabásicas que originalmente contenían muy pequeñas cantidades de níquel. Con el tiempo las impurezas han sido erosionadas de los yacimientos por el agua y el níquel se encuentra presente en forma de un óxido complejo de silicio, hierro y magnesio. El cobalto y el hierro están normalmente asociados con el níquel, pero las lateritas no contienen otros componentes valiosos, Los yacimientos más importantes se encuentran en las zonas tropicales del Sudeste de Asia, Australia, Sudamérica, el Caribe y en la zona de los Balcanes, especialmente en Grecia, que es la única fuente de níquel en Europa en este momento.

La compleja metalurgia del níquel se refleja en la amplia gama de procesos de extracción y refinado que se utilizan. Cada planta presenta un conjunto único de características de proceso y de aspectos medioambientales. El contenido de níquel de los minerales de sulfuro puede normalmente ser concentrado varias veces mediante técnicas relativamente económicas de preparación mecánica de los minerales, antes de fundir el concentrado y refinarlo en productos de níquel.

Los minerales de laterita, por el contrario, sólo son susceptibles de un enriquecimiento limitado por métodos físicos, como técnicas magnéticas o de medios pesados, y por lo tanto casi todo el volumen debe pasar directamente a las plantas metalúrgicas. Por ello, el proceso de la laterita tiende a ser más costoso, aunque los costes de extracción son normalmente mucho menores que para los minerales de sulfuro.

Estas diferencias, más la disponibilidad de un valor añadido por los subproductos, pueden tener una influencia importante a la hora de determinar la viabilidad de un yacimiento específico y de si se produce metal refinado o ferroníquel a partir del mismo.

1.11.1.3 Producción y consumo

Los productos de níquel pueden dividirse en tres grupos de acuerdo con la clasificación de la industria reconocida internacionalmente:

Clase I - Níquel refinado, con un contenido de níquel del 99% o más. Este grupo incluye níquel electrolítico, bolitas, briquetas, gránulos, arandelas y polvo/copos.

Clase II - Níquel de carga, con un contenido de níquel inferior al 99%. Este grupo incluye el ferroníquel, la sinterización de óxido de níquel y el níquel para aplicación general.

Clase III - Productos químicos: óxidos, sulfato, cloruro, carbonato, acetato e hidróxido de níquel, etc.

La producción mundial de níquel se mantuvo por debajo de las 1.000 toneladas al año hasta 1876; actualmente es de aproximadamente 1 millón de toneladas al año. La producción mundial de níquel primario en 1996 fue de unas 950.000 toneladas, y la capacidad de producción de unas 1.200.000 toneladas. En Europa, la capacidad de producción es de unas 200.000 toneladas y el consumo es de unas 330.000 toneladas, por lo que debe importarse níquel.

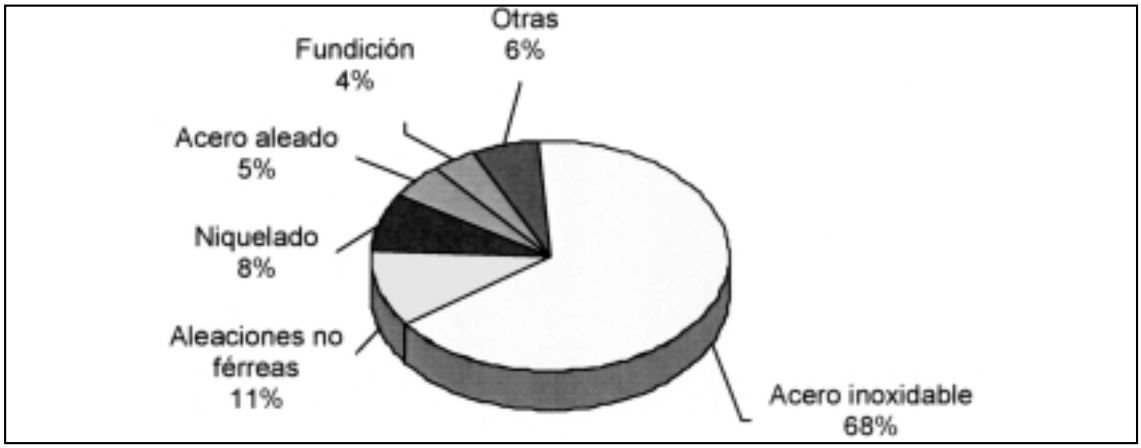


Figura 1.13: Aplicaciones del níquel en Occidente en 1996.

El consumo de níquel en Occidente aumentó en promedio un 6,5% anual entre 1945 y 1974. El consumo cayó bruscamente en 1975 y la demanda de níquel se mantuvo estable durante los diez años siguientes. El consumo níquel en Occidente aumentó de nuevo en 1987. la nueva recuperación en la demanda de níquel se inició en 1993 con un crecimiento del 15% en 1995 y todavía prosigue. El consumo mundial de níquel en 1996 fue de unas 940.000 toneladas y se espera que la demanda se mantenga fuerte.

1.11.1.4 Centros de producción

En Europa, el níquel se produce en los siguientes centros:

Tabla 1.27: Centros de producción de níquel

Productos	Fuente de materia prima	Capacidad de producción t/a Ni	Subproductos
Outokumpu, Finlandia	Finlandia, Noruega y Australia	36.000	Cu, Co, Acido Sulfúrico
Eramet, Francia	Nueva Caledonia	16.000	Cloruro de Cobalto Cloruro Férrico
Falconbridge, Noruega	Canadá y Botswana	85.000	Cu, Co, Acido Sulfúrico
INCO, Reino Unido	Canadá	41.000 (Ni en polvo y grano)	Sulfato de níquel
Treibacher, Austria	Secundaria	4.000	Se produce FeNi
Larco, Grecia	Grecia	20.000	Se produce FeNi
Total		202.000	

La producción total efectiva de estos centros fue de 167.900 toneladas para 1996 en comparación con 144.800 toneladas para 1994.

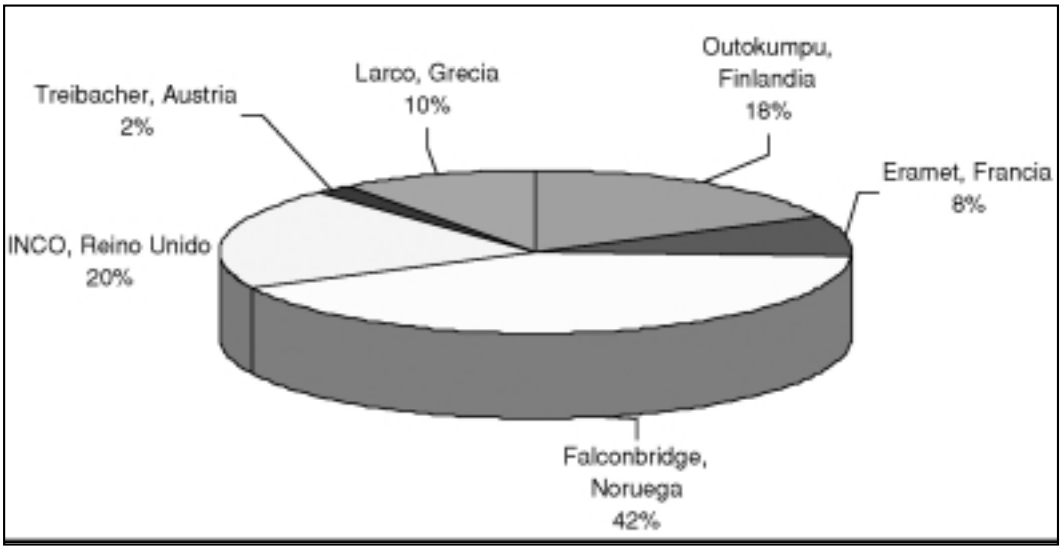


Figura 1.14: Producción europea de níquel.

1.11.1.5 Aspectos medioambientales

La emisión a la atmósfera de dióxido de azufre de la tostación y fundición de concentrados de sulfuro es un aspecto medioambiental potencialmente serio. Este problema ha sido resuelto efectivamente por las fundiciones de la UE, que actualmente consiguen un 98,9% de fijación del azufre y producen ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso líquido. Las emisiones fugitivas de polvo, metales y disolventes son también importantes y deben evitarse y controlarse. El uso del cloro en algunos procesos va asociado con poderosas medidas de prevención de fugas y las alarmas correspondientes.

Las principales cuestiones medioambientales asociadas con la producción de níquel secundario están también relacionadas con los gases de escape de los distintos hornos utilizados. Estos gases se limpian en filtros de tejido y por consiguiente pueden reducir las emisiones de polvo y de compuestos metálicos como plomo. Existe también el potencial de formación de dioxinas debido a la presencia de pequeñas cantidades de cloro en las materias primas secundarias y la destrucción de las dioxinas es un tema que se persigue.

El estatus de los compuestos de níquel tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el níquel se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II. Un grupo de trabajo técnico bajo la Directiva 96/62/CE sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire está desarrollando una norma de calidad del aire ambiente para el níquel. Por otra parte, el níquel ha demostrado ser un elemento esencial en ciertos microorganismos, animales y plantas.

El níquel es un elemento sostenible, el acero inoxidable y otras aleaciones con níquel son las fuentes principales de níquel secundario. Se estima que alrededor del 80 por ciento del níquel es reciclado a partir de chatarra de acero inoxidable antigua y retorna a ese mismo uso. Otras sustancias que contienen níquel, como los precipitados y residuos, son reciclados a la producción primaria.

En muchas aplicaciones, las aleaciones de níquel son esenciales y no pueden ser sustituidas por otros materiales. El uso del níquel en aplicaciones en las que se explotan sus propiedades de

tenacidad, resistencia a la corrosión, elevada conductividad, características magnéticas y propiedades catalíticas se considera un beneficio medioambiental positivo. Análogamente, el uso del níquel en pilas recargables es también beneficioso para el medio ambiente.

1.11.2 Cobalto

1.11.2.1 Información General

El cobalto [tm 36, Panorama 1997; tm 94, Nickel Expert Group 1998] es un metal blanco plateado con propiedades metálicas típicas, y fue aislado por vez primera en 1735. El cobalto metálico puro tiene pocas aplicaciones, pero su uso como elemento de aleación para aplicaciones resistentes al calor o al desgaste y como fuente de productos químicos lo convierten en un metal estratégicamente importante.

Aunque se utilizó muy poco cobalto metal hasta el siglo XX, sus minerales han sido utilizados durante milenios como agentes colorantes azules para vidrio y cerámica, por ejemplo en la cerámica egipcia de alrededor de 2.600 A.C. y en la cerámica china de alrededor de 700 A.C.. El uso del cobalto como metal data de 1907, cuando E. Haynes patentó una serie de aleaciones de cobalto-cromo denominadas Stellites que fueron las precursoras de las modernas superaleaciones. Su capacidad para mejorar las propiedades de los imanes comerciales fue puesta en evidencia en 1930.

El cobalto se utiliza en aleaciones, incluidas superaleaciones para aeronáutica, aleaciones magnéticas para imanes permanentes de gran potencia, aleaciones de metal duro para fabricar herramientas de corte, carburos cementados, aleaciones resistentes al desgaste o la corrosión, y aleaciones por electrodeposición para aplicar recubrimientos metálicos resistentes al desgaste y la corrosión.

Los productos químicos del cobalto se emplean en pilas recargables; como pigmentos en las industrias del vidrio, la cerámica y las pinturas; como catalizadores en la industria petrolífera; como secantes de pinturas; como aditivos metálicos en trazas para uso agrícola y médico.

1.11.2.2 Fuentes de materiales

Desde el principios del siglo XX, el principal suministro mundial de cobalto se desplazó desde Europa a Africa, Australia, Rusia y Canadá. La producción actual es de unas 30.000 t/a.

El cobalto de produce principalmente como subproducto de la minería y proceso de minerales de cobre y níquel. Los minerales de plata, oro, plomo y zinc pueden contener asimismo considerables cantidades de cobalto, aunque su proceso no siempre conduce a su recuperación. Las fuentes de minerales son:

- Los yacimientos de cobre-cobalto en Congo y Zambia.
- Los yacimientos de mineral de sulfuro en Australia, Canadá, Finlandia y Rusia.
- Los yacimientos de óxido de níquel en Cuba, Nueva Caledonia, Australia y Rusia.

La recuperación a partir de fuentes secundarias puede realizarse mediante la introducción del material reciclado en una etapa apropiada en un proceso primario de refinado o transformación, según sus posibilidades técnicas y económicas. Pueden ser necesarios pasos adicionales o de pretratamiento. Los productos finales pueden ser cátodos, polvos, óxidos, sales o soluciones.

1.11.2.3 Producción y consumo

El cobalto primario siempre se encuentra asociado con otros metales, particularmente cobre y níquel, y estos suelen ser predominantes. Según el material de partida, se han desarrollado diversos procesos que pueden comportar pasos pirometalúrgicos así como hidrometalúrgicos. Estos pasos producen:

- Una solución rica en cobalto en plantas integradas
- Un sulfuro rico en cobalto, hidróxido o carbonato si se realiza un refinado ulterior en otro lugar.
- Una aleación rica en cobalto.

El refinado ulterior es hidrometalúrgico, aunque la etapa final, la producción de un producto comercial, puede ser un proceso a alta temperatura, especialmente cuando el producto es en polvo y la actividad de refinado está integrada en el proceso de transformación. La capacidad de producción mundial es de unas 30.000 toneladas.

El cobalto se utiliza en diversas aplicaciones, que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1.28: Distribución de la producción total del cobalto entre los distintos sectores

Usos	Porcentaje de la producción total de cobalto
Aleaciones	34%
Cerámicas	12%
Metal duro	11%
Imanes	10%
Catálisis	8%
Herramientas de corte	6%
Pilas	6%
Cintas magnéticas	4%
Otras	9%

La demanda de cobalto en Occidente es de alrededor de 25000 t/año, de las que Europa representa aproximadamente un 25%. El uso del cobalto en pilas en una aplicación en crecimiento que requiere cobalto en forma de metal, óxido o hidróxido. La morfología del polvo es un factor importante.

1.11.2.4 Centros de producción

El cobalto y sus compuestos se producen principalmente en los mismos centros que producen níquel. Los centros se indican en la tabla 1.27 (en níquel). Además, Union Minière en Bélgica también produce cobalto.

La producción mundial se muestra en la siguiente figura 1.15.

1.11.2.5 Aspectos medioambientales

El estatus de los compuestos de cobalto tiene un impacto considerable en la evaluación de las emisiones, y el cobalto se incluye en la Directiva 76/464 sobre Sustancias Peligrosas para el Agua, en la Lista II.

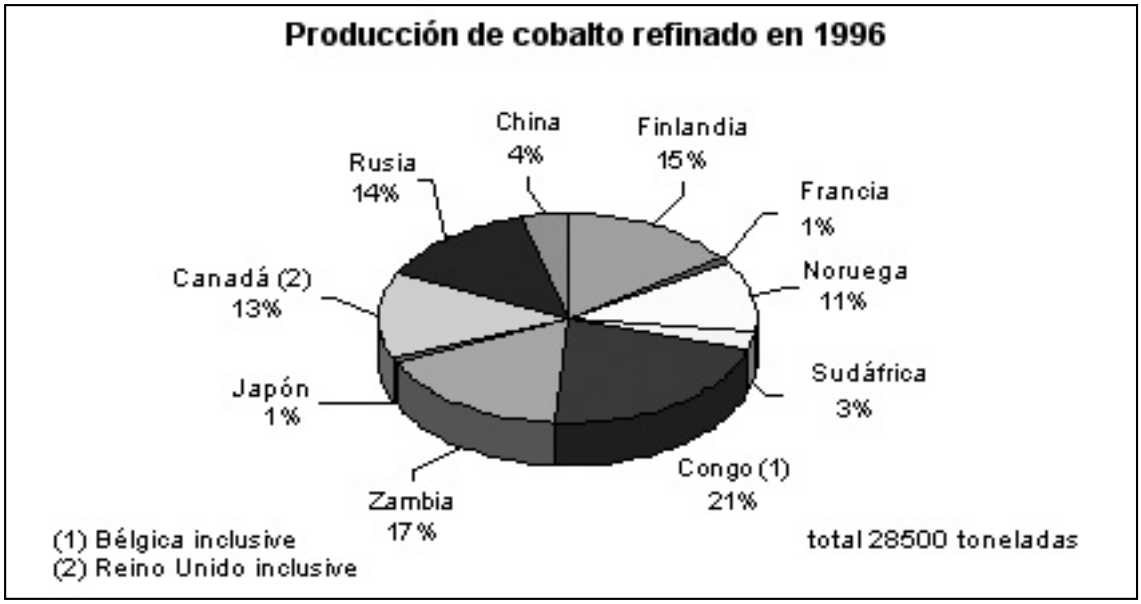


Figura 1.15: Producción mundial de cobalto.

Existe el potencial de emisiones de polvo y metales en las operaciones de desbaste, y en menor grado en las operaciones hidrometalúrgicas; de cloro en la electro-recuperación y de COVs en la extracción con disolventes; de metales en los efluentes de las operaciones hidrometalúrgicas de purificación y recuperación; de residuos sólidos en la purificación y tratamiento de efluentes. La industria utiliza una serie de técnicas para recuperar y producir cobalto que dependen esencialmente de la composición de materias primas y de los productos finales, por lo que la problemática concreta y la importancia de estos temas es específica de cada planta.

El uso del níquel en pilas recargables es beneficioso para el medio ambiente.

1.12 Carbono y Grafito

1.12.1 Información General

Existe una amplia gama de productos de carbono y grafito utilizados en la actualidad. Van desde grandes electrodos a pequeños casquillos y cojinetes. También se fabrican otros productos especializados como fibras de carbono y compuestos de carbono para industrias de alta tecnología que requieren la elevada resistencia y bajo peso de estos materiales.

El carbono existe en tres formas: diamantes, grafito y carbono amorfo. La diferencia entre los alótropos es esencialmente la estructura de los átomos de carbono, y la estructura determina las propiedades del material resultante. Los productos de carbono y grafito se utilizan en múltiples aplicaciones, dado que pueden diseñarse para tener características específicas de resistencia, tenacidad, propiedades eléctricas y mecánicas y especialmente elevada pureza y resistencia química en condiciones sin oxígeno, etc. para cumplir las exigencias de las aplicaciones particulares [tm 207, TGI 1999].

Los materiales de carbono y grafito se aplican principalmente para la conducción de energía eléctrica (cátodos y electrodos de grafito) y como agente reductor en la industria del aluminio (ánodos).

Los productos de carbono y grafito pueden dividirse básicamente en cuatro grupos de productos:

• Mezcla y pasta verde	Se utilizan principalmente en aleaciones de aluminio y ferroaleaciones, y para altos hornos en la industria del acero.
• Anodos	Se utilizan principalmente en la industria del aluminio y como agente de reducción química.
• Carbono y grafito	Se utilizan principalmente para el reciclaje del acero en el horno de arco y como cátodos para electrodos no consumibles en la industria del aluminio.
• Especialidades de carbono y grafito	Una amplia gama de productos que van desde una altísima pureza hasta productos con una enorme resistencia mecánica y térmica.

La aplicación de las especialidades de carbono puede dividirse básicamente en:

- Carbono y grafito de gran pureza.
- Aplicaciones de altas prestaciones mecánicas y térmicas.
- Productos técnicos como las fibras de carbono y grafito.
- Hojas de grafito y equipo de proceso.

Se producen ánodos y revestimientos de horno de carbono y grafito para una variedad de procesos de producción de metales férreos y no férreos, que se consumen durante la producción de los metales. Se producen más de 2000 productos distintos de diversos tamaños, formas y propiedades para otras aplicaciones. Los materiales de carbono y de grafito de alta pureza son esenciales para la producción de semiconductores y microchips, mientras que los electrodos de grafito para el reciclaje de chatarra y el carbono y grafito de elevada resistencia química se utilizan para la recuperación de residuos y el tratamiento de contaminantes.

1.12.2 Fuentes de materiales

La producción de materiales de carbono y grafito se basa principalmente en coque de petróleo y hulla, así como un coque altamente recocido basado en alquitrán de hulla. Las breas de petróleo y de alquitrán se utilizan como material aglomerante, que finalmente se convierte a carbono o grafito sólido inerte. Se utilizan sistemas aglomerantes a base de resinas, que son curados antes de su aplicación.

La calidad del coque depende de su procedencia, pero el factor más importante es el contenido en azufre del coque, ya que se emite como dióxido de azufre durante su fabricación o uso. Normalmente se utilizan coques de petróleo con contenido de azufre medio o medio para el producto principal como pasta, ánodos o electrodos.

Las propiedades de las materias primas deben ser muy constantes y se controlan mediante ensayos físicos y químicos. Se realizan ensayos de producción para probar nuevas materias primas, determinar su adecuación y ajustar los parámetros de producción al nuevo material. La calidad final de las materias primas se basa únicamente en las prestaciones y la aceptación del producto fabricado de carbono y grafito.

En la fabricación de carbonos especiales se utilizan otros materiales como metales, metales en polvo y diversas resinas.

1.12.3 Producción y consumo

El coque o carbono se aglomera normalmente con brea (14 a 18% en peso) para formar una pasta verde. Esta pasta pasa luego por una serie de etapas de conformación, cocción,

impregnación y grafitización para producir el producto final. La pasta verde se emplea directamente para electrodos de Søderberg. El proceso de cocción comporta una pérdida de peso del material de ~ 5%. En ciertos hornos se emplea coque de guarnición, y en estos casos se consume a un ritmo de ~14 kg/t de producto.

El carbono y el grafito se consumen en su mayoría durante su aplicación, convirtiéndose en anhídrido carbónico (por ejemplo, ánodos para electrodos de aluminio y acero). La producción de acero consume electrodos a un ritmo de 1,5 a 3 kg por tonelada de acero. Debido a la reducción significativa en los ritmos de consumo en algunas industrias, se han reducido las cantidades de carbono y grafito empleadas para la producción de aluminio y acero.

Las etapas de proceso y el tamaño del proceso varían según el producto. La industria del aluminio es de largo el mayor usuario de materiales de carbono y de ánodos de precocción, pasta de Søderberg y bloques catódicos. Generalmente las áreas de producción de especialidades de grafito son de menor escala que las de elecrodos. La siguiente tabla muestra el tamaño de las distintas áreas de producción.

Tabla 1.29: Producción anual de carbono y grafito en la UE y Noruega.

Tipo de producto	Producción t/a
Mezcla verde para electrodos de Søderberg o pasta	410.000
Anodos para Al primario	1.380.000
Electrodos	420.000
Especialidades de carbono y grafito	25.000

1.12.4 Centros de producción

Los productos de carbono y grafito se fabrican en 88 centros de la UE con una capacidad anual de ~ 2 millones de toneladas.

Tabla 1.30: Producción de la UE de carbono y grafito en miles de toneladas en 1998

País	Pasta verde	Anodos	Electrodos, formas grandes	Especialidades de carbono y grafito
Alemania		450(4)	117(3)	6.2(4)
Austria			15(1)	0.2(1)
Bélgica			18(1)	
Dinamarca				
España	81(1)	100(1)	52(2)	
Finlandia				
Francia		214(1)	62(2)	16(3)
Grecia		77(1)		81
Holanda		479(2)		
Irlanda				
Islandia				
Italia		85(1)	89(2)	0.2(1)
Luxemburgo				
Noruega	221(3)	162(2)		
Portugal				
Reino Unido	7(1)	148(3)	11(1)	2.2(1)
Suecia	37(1)	13(1)	34	
Suiza				

Notas:
El número entre paréntesis indica el número de productores en la UE.

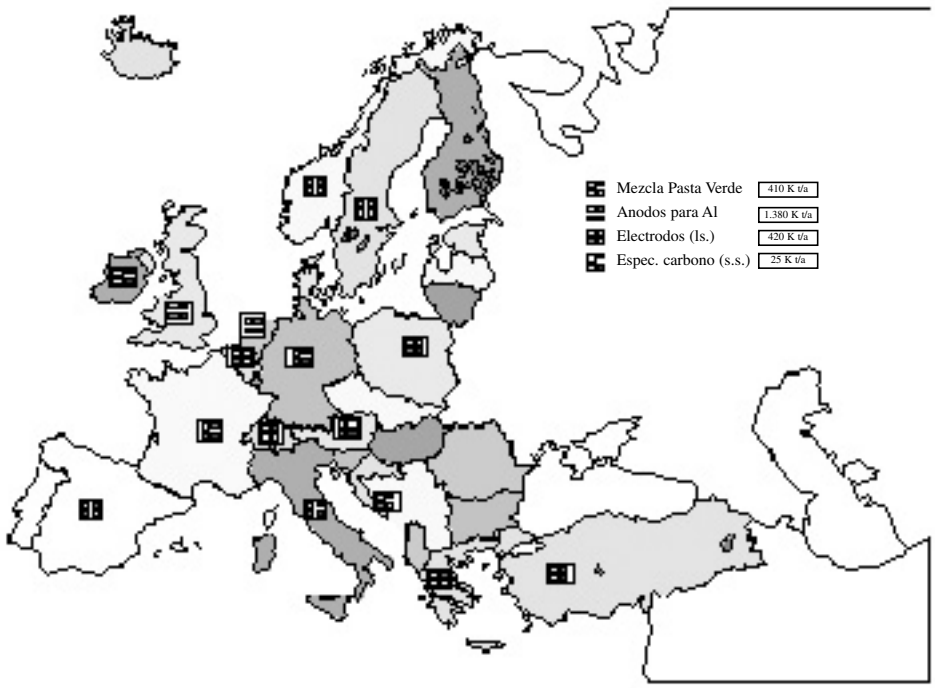


Figura 1.16: Centros de producción europeos de carbono y grafito.

La figura 1.16 muestra la distribución de la industria en Europa.

Hay una fuerte tendencia a cerrar la producción in situ de ánodos y pasar a un suministro externo. Algunos de los mayores productores in situ con capacidades de hasta 150.000 t/a suministran asimismo ánodos a las fundiciones de aluminio. La mayor planta europea, y posiblemente mundial, de producción de carbono, se encuentra en Holanda, con una capacidad de producción de 340.000 t/a que se ampliará a 375.000 t/a. No obstante, las mayores cantidades de ánodos se producen todavía en numerosas unidades in situ.

Una serie de empresas producen sólo cátodos debido al hecho de que la industria del aluminio requiere un periodo de vida útil muy largo. El ciclo de vida útil de un bloque catódico está entre 6 y 10 años. Las propiedades deben garantizar un buen rendimiento por lo que respecta a vida útil, resistencia eléctrica y resistencia a la abrasión.

1.12.5 Aspectos medioambientales

El principal impacto medioambiental de estos procesos es el impacto de las emisiones a la atmósfera de alquitranes y HAPs, dióxido de azufre del coque y combustibles y COVs de los agentes de impregnación. Se han desarrollado una serie de nuevos procesos de eliminación para destruir los alquitranes y los HAPs utilizando novedosos sistemas de postcombustión.

El principal aspecto medioambiental de la producción de carbono y grafito es el uso de mezclas complejas poliaromáticas de breas aglomerantes y de impregnación.

Las breas liberan compuestos de hidrocarburos polinucleados al ser carbonizadas. El benzopireno se utiliza como sustancia de referencia para controlar el carácter de las emisiones. Las emisiones se producen durante el almacenamiento, la mezcla y la conformación de la brea, en la carbonización en los hornos de cocción y durante la impregnación.

Si se utilizan coques con elevado contenido de azufre o aditivos sulfurados durante la producción de especialidades de carbono, puede formarse y emitirse dióxido de azufre.

Las emisiones de polvo o partículas son potencialmente importantes. Normalmente no se emplean materiales de grano fino para la producción de pastas, ánodos y electrodos, aunque sí para otros productos.

El progreso en las técnicas aplicadas para controlar el impacto sobre el medio ambiente ha sido considerable.

La contaminación del agua es en general un tema menor de la industria del carbono, ya que los procesos de producción son secos y generalmente utilizan sistemas cerrados de agua de refrigeración. Excepcionalmente puede usarse agua de superficie para refrigeración, cuando sea apropiado por las condiciones locales.

La industria del carbono y el grafito ha obtenido importantes éxitos en el reciclaje de los materiales de carbono (usados y sin usar) y en la apertura de nuevos campos de aplicación de dichos materiales, sustituyendo a otros recursos naturales.

2 PROCESOS Y EQUIPOS COMUNES

2.1 Organización del Capítulo

Existen muchos procesos y variaciones en equipos y técnicas que se emplean para la producción de metales no férreos. Estos procesos y variaciones deben ser abordados de forma lógica para permitir una presentación clara de la información. Muchas de las técnicas y etapas individuales de los procesos de producción son comunes para la mayoría de metales no férreos producidos, y estas etapas comunes pueden describirse de forma común para evitar una excesiva repetición. Estas etapas comunes pueden dividirse del modo siguiente:

- Gestión, diseño y formación;
- Recepción, almacenamiento y manipulación de materias primas;
- Preproceso y pretratamiento de las materias primas y transferencia a los procesos de producción;
- Tipos de hornos y técnicas de control de proceso;
- Recogida de humos y técnicas de eliminación;
- Reutilización de agua y tratamiento de efluentes;
- Prevención, minimización, reciclaje y tratamiento de los residuos de proceso (incluidos subproductos y residuos).

Además, en el presente capítulo se cubren los siguientes aspectos comunes:

- Medición de emisiones y uso de los datos de emisiones;
- Recuperación de energía y de calor ;
- Efectos sobre otros medios;
- Ruido y vibraciones;
- Olor;
- Desmantelamiento.

Las técnicas para reducir el impacto medioambiental de una instalación pueden englobarse en tres categorías:

- Técnicas de gestión: Relativas a los sistemas y procedimientos para el diseño y la operación de un proceso y para la formación de operativos y demás personal;
- Técnicas integradas de proceso: Relativas al uso de técnicas para evitar o reducir las emisiones de actividades como almacenamiento, reacción, separación y purificación;
- Técnicas de reducción de energía y de eliminación: Relativas a las técnicas en los puntos de salida para reducir las emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo.

Este capítulo describe brevemente las técnicas comunes de estas tres categorías que se utilizan en este sector. Cuando es posible, se da una indicación de las técnicas que pueden impedir o reducir las emisiones a cada uno de los entornos medioambientales. Este capítulo también indica dónde pueden usarse estas técnicas en las distintas etapas de proceso para mejorar los procesos existentes. Este aspecto se desarrolla en los capítulos específicos de los distintos metales que siguen.

Los **procesos de producción metalúrgica** para los 10 Grupos identificados por el Grupo de Trabajo Técnico se cubren en los capítulos 3 a 12 respectivamente. Las técnicas a considerar en la determinación de las MTD en estos capítulos incluyen descripciones de procesos más detalladas, ejemplos y esquemas. También ofrecen en mayor detalle el modo operativo del proceso integrado y dónde se aplican las variaciones en las técnicas descritas en el Capítulo 2, por ejemplo el modo en que difieren los hornos de la descripción genérica. Se ha utilizado este enfoque para minimizar las descripciones repetitivas y para permitir la transferencia de información y técnicas entre los diez grupos.

Las Mejores Técnicas Disponibles no se especifican para todos los procesos comunes descritos en el presente capítulo, sino que los distintos procesos y técnicas comunes contribuyen a las Mejores Técnicas Disponibles descritas en los capítulos 3 a 12. Además, las técnicas descritas en este capítulo son también adecuadas para reducir las emisiones globales y por consiguiente incluirán en el modo en que se mejoren las plantas existentes.

El Capítulo 2 debe usarse en conjunción con los capítulos 3 a 12 para tener una imagen del ciclo de producción completo. Por ejemplo, los capítulos 2 y 3 ofrecen la gama completa para la producción de cobre y sus aleaciones.

2.1.1 Instalaciones que producen varios metales o tienen procesos asociados in situ

Un número considerable de instalaciones producen varios metales de los distintos grupos o tienen procesos asociados integrados con ellos. Son ejemplos el proceso de bauxita en una fundición de aluminio, la presencia de una planta de producción de ánodos en una fundición de aluminio o la producción de una gama de distintos metales a partir de materias primas complejas, en particular Cu, plomo, zinc y metales preciosos.

Los elementos de las Plantas Integrales pueden encontrarse en distintas partes del BREF, como por ejemplo detalles sobre limo anódico en metales preciosos; detalles sobre ánodos precocidos en el Capítulo 12, y otros metales dentro de su capítulo específico. El capítulo que describe el metal principal contiene algunas referencias a estos procesos, como la producción de limo anódico en el capítulo del Cu y la presencia de una planta de ánodos en el capítulo del Al. Esta sección sobre integración explicará dónde se encuentran estas secciones y referencias cruzadas, e informará sobre el modo en que puede enfocarse una planta compleja.

Tabla 2.1: Procesos que pueden formar parte de instalaciones integrales

Materiales producidos en la misma Instalación	Capítulos que contienen detalles sobre proceso y otros	Capítulos que contienen una visión	Comentario
Alúmina a partir de bauxita en una fundición de Al.	Capítulo 4 Aluminio	Capítulo 4 Aluminio	Integrado con algunas instalaciones
Anodos precocidos producidos en una fundición de Al.	Capítulo 12 Carbono y Grafito	Capítulo 4 Aluminio	Se tienen en cuenta factores de eliminación común.
Plomo, zinc, metales preciosos con la producción de cobre.	Capítulo 5 Plomo, Zinc y Capítulo 6 Metales Preciosos	Capítulo 3 Cobre (más información principal sobre Cu)	Cierta duplicación entre Cu y los otros capítulos.
Níquel, cobalto y cobre	Capítulo 3 Cu y Capítulo 11 Ni, Co	Capítulo 11 Ni, Co	
Mercurio durante la producción de otros metales	Capítulo 7 Mercurio Capítulo 2	Capítulo 3 Cu Capítulo 5 Pb, Zn	Eliminación de mercurio de los gases de fundición antes de la planta de ácido.
FeCr, FeSi, FeMn etc.	Capítulo 9 Ferroaleaciones	Capítulo 9	Se tienen en cuenta factores de eliminación común. Recuperación de energía.
Metales refractarios	Capítulo 8 Metales Refractarios	Capítulo 8	
Ferroaleaciones y metales refractarios	Capítulos 8 y 9	Capítulos 8 y 9	

2.2 Medición de emisiones y uso de los datos de emisiones

Esta sección tiene por finalidad asegurar que las emisiones señaladas en el presente documento se midan de modo que los resultados sean representativos, comparables entre sí y que describan claramente el correspondiente estado operativo de la planta. Los métodos e instrumentos empleados deben ser los correspondientes Métodos Nacionales o Internacionales (ej. Comité Europeo de Estandarización [CEN]; ISO; Directrices VDI; Reglamento Holandés sobre Emisiones - C4 [NER]; Directrices Británicas: British Standards etc.).

2.2.1 Medición de emisiones

La medición de emisiones se utiliza para determinar las sustancias en los gases o aguas residuales limpios, de modo que puedan reportarse, utilizarse para controlar la planta de proceso o de eliminación o utilizarse para predecir el impacto medioambiental. Las emisiones fugitivas (no capturadas) pueden también estimarse mediante medición. Antes de la medición, pueden hacerse planes para tener en consideración:

- el modo de operación,
- el estado operativo de las plantas de purificación de gas o de tratamiento de efluentes,
- las condiciones operativas de la planta (en continuo, en discontinuo, operaciones de puesta en marcha o de parada, cambio de carga), y
- el efecto de factores de interferencia termodinámica.

Estos factores pueden luego formar la base para la selección de condiciones operativas a las cuales: puedan registrarse las emisiones más altas; pueda seleccionarse el número y la duración de las mediciones; pueda escogerse el método de medición más apropiado; y pueda determinarse la posición de los lugares y puntos de medición. Para emisiones de aguas residuales pueden utilizarse muestras aleatorias cualificadas o bien muestras compuestas de 24 horas basadas en muestras proporcionales al flujo o promediadas en función del tiempo.

Para operaciones continuas, normalmente es necesario un tiempo mínimo de recogida de muestras de media hora (valor medio de media hora). Si el contenido en polvo es bajo o si debe determinarse PCDD/PCDF, pueden ser necesarios tiempos de medición más largos y, en consecuencia, pueden ser necesarios otros tiempos de referencia debido a la limitación de la detección. El muestreo o la medición deberá tener lugar sólo durante la operación del proceso, y deberá excluirse el aire de dilución. Para operaciones continuas, si sólo se registran ligeras fluctuaciones en las características de las emisiones, pueden realizarse 3 mediciones individuales al nivel de emisión más alto. Si se anticipa que el nivel de emisiones va a ser muy variable durante el funcionamiento continuo, pueden realizarse más mediciones; los tiempos de muestreo y de promedio deben estar limitados a la fase con emisiones.

Para operación en discontinuo, el tiempo de medición y el tiempo de promedio deberán modificarse de modo que puedan tomarse muestras a lo largo de todo el lote de producción . De nuevo, el muestro o las mediciones sólo deberán hacerse durante periodos de operación, y debe excluirse el aire de dilución.

2.2.1.1 Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo deben cumplir los requisitos de las correspondientes Directrices Nacionales. Normalmente, los puntos de muestreo deberán:

- estar claramente marcados,
- si es posible, tener un flujo sin perturbaciones en la sección de medición,

- tener puntos de control que puedan cerrarse,
- tener los suministros de energía requeridos,
- tener plataformas de trabajo suficientemente amplias, y
- asegurar que se cumplan los requisitos de seguridad en el trabajo.

2.2.1.2 Componentes y parámetros

Los componentes más comunes medidos en el Sector de Metales No Férreos incluyen polvo, metales, dióxido de azufre, carbono total (también COVs, alquitranes e hidrocarburos), dioxinas, óxidos de carbono y óxidos de nitrógeno. Los ácidos como HCl y HF se determinan para algunos procesos, al igual que los cloruros y fluoruros. Determinantes específicos son los CPFs y HAPs para aluminio primario, los HAPs para carbono y grafito y algunos determinantes que son específicos para algunos de los reactivos utilizados para la producción de metales preciosos. Los componentes se indican en los capítulos específicos de los metales, y los métodos de análisis se dan en las correspondientes Directrices Nacionales e Internacionales sobre monitorización y análisis.

El análisis de algunos parámetros puede estar cubierto por métodos establecidos por otros entes, por ejemplo OSPARCOM. A este respecto, en este momento, varios de los métodos empleados en el muestreo y la medición de emisiones de la producción primaria de aluminio y la producción de ánodos de precocción están definidos por OSPARCOM o están sujetos a evaluación. El número de HAPs a determinar y el protocolo para reportar algunos o todos no se conocen con seguridad en este momento, y las recomendaciones futuras de OSPARCOM pueden resolver este punto.

2.2.1.3 Condiciones de referencia

Para las emisiones a la atmósfera, deberán asimismo determinarse los siguientes parámetros para convertir las concentraciones de emisiones obtenidas a condiciones normales de 273 ºK, 101,3 kPa, contenido de oxígeno medido y gas seco:

- el flujo volumétrico de gases de escape (para calcular la concentración y la masa del caudal de emisiones),
- la temperatura del gas de escape,
- el contenido de vapor de agua del gas de escape,
- la presión estática en el conducto del gas de escape, y
- la presión atmosférica.

También puede señalarse el ritmo de producción de modo que las emisiones puedan indicarse como emisiones específicas por tonelada de metal. También puede calcularse el volumen específico de gas m^3 por tonelada de metal.

2.2.1.4 Medición continua

Es posible realizar la medición continua de diversos componentes en los gases o aguas residuales, y en muchos casos pueden indicarse concentraciones precisas de forma continua o como valores medios a lo largo de periodos de tiempo acordados (cada media hora, diariamente, etc.). En estos casos, un análisis de los promedios y el uso de percentiles puede facilitar un

método flexible para mostrar el cumplimiento con las condiciones permitidas, y los valores medios pueden ser evaluados de forma fácil y automática.

Hay métodos disponibles para medir de forma continua:

- Polvo
- SO_2
- NO_x
- CO
- Flúor y sus compuestos
- Cloro y sus compuestos
- Carbono Total

Las autoridades competentes pueden requerir una medición continua según el volumen de contaminante. La conductividad, la turbidez, el pH y algunas especies iónicas pueden ser monitorizados de forma continua para el agua.

Incluso en casos en los que no sea posible acordar valores absolutos como valores fiables, es posible utilizar la medición continua para ofrecer tendencias en las emisiones y como parámetros de control para la planta de proceso o eliminación, por lo que es muy importante.

También pueden usarse algunos parámetros físicos para dar una indicación de la presencia de ciertos componentes en el caudal de gas. Por ejemplo, la presencia de un efecto anódico puede indicar la producción de CPFs en la producción de aluminio primario, y la temperatura o el contenido de polvo y oxígeno del gas pueden dar una indicación de las destrucción de dioxinas. El pH puede también usarse para indicar la precipitación efectiva de metales.

2.2.2 Cómo informar sobre los datos de emisiones

Cualquier informe de medición y protocolo de emisión debe ajustarse a las Directrices Nacionales e Internacionales relevantes.

El informe puede contener:

– el objetivo,
– información general sobre las mediciones,
– una descripción de la planta, su estado y datos operativos,
– las condiciones operativas durante la medición,
– información sobre el planing de mediciones,
– los lugares de muestreo,
– los métodos de medición,
– presentación en forma de tablas de las mediciones individuales, incluidas temperaturas, caudales de gas o volúmenes,
– evaluación de los resultados,
– consideración de errores,
– presentación de las medidas de garantía de calidad, y
– un resumen.

Los actuales datos de emisiones de este documento se señalan normalmente como medias horarias o diarias o como emisiones en peso por tonelada de producción, la dilución de los gases o del agua residual no se considera aceptable. Ambos métodos de informe son útiles para definir el comportamiento y el impacto de un proceso. Las autoridades competentes utilizan normalmente unidades de concentración (mg/Nm^3 o mg/l) y/o factores de emisión específica (g/t de metal) en sus permisos o en los datos presentados para las emisiones. Las dos formas de datos

pueden relacionarse siempre que haya datos disponibles de los volúmenes de gases de todas las etapas de proceso. Esto no siempre es así, por lo que en este documento las emisiones asociadas con el uso de las MTD se indican normalmente como medias de concentración diaria basadas en la medición continua durante el periodo de funcionamiento. Se utilizan las condiciones normales de 273 ºK, 101,3 kPa, contenido de oxígeno medido y gas seco.

En los casos en los que la medición continua no es practicable, el valor será la media a lo largo del periodo de medición. Las concentraciones de metales u otras sustancias en agua o en aguas residuales se indican como total de materias solubles e insolubles. Las emisiones en agua que se hayan notificado o estén asociadas con las MTD se basan en una muestra aleatoria cualificada o en una muestra compuesta de 24 horas.

En este momento no se dispone de suficientes datos fiables para permitir indicar las emisiones específicas asociadas con las MTD en paralelo con las concentraciones.

2.2.2.1 Interrelación entre concentración y emisiones específicas

Cuando haya información disponible, puede proporcionarse una interrelación para transformar las unidades de concentración en factores de emisión específica. Los datos de emisiones en ambas formas son muy útiles para los controladores y operarios. No obstante, al comparar o convertir datos en estas formas, debe tenerse mucho cuidado para tener en consideración las emisiones fugitivas (no capturadas). Las emisiones fugitivas pueden formar la mayor parte de las emisiones totales, según el proceso.

En el siguiente ejemplo se utiliza una conversión simple de emisiones promediadas anualmente para mostrar cómo convertir la concentración del contaminante a controlar (mg/Nm^3) en la carga volumétrica específica (m^3/t de metal) y el factor de emisión específica (g/t de metal). Para un centro de producción complejo, el total de todos los metales producidos se utilizaría normalmente para presentar las emisiones específicas.

a) Concentración de polvo medida sobre una base anual, que se halla normalmente disponible en forma de un rango derivado de la medición continua (mg/Nm^3)

b) Concentración media anual de polvo (mg/Nm^3)

c Caudal volumétrico horario de gas de escape (Nm^3/h)

d) Tiempo de funcionamiento anual (h/a)

c x d = e

e) Volumen anual de gas de escape (Nm^3/a)

b x e = f mg/a

f) Emisión anual de polvo (kg de contaminante/a)

g) Capacidad de producción anual (t de metal /a)

e ÷ g = h

h) Volumen específico de gas de escape (Nm3/t)

f ÷ g = i kg/t

i) Factor de emisión específica (kg/t de metal)

Este cálculo se basa en un conocimiento fiable de los siguientes datos:

- Concentración de polvo sobre la base de una media anual (mg/Nm^3)
- Caudal volumétrico horario de gas de escape (Nm^3/h)
- Tiempo de funcionamiento anual (h/a)
- Capacidad de producción anual (t de metal /a)

Estas interrelaciones se basan en el conocimiento de valores medidos como por ejemplo el rango de concentraciones anuales de polvo y el caudal y el caudal volumétrico real, que luego debe convertirse en promedios anuales. Los resultados de estos cálculos son sólo válidos para emisiones capturadas y se basan en valores medios.

En el caso de una planta nueva o de un cambio sustancial en una instalación existente, la interrelación arriba indicada puede basarse en valores calculados teóricamente o estimados. Los datos deben tener en cuenta cualquier incertidumbre en la medición, por ejemplo el volumen de los gases de algún proceso puede variar con la composición del concentrado. Basarse en las capacidades nominales de los extractores puede llevar a errores, ya que normalmente se utilizan extractores de velocidad variable. Este problema de medición de volumen se encuentra asimismo en la estimación de las emisiones no capturadas o fugitivas, dado que el muestreo y la medición de los gases fugitivos es incierto en este momento.

2.2.2.2 Uso de los datos de emisiones

Cuando hay información disponible, el cálculo de las emisiones anuales de polvo (kg/a) y de los factores de emisión específica de un contaminante (g/y de metal producido) permite:

- Determinar la magnitud de las distintas fuentes de emisiones a la atmósfera y al agua, tanto dentro de una instalación como entre instalaciones.
- Las emisiones fugitivas pueden expresarse en peso emitido por unidad de tiempo o en peso por tonelada de metal producido. Ver sección 2.7.
- Disponer de una base para determinar las prioridades para la gestión medioambiental futura de una planta o la aplicación de un “concepto de burbuja” para las emisiones a la atmósfera o al agua en centros de producción complejos si se desea.

La siguiente tabla indica las cifras de emisiones anuales de polvo para algunas partes de un proceso de producción de cobre primario [tm 213, PRAM 1999] que produce 170.000 t/a de cobre negro.

Tabla 2.2: Ejemplo de datos para la determinación de prioridades

Sistema	Factor de emisión específica para polvo [g/t de Cu]
Secador	0,2
Tostador	1,5
Filtro del convertidor	0,7
Peletización	0,1
Granulación de escoria	7,2
Moldeo de ánodos	36,7
Ventilación de la nave	19,3

En este caso particular, la ecuación [b x e = f] permite calcular la emisión específica de polvo y conduce a la conclusión de que el moldeo de ánodos y la ventilación de la nave son las fuentes individuales más importantes de emisiones de polvo, por lo que hay que darles prioridad.

- Los efectos a largo plazo y de largo alcance de las emisiones puede determinarse usando modelos de dispersión y otras técnicas.

El uso de chimeneas altas mejora la dispersión de los gases y puede producir impactos medioambientales a mayor distancia de la instalación. Componentes como el dióxido de azufre

pueden tener un alcance muy largo y efectos acumulativos, y en algunos casos pueden superarse las "cargas críticas" de algunas especies para ciertos contaminantes. La dispersión no es por lo tanto un sustituto de las bajas emisiones.

El uso de concentraciones basadas en parámetros y métodos de medición definidos permite la medición continua de muchos parámetros. Estos parámetros pueden estar vinculados al sistema de eliminación que se utilice. La medición de concentraciones permite:

- Una fácil demostración del cumplimiento.
- Una demostración del comportamiento "en tiempo real".
- Un alto grado de control de la eliminación y una pronta advertencia de fallos en el equipo.

2.3 Sistemas de gestión

Una gestión eficaz es importante para conseguir un buen comportamiento medioambiental. Es un componente importante de las MTD y forma parte de la definición de las técnicas que se incluye en el Artículo 2 de la Directiva.

El trabajo realizado en la preparación del presente documento ha mostrado que existen muchas diferencias significativas entre el comportamiento medioambiental de un proceso con una buena gestión y operación y un proceso idéntico con mala gestión y operación. Los sistemas de gestión y comunicación son algunos de los factores más significativos en esta diferencia.

La consecución de un buen comportamiento requiere un compromiso a todos los niveles de la empresa, comenzando a nivel del Consejo de Dirección o de establecimiento de políticas, y en él deben estar implicados la dirección del centro de producción, el personal de supervisión y los operarios. El sistema debe establecer objetivos, fijar metas y comunicar las instrucciones y resultados. Sistemas de gestión medioambiental como ISO14001 y EMAS o un sistema de gestión de calidad como ISO 9000 pueden ser útiles al formalizar el sistema.

Aunque no son un requisito de la Directiva, en una instalación debe tenerse en consideración los beneficios que puedan derivarse de la adopción de un sistema de este tipo. Las técnicas empleadas pueden también mejorar los aspectos económicos al mejorar la eficacia operativa, reducir costes como los energéticos o de desecho y mejorar el aprovechamiento de los metales. Estas técnicas son por consiguiente factores esenciales de una instalación moderna.

2.3.1 Política y compromiso de gestión

Un sistema de gestión eficaz puede incluir los siguientes factores:

- La determinación de todos los impactos sobre la salud, la seguridad y el medio ambiente de las actividades, productos y procesos.
- La comunicación de la política a los empleados y contratistas para asegurar que estén al corriente del compromiso y participen en su consecución.
- El uso de una estructura clara para la gestión de los aspectos medioambientales que esté plenamente integrada en los sistemas generales de toma de decisiones de la empresa y de la localidad.
- El comportamiento medioambiental del proceso depende en gran medida de la atención y diligencia del operario del proceso. Es importante que tenga una conciencia clara de su papel en el comportamiento medioambiental.
- El comportamiento medioambiental global puede controlarse de forma regular, y los

resultados pueden formar parte del proceso de evaluación de la dirección. Pueden idearse indicadores de comportamiento medioambiental y comunicarlos a los operarios, recogiéndose sus impresiones al respecto, que pueden ser utilizadas.
- Pueden prepararse planes de contingencia que determinen los posibles tipos de incidentes que pueden ocurrir y faciliten una guía clara de cómo deben afrontarse y quién se encargará de ello. Pueden prepararse procedimientos para detectar, dar respuesta y aprender de todas las quejas e incidentes.
- Cuando se estén poniendo en marcha nuevos procesos, o cuando se vuelvan a poner en marcha procesos existentes después de modificaciones, puede prepararse un plan de puesta en marcha que determine claramente los aspectos a controlar y las personas encargadas del comportamiento medioambiental del proceso durante el periodo de puesta en marcha.

2.3.2 Diseño y mantenimiento

La Directiva requiere la consecución de "un elevado nivel de protección del medio ambiente en su conjunto". El diseño y el mantenimiento son los factores que tienen mayor influencia en el cumplimiento de este requisito al evaluar el efecto de la planta existente y de cualquier proceso nuevo o sustancialmente modificado sobre el grado de protección de la atmósfera, el agua y el suelo. Este requisito puede conseguirse como sigue:

- Las implicaciones medioambientales (ruido inclusive) de una materia prima o proceso nuevo o sustancialmente modificado deben considerarse en las fases tempranas del proyecto y deben seguir siendo revisadas a intervalos regulares con posterioridad. Este es el momento más eficaz desde el punto de vista de costes para introducir mejoras en el comportamiento medioambiental global. Un registro de control del proceso de diseño y toma de decisiones es un método útil para mostrar el modo en que se han considerado los diversos procesos y opciones de eliminación. Es necesario planear los aspectos de puesta en marcha para las plantas nuevas o modificadas.
- Las posibles emisiones fugitivas deben tenerse en consideración en todas las etapas.
- Debe utilizarse y registrarse un programa de mantenimiento preventivo. Debe ir unido a ensayos de diagnóstico cuando proceda.
- Los sistema de extracción local deben examinarse regularmente y reparar con prontitud los defectos o daños que puedan presentar.
- Todos el personal debe ser consciente del papel que desempeña en el mantenimiento de la vigilancia, por ejemplo en relación con los daños en campanas y conductos o averías en plantas. Deben utilizarse procedimientos apropiados para alentar la participación del personal y responder a los informes.
- Debe utilizarse un procedimiento interno para autorizar modificaciones y realizar controles tras cualquier modificación, antes de que se ponga en marcha el proceso.

2.3.3 Formación

- Todo el personal debe ser consciente de las implicaciones para el medio ambiente del proceso y de sus actividades laborales.
- Debe haber una estipulación clara de la capacitación y las competencias requeridas para cada tarea.
- La formación impartida al personal involucrado en la operación de procesos deberá incluir las implicaciones de su trabajo y los procedimientos para abordar los incidentes.
- El mantenimiento de archivos de la formación impartida al personal de operación de procesos puede ser muy útil para asegurar una formación progresiva y completa.

- La formación de otros departamentos en los aspectos medioambientales y las consecuencias que afectan a la instalación pueden asimismo ser eficaces en la prevención de los conflictos que afectan al comportamiento medioambiental. Por ejemplo, los equipos de administración y ventas pueden tener una influencia considerable en el comportamiento medioambiental. Por ejemplo, medidas contables precisas pueden determinar un excesivo consumo de materias primas y pueden determinar los verdaderos costes energéticos y de desecho de las etapas de proceso; la aparición de suministros y ventas imprevistas puede producir problemas de producción y causar incidentes.

2.4 Recepción, almacenamiento y manipulación de materias primas y residuos

Las principales materias primas utilizadas en la producción de metales no férreos son los minerales y concentrados, las materias primas secundarias, los combustibles (aceite, gases y combustible sólido) y los gases de proceso (como oxígeno, cloro y gases inertes). También se emplean otros materiales como fundentes, aditivos y productos químicos de proceso (ej. para los sistemas de eliminación). Esta variedad de materiales plantea muchos problemas de manipulación y almacenamiento, y la técnica específica empleada depende de las propiedades físicas y químicas del material. El estudio ha identificado el uso de las siguientes técnicas.

2.4.1 Técnicas y procesos aplicados

2.4.1.1 Minerales y concentrados

Los minerales y concentrados pueden ser suministrados al centro de producción por carretera, ferrocarril o barco. En estos puntos se emplean de forma extensiva sistemas de recogida y eliminación de polvo.

El control de procesos adquiere cada vez mayor importancia para mejorar la eficacia de conversión, reducir el consumo de energía y reducir las emisiones, y se basa con frecuencia en un sistema eficaz de muestreo, análisis y registro de materias primas destinado a establecer condiciones operativas óptimas de los procesos. Esto influye sobre la elección de las técnicas de almacenamiento y manipulación.

La descarga, almacenamiento y distribución de materiales sólidos se realiza mediante técnicas similares a las empleadas para combustibles sólidos. Generalmente para estos materiales se adoptan métodos de contención más estrictos, ya que suelen ser más reactivos, tienen una tamaño de partícula menor y se suspenden en el aire o se incorporan al agua con mayor facilidad. Normalmente se utilizan dispositivos automáticos de cierre rápido. Los agentes fundentes o de desescoriado también se reciben in situ y se manipulan de forma similar a los minerales y concentrados.

Los minerales y concentrados (si forman polvo) y otros materiales polvorientos se almacenan normalmente en recintos cerrados. También se utilizan almacenes y silos cerrados y cubiertos. Los almacenes grandes se utilizan para el material grande y voluminoso, pero normalmente se constituyen sobre una superficie dura e impermeable, como cemento, para evitar las pérdidas de material, la contaminación del suelo y la contaminación del mineral. Algunos materiales grandes no se almacenan sobre una superficie dura, ya que pueden producirse desperfectos en la superficie y causar problemas ocultos. A menudo se emplean paneles para separar las distintas calidades de mineral.

Los minerales y concentrados son empleados normalmente por instalaciones grandes y por consiguiente no suele ser frecuente que se utilicen para almacenamiento intermedio y la

preparación de mezclas de mineral/fundente. Se utilizan sistemas de silos y sistemas transportadores que registran "pérdidas de peso" para medir las cantidades de minerales y fundentes y conseguir mezclas eficaces y optimizadas que mejoren el control de proceso.

Normalmente se utilizan pulverizadores de agua para eliminar el polvo, pero algunas empresas requieren alimentar los procesos en seco y son reticentes al uso de pulverizadores de agua. Se utilizan métodos alternativos, como el uso de atomizadores para producir finas neblinas de agua, para la supresión del polvo sin humedecer en exceso el material. Algunos concentrados contienen de forma natural suficiente humedad para evitar la formación de polvo.

Pueden usarse agentes sellantes (como melazas, cal o Acetato de Polivinilo) para evitar la formación de polvo en condiciones de viento. El sellado puede evitar la oxidación de las capas superficiales y la subsiguiente filtración del material a las aguas superficiales.

La descarga de materiales puede ser una posible fuente de importantes emisiones de polvo. El principal problema ocurre cuando un vagón u otro vehículo tipo volquete descarga por gravedad. La velocidad de descarga es incontrolada y produce un gran volumen de aire desplazado y de polvo, que puede saturar los sistemas de extracción de humo. Para evitar este problema se utilizan recintos cerrados de descarga con cierre automático de puertas.

Se utilizan pantallas de policarbonato, que hermetizan el volquete del polvo. En este caso, el aire desplazado se pasa a una sección armada con resortes y a un contenedor de reposo para absorber la energía de la descarga; el aumento en el volumen de aire queda amortiguado, lo que permite que sistema de extracción pueda absorberlo.

El material puede distribuirse mediante transportador de alimentación subterráneo, grúa de cuchara o cargador frontal-posterior, utilizándose asimismo transportadores totalmente cerrados para transportar el material que forma polvo. También se usa la transferencia mediante sistemas neumáticos de fase densa. Para los materiales que forman polvo, pueden usarse sistemas de extracción y filtrado para absorber el polvo de los puntos de descarga estática y de los puntos de transferencia a transportadores. En el caso de utilizar transportadores abiertos, puede producirse polvo si la cinta transportadora va demasiado rápida (por ej. a más de 3,5 m/s). Si se utiliza un cargador frontal-posterior, puede generarse polvo durante toda la distancia de transporte.

Pueden adherirse sólidos a las ruedas u otras partes de los vehículos y contaminar las carreteras dentro y fuera del centro de producción por lo que con frecuencia se emplean sistemas de limpieza de ruedas y bajos (u otras técnicas de limpieza si las temperaturas son gélidas) para descontaminar los vehículos.

Para mantener las carreteras internas limpias, suelen utilizarse limpiadores de carreteras u otros equipos especializados que emplean chorros de agua y recogida al vacío.

Los materiales que contienen componentes de gran preocupación medioambiental, como plomo y cadmio, son tratados con las más eficaces de las medidas indicadas.

2.4.1.2 Materias primas secundarias

Este sector es particularmente activo en la recuperación de metales de diversidad de fuentes, y en consecuencia utiliza una amplia gama de materias primas secundarias. La chatarra metálica, las materias de derivación superficial, los polvos de combustión o de filtración y las escorias se utilizan como fuentes de metales no férreos, y estos materiales contienen una serie de metales o compuestos metálicos. Las materias primas secundarias se utilizan asimismo en algunos procesos primarios.

La fuente de la materia prima secundaria puede dar información sobre las emisiones potenciales debidas a la presencia de ácidos, aceites, contaminantes orgánicos (que pueden

producir dioxinas durante el proceso de fusión), aniones y componentes como amoníaco de la reacción del material de derivación superficial con la humedad. Esto influye directamente sobre las posibles emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo, y puede emitirse cualquiera de los componentes de estos materiales. Los materiales se comprueban (ej. mediante inspección y clasificación) por si presentan contaminación e impurezas imprevistas, lo cual puede ser eficaz desde el punto de vista económico para mantener un producto más limpio y reducir las emisiones.

El estado físico del material también afecta los métodos de almacenamiento y manipulación. Estos materiales pueden ser polvorientos o aceitosos, y su tamaño puede ir desde polvo fino a componentes enteros. Estos factores afectan los métodos de suministro, manipulación y almacenamiento utilizados. Las técnicas empleadas para las materias primas primarias se utilizan conjuntamente con las descritas a continuación.

Las materias primas secundarias pueden suministrarse al centro de producción como material suelto, en bolsas de transporte o en bidones. El estado físico del material dicta el método de suministro y de almacenamiento empleados. La fuente de material también tiene un impacto significativo, y existen varios métodos para la determinar la calidad del material. En la mayoría de casos se practica control de calidad y análisis del material de entrada.

Los componentes grandes y los materiales en forma de virutas o triturados se almacenan en áreas concretas que pueden estar en un lugar abierto, cubierto o dentro de naves. Algunos materiales grandes no se almacenan en superficie dura, ya que la misma podría resultar dañada. El material se almacena normalmente en almacenes separados para mantener separadas las distintas calidades y composiciones de las aleaciones.

Los materiales polvorientos y los materiales de derivación superficial también se almacenan en almacenes separados, que pueden estar en un lugar abierto, a cubierto o dentro de naves. Estos materiales pueden ser pirofóricos o reaccionar con humedad para formar amoníaco u otros gases como arsina o estibina, según su composición. El método de almacenamiento debe por lo tanto tener en consideración estos factores. Los materiales polvorientos fríos pueden recubrirse con material como melazas para formar una estructura de migas que no forma polvo. El recubrimiento no afecta a los procesos pirometalúrgicos.

Las materias primas secundarias pueden estar contaminadas con gran variedad de otros materiales, como aceites, ácidos y materia orgánica que podría ser arrastrada a los sistemas de desagüe. La posible contaminación del agua de lluvia o de otras aguas por tales contaminantes debe tenerse en cuenta en el diseño de métodos de almacenamiento y en el tratamiento de las aguas de estas áreas. Para evitar emisiones al agua se emplean zonas delimitadas, suelos impermeables e interceptadores de aceite.

Los materiales se manipulan mediante diversos métodos según su almacenaje. Se utilizan grúas de cuchara, transportadores y palas. Las materias secundarias a menudo deben mezclarse antes de su proceso o pretratamiento, y para ello se utiliza un almacenamiento intermedio.

Las materias primas secundarias que contienen componentes con elevado riesgo medioambiental, como plomo y cadmio, se tratan con las medidas más eficaces.

2.4.1.3 Combustibles

El combustible puede usarse directamente como fuente de calor, como agentes reductor o como ambos a la vez. Esto debe determinarse para cada instalación. Los combustibles pueden ser suministrados a la instalación por conducciones, carretera, ferrocarril o barco. Los métodos empleados para el suministro están fuera del ámbito del presente documento, pero el uso de transporte por carretera para suministros frecuentes puede originar ruido y congestiones.

El suministro y almacenamiento del combustible es controlado normalmente por un operario para evitar vertidos y fugas, las técnicas empleadas son las siguientes:

a) Combustibles líquidos

Los camiones y trenes cisterna son la forma más frecuente de suministro. Los sistemas de almacenamiento *in situ* incluyen el uso de tanques de almacenamiento ventilados o de techo flotante, ubicados en áreas o recintos herméticos con capacidad suficiente para albergar el contenido del tanque de almacenamiento de mayor volumen (o el 10% del volumen total de los tanques individuales si es mayor). Se emplean interceptadores de aceite eficaces para evitar la evacuación de aceite en el agua.

La ventilación de los gases del gas de almacenamiento al mismo tanque de suministro se practica con frecuencia, a menos que se utilicen tanques de almacenamiento de techo flotante. Cuando se suministran líquidos y gases licuados, se utiliza el cierre automático de los conductos de conexión. Las conexiones de suministro se sitúa dentro del recinto.

Es práctica común realizar controles regulares del contenido del tanque para detectar posibles fugas y que el margen de volumen sea seguro para la recepción de nuevos suministros. Se utilizan alarmas. Ocasionalmente se utilizan atmósferas inertes.

También pueden utilizarse conducciones para el suministro de combustible líquido, que pueden incorporar tanques de almacenamiento intermedios. La distribución del combustible desde los tanques de almacenamiento al proceso se realiza normalmente mediante conducciones elevadas, mediante zanjas de servicio o con menor frecuencia por conducciones subterráneas. Se utilizan barreras para proteger las conducciones elevadas contra posibles daños. El uso de conducciones subterráneas impide la pronta detección de fugas de combustible que pueden causar contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

Si existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la zona de almacenaje deberá ser impermeable y resistente al material almacenado.

b) Combustibles gaseosos

La conducciones son el sistema de suministro más común para combustibles gaseosos. Aunque el GLP puede considerarse un líquido, se usan las mismas técnicas. Los gases de proceso se tratan más adelante.

Algunos procesos pirometalúrgicos (ej. la producción carbotérmica de ferroaleaciones en hornos de arco eléctrico cerrados y sumergidos) producen un gas de escape rico en monóxido de carbono como subproducto. La cantidad de CO varía en gran medida según el metal y el proceso de producción. El gas de escape puede contener CO desde bajas cantidades (gas CV bajo) hasta un 90% (gas CV alto). El gas se limpia (ej. en un lavador húmedo en cascada) y luego se distribuye por el centro como combustible secundario o se vende a talleres vecinos. El exceso de gas se utiliza para la producción de electricidad o se quema.

El suministro de gases está asociado a menudo con equipos de reducción de presión y ocasionalmente con equipo de compresión. En todos los casos, se realizan frecuentes chequeos de presión y volumen para detectar fugas, y se utilizan monitores de gas para controlar el lugar de trabajo y en las proximidades de los tanques de almacenamiento.

Una vez, más la distribución por el centro suele realizarse mediante conducciones elevadas o conductos en zanjas de servicio, y se aplican métodos de protección contra posibles daños.

c) Combustibles sólidos

Se utilizan suministros por carretera, ferrocarril o barco. Se utiliza almacenaje en silos, almacenes cerrados o abiertos y en naves según el tipo de combustible (ej. coque, carbón, etc.) y su tendencia a formar polvo.

Los almacenes abiertos no se utilizan frecuentemente, pero los existentes están diseñados para ofrecer una cara uniforme en pendiente al viento y pueden tener paredes de retención para reducir el efecto del viento y contener el material. El material puede distribuirse mediante transportador de alimentación inferior, grúa de cuchara o cargador frontal-posterior.

Los sistemas transportadores están diseñados para minimizar en el número de cambios de dirección y la altura de caída en dichos cambios para reducir los derrames y la formación de polvo. Se utilizan transportadores cerrados, cubiertos o abiertos según el potencial de formación de polvo; se utiliza extracción y filtración de polvo si es necesario. En el caso de transportadores abiertos, puede producirse polvo si la cinta corre demasiado rápido (ej. a más de 3,5 m/s). Se utilizan rascadores de cinta para limpiar la sección de retorno del transportador y evitar derrames.

Puede controlarse el contenido de humedad del combustible para evitar la emisión de polvo. Con los materiales secos y finos, el polvo puede ser explosivo.

Algunos almacenes abiertos se tratan con pulverizadores de agua y agentes sellantes (como Acetato de Polivinilo) para evitar la formación de polvo en condiciones de viento; algunas sustancias como los agentes sellantes pueden también evitar la oxidación superficial del combustible. La materia sólida puede ser arrastrada a los sistemas de desagüe, por lo que a menudo se utiliza una sedimentación eficaz para evitar las emisiones al agua de los almacenes abiertos.

El combustible sólido puede ser distribuido al centro de producción por camión, cinta transportadora o sistema neumático de “fase densa”. Estos sistemas normalmente incorporan equipo de extracción de polvo y de filtración.

2.4.1.4 Productos químicos y gases de proceso

Los ácidos, álcalis y otros reactivos químicos son utilizados con frecuencia en el proceso principal y en el equipo de eliminación, y también pueden producirse durante el proceso. Pueden usarse para la lixiviación de metales, precipitación de compuestos o para los procesos de tratamiento de los gases de escape o los efluentes. Como parte del proceso pueden producirse compuestos químicos.

El proveedor especifica por lo general el correcto almacenamiento de estos materiales. Muchos de estos reactivos pueden reaccionar entre sí y los métodos de almacenamiento y manipulación deben tenerlo en cuenta, separando las materias reactivas. Los líquidos se almacenan normalmente en bidones o bolsas (bolsas grandes) internamente, con sistemas de desagüe aislados, utilizándose silos para algunas sustancias como la sal. Se emplean sistemas de transporte neumático.

Se utilizan gases para diversas aplicaciones en la producción de metales no férreos. La industria puede utilizar grandes cantidades de gases de proceso y el consumo de gases particulares influye sobre el método empleado para transporte y distribución.

El oxígeno se utiliza para mejorar la combustión, realizar oxidación y mejorar los procesos de conversión, mientras que el gas natural o el propano se utilizan para reducir los óxidos metálicos. El cloro se utiliza en el paso de cloración de la producción electrolítica de magnesio, para desgrasar el metal fundido y para eliminar los componentes metálicos no deseados (ej.

magnesio). El monóxido de carbono y el hidrógeno se utilizan en los procesos principales. El hidrógeno y el dióxido de azufre se utilizan para reducir óxidos y sales. El cloro y el oxígeno se emplean en el proceso de lixiviación. En los procesos de producción de los distintos metales se discuten aplicaciones específicas.

El operador puede producir gases in situ aunque disponga de producción de gas bajo contrato, y estas instalaciones también suministren a otros centros de producción. Varios centros utilizan oxígeno para mejorar la combustión y nitrógeno para la supresión de chispas de los materiales pirofóricos. El mismo proceso criogénico o de oscilación de presión produce ambos gases, y el nitrógeno de baja calidad producido puede ser adecuado para algunas operaciones de inercia. De forma similar, los gases de combustión con bajo contenido en oxígeno se utilizan para evitar la ignición espontánea.

Los gases pueden ser transportados mediante un vehículo cisterna o por conducciones. El cloro se almacena normalmente en forma líquida en bidones o tanques, y se distribuye a través de una línea de evaporación y aspiración, con lo que se evitan las fugas de gas. El control y la medición de presión de las existencias permite la detección de fugas para todos los gases.

El equilibrado de los caudales y la decantación a presión se utilizan para mezclas de gases (ej. mezclas de argón/cloro). Para pequeños volúmenes, pueden suministrarse gases premezclados.

La distribución de gases dentro del centro de producción se realiza normalmente mediante conducciones elevadas con buenos sistemas de protección contra posibles daños. El uso y la distribución de cloro está regulado por los reglamentos sobre Salud y Seguridad.

2.4.1.5 Residuos

Los procesos en este sector producen gran variedad de residuos. Muchos de ellos constituyen la base de materias primas para otras partes de la industria. La sección anterior que describe las materias primas secundarias sobre la mayoría de las técnicas empleadas. En capítulos posteriores se describen con mayor detalle los residuos específicos de los procesos y técnicas para manipulación y almacenamiento.

2.4.2 Emisiones presentes y niveles de consumo

El consumo de materias primas depende del metal que se produce, y estos datos se incluyen en los capítulos 3 a 12.

Hay emisiones potenciales de COVs a la atmósfera y de aceites al agua o al suelo durante la carga, almacenamiento, descarga y transferencia de líquidos y gases. Hay emisiones potenciales de COVs a la atmósfera derivadas de la respiración de los tanques y de roturas de conducciones.

Hay emisiones potenciales de polvo y metales a la atmósfera y al suelo de las operaciones de carga y descarga, la transferencia y almacenamiento de materiales sólidos y la re-suspensión del polvo de las zonas de almacenamiento y transportadores. Los sólidos en suspensión, metales, aceites y diversos aniones como sulfatos (según el metal y su tratamiento) pueden ser emitidos al agua.

Las emisiones de estas fuentes son normalmente fugitivas y son difíciles de cuantificar. Puede hacerse algunas estimaciones a partir de muestreos medioambientales como calibre de depósitos para polvo o para muestras de aguas superficiales. Este capítulo se concentra pues en la técnicas empleadas para evitar las emisiones de la manipulación de materias primas.

2.4.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de las emisiones y residuos, así como técnicas para la reducción del consumo global de energía. Todas ellas están disponibles comercialmente. Se facilitan ejemplos para demostrar las técnicas, que ilustran un alto nivel de comportamiento medioambiental. Las técnicas que se muestran en los ejemplos dependen de la información facilitada por la industria, los Estados miembros Europeos y la Oficina Europea de IPPC.

Las técnicas aplicadas arriba citadas son capaces de prevenir las emisiones a todos los medios del entorno hasta un cierto grado. Las técnicas empleadas dependen en gran medida del material utilizado. Por ejemplo, los materiales grandes y pesados se tratan con una serie de técnicas completamente distintas a las utilizadas para materiales finos y polvorientos. Estos aspectos son específicos de cada uno de los centros de producción y materiales. No obstante, existen varias técnicas que se consideran de gran eficacia en la prevención de emisiones derivadas de la manipulación de materias primas. Estas técnicas son:

- El uso de sistema de almacenamiento de líquidos que los contenga en recintos impermeables y con capacidad para contener al menos el volumen del tanque de almacenamiento más grande del recinto. Existen diversos reglamentos dentro de cada unos de los Estados miembros, que deben cumplirse según proceda. Las zonas de almacenamiento deben estar diseñadas de modo que las fugas de las partes superiores de los tanques y de los sistemas de suministro queden recogidas y contenidas dentro del recinto. El contenido del tanque debe indicarse y deben utilizarse las alarmas asociadas. El uso de suministro planificados y de sistemas de control automático para evitar un llenado excesivo de los tanques de almacenamiento.
- El ácido sulfúrico y otras sustancias reactivas deben también almacenarse en tanques de doble pared o tanques colocados en recintos químicamente resistentes de la misma capacidad. El uso de sistemas de detección de fugas y de alarmas es una medida razonable. Si existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la zona de almacenamiento debe ser impermeable y resistente al material almacenado.
- Los puntos de suministro deben estar contenidos dentro del recinto para recoger los derrames de materias. Debe practicarse la devolución por ventilación de los gases desplazados al vehículo de suministro para reducir las emisiones de COVs. También debe estudiarse el uso del cierre automático de la conexiones de suministro para evitar derrames.
- Las materias incompatibles (como las sustancias oxidantes y orgánicas) deben estar separadas y utilizarse gases inertes para los tanques o zonas de almacenamiento si es necesario.
- El uso de interceptadores de aceites y sólidos si es necesario para el desagüe de las áreas de almacenamiento abiertas. El almacenamiento de materiales que puedan emitir aceite en zonas recubiertas de cemento que tengan curvas u otros dispositivos de contención. El uso de métodos de tratamiento de efluentes para las especies químicas almacenadas.
- Cintas transportadoras y conductos de transferencia situados en lugares seguros y abiertos por encima del suelo, de modo que las fugas puedan detectarse de forma rápida y puedan evitarse los daños derivados de vehículos y otros equipos. Si se utilizan conducciones soterradas, su curso puede estar documentado y marcado, adoptándose sistemas de excavación seguros.
- El uso de depósitos bien diseñados y robustos para gases a presión (incluidos GLPs) con control de la presión de los tanques y de los conductos de suministro para evitar rupturas y fugas. Deben utilizarse monitores de gas en zonas confinadas y cerca de los tanques de almacenamiento.

- Cuando sea necesario, pueden usarse sistemas herméticos de suministro, almacenamiento y distribución para materiales polvorientos, así como silos. Pueden usarse naves completamente cerradas para el almacenamiento de materiales polvorientos con el fin de no tener que utilizar dispositivos de filtración especiales.
- Pueden usarse agentes sellantes (como melazas y PVA) cuando procesa y sea compatible con el fin de reducir la tendencia de los materiales a formar polvo.
- Cuando sea necesario, pueden usarse transportadores cerrados con equipos de extracción y filtración bien diseñados y robustos en los puntos de suministro, silos, sistemas de transferencia neumática y puntos de transferencia de transportadores, para evitar la emisión de polvo.
- El material no polvoriento e insoluble puede almacenarse en superficies herméticas con desagüe y recogida de desagües.
- Las virutas, virutas de torno y otros materiales aceitosos deben almacenarse a cubierto para evitar que el aceite sea arrastrado por el agua de lluvia.
- Deben usarse sistemas de transporte racionalizados para minimizar la formación y transporte de polvo dentro del centro de producción. Las aguas de lluvia que arrastren el polvo deben recogerse y tratarse antes de su evacuación.
- El uso de sistemas de lavado de las ruedas y de la carrocería o de otros sistemas de limpieza de los vehículos empleados para suministrar o manipular materiales polvorientos. Las condiciones locales, como la posible formación de hielo, pueden influir en el método empleado. Pueden usarse campañas planificadas para la limpieza de las carreteras.
- Pueden adoptarse sistemas de control de stocks y de inspección para prevenir derrames y detectar fugas.
- Pueden incorporarse sistemas de muestreo y análisis al sistemas de manipulación y almacenamiento de materiales con el fin de determinar la calidad de la materia prima y el método de proceso. Estos sistemas deben estar diseñados y operados al mismo alto estándar de calidad que los sistemas de manipulación y almacenamiento.
- Las áreas de almacenamiento para reductores, como carbón, coque o virutas de madera deben supervisarse para detectar posibles incendios causados por ignición espontánea.
- El uso de buenas prácticas de diseño y construcción, así como de un mantenimiento adecuado.

2.5 Preproceso y Transferencia de Materias Primas

2.5.1 Procesos y técnicas aplicadas

Los minerales, concentrados y materias primas secundarias tienen en ocasiones una forma que no puede usarse directamente en el proceso principal. Puede ser necesario efectuar un secado/descongelado por motivos de control o seguridad. El tamaño del material puede tener que aumentarse o reducirse para promover ciertas reacciones o reducir la oxidación. Es posible que deban añadirse agentes reductores como carbón o coque y fundentes u otros elementos formadores de escoria para controlar el proceso metalúrgico. También es posible que los recubrimientos deban ser eliminados para evitar problemas de eliminación en los procesos y mejorar las velocidades de fusión. Todas estas técnicas se utilizan para producir un material de entrada más controlable y fiable para el proceso principal, y también se utilizan en la recuperación de metales preciosos para analizar la materia prima de modo que sea posible calcular los costes de recuperación.

2.5.1.1 Descongelación

La descongelación se realiza para permitir la manipulación del material congelado. Esto ocurre por ejemplo cuando se descargan minerales, concentrados o combustibles fósiles como el carbón desde un tren o barco en invierno. La descongelación puede realizarse con chorros de vapor para fundir el hielo y poder descargar la materia prima.

2.5.1.2 Secado

Los procesos de secado se utilizan para producir una materia prima adecuada para el proceso de producción principal. La presencia de agua se suele evitar por diversos motivos:

- Es peligroso que se produzcan grandes volúmenes de vapor de forma rápida en un horno muy caliente.
- El agua puede producir una demanda variable de calor en un quemador de concentrado, que desajusta el centro del proceso y puede inhibir el funcionamiento autotérmico.
- El secado separado a bajas temperaturas reduce los requisitos energéticos. Esto es debido a la energía requerida para el sobrecalentamiento del vapor dentro de una fundición y el aumento significativo en el volumen global de gas, que aumenta la carga de trabajo de los extractores.
- Efectos de corrosión.
- El vapor de agua puede reaccionar con el carbono para formar H_2 y CO.

El secado se realiza normalmente mediante la aplicación de calor directo de un quemador o de chorros de vapor, o indirectamente con vapor o aire caliente en serpentines de intercambio de calor. El calor generado por los procesos pirometalúrgicos se utiliza también muchas veces con este fin, así como el gas rico en CO que puede quemarse para secar las materias primas. Se utilizan hornos rotativos y secadores de lecho fluidizado. El material seco es generalmente muy polvoriento y se utilizan sistemas de extracción y eliminación para recoger los gases con polvo. El polvo recogido es devuelto al proceso. Los minerales y concentrados secos pueden también ser pirofóricos, y el diseño del sistema de eliminación normalmente lo tiene en cuenta, pudiendo aplicarse una atmósfera de nitrógeno o el bajo nivel de oxígeno residual de los gases de combustión para suprimir la ignición. Los gases de escape del secador pueden contener SO_2, por lo que debe estudiarse si hay que proceder a su tratamiento.

2.5.1.3 Trituración y reducción de tamaño

La trituración y reducción de tamaño se practica para reducir el tamaño de los productos, residuos o materias primas, de modo que sean adecuadas para su venta o proceso ulterior. Se utilizan muchos tipos de trituradoras, como trituradoras de cono y de bolas. Los materiales húmedos o secos son triturados, pudiendo incluirse una etapa de mezcla. El equipo específico empleado dependerá de las materias primas a tratar. La trituración en seco es potencialmente una importante fuente de emisión de polvo, utilizándose sistemas de extracción y eliminación, y el polvo recogido se devuelve al proceso. Los materiales pueden triturarse en estado húmedo cuando la formación de polvo pueda causar problemas y cuando a continuación haya etapas de compactación o peletización en estado húmedo.

La granulación se utiliza para producir pequeñas partículas de escoria, que son adecuadas como material para granallado, relleno para asfaltado de carreteras o material que puede ser reprocesado para recuperar su contenido metálico. La escoria fundida es moldeada en un baño de agua o colada a través de una corriente de agua. La granulación también se utiliza para producir

proyectiles metálicos. Los procesos de granulación pueden tener el potencial de formar polvo fino y aerosoles, que deben controlarse.

Los componentes electrónicos son una fuente de diversos metales no férreos, y pueden triturarse en trituradoras o molinos para desprender las placas de circuito impreso y otros materiales de los componentes metálicos, de modo que pueda producirse la separación.

2.5.1.4 Rotura de baterías y pilas

La rotura de baterías se utiliza para recuperar plomo, níquel, cadmio y otros materiales de las baterías y pilas. Para las baterías ácidas de plomo, se utilizan molinos de martillo para romper las cajas de las baterías y liberar el plomo (en forma de rejillas) y los compuestos de plomo (en forma de pasta) y permitir la recuperación del material plástico de las cajas (principalmente polipropileno); el electrolito también se extrae y se trata o utiliza. Puede utilizarse una trituración en dos etapas para controlar el tamaño de las partículas y evitar que el óxido de plomo quede impactado en el plástico en una trituradora de una sola etapa. El material plástico es separado y lavado para mejorar su calidad y producir plástico que sea adecuado para reciclaje. El contenido ácido de las baterías puede contaminar el suelo y el agua si no se recoge y manipula adecuadamente; pueden usarse sistemas de desagüe herméticos resistentes al ácido con tanques de recogida y almacenamiento especiales. Las etapas de trituración pueden producir una niebla ácida, que puede recogerse en lavadores húmedos o filtros de neblina.

Las pilas de Ni/Cd se pirolizan para eliminar el recubrimiento de plástico y abrir las pilas. La pirólisis se realiza a bajas temperaturas y los gases son tratados en un sistema de postcombustión y un filtro de bolsa. El cadmio y el níquel son recuperados de los electrodos, y acero de la carcasa.

2.5.1.5 Mezcla

La mezcla se realiza para mezclar minerales y concentrados de distintas calidades y combinar fundentes o reductores, si es necesario, con el mineral para producir un material de alimentación estable para el proceso principal. La mezcla puede realizarse con equipos de mezcla especiales en la etapa de trituración o durante las etapas de transporte, secado y almacenamiento. Se producen mezclas precisas mediante sistemas de almacenaje que registran la pérdida de peso, balanzas de cinta transportadora o medidores de volumen en el equipo de carga. La mezcla es una operación que puede producir mucho polvo, por lo que se utilizan elevados niveles de contención y extracción. El polvo recogido es devuelto al proceso. También se utiliza mezcla húmeda para evitar la formación de polvo; se produce una pasta aguada que luego se deshidrata y se utiliza en un proceso de peletización. A este efecto pueden también usarse agentes de recubrimiento y compactantes. Según el proceso, el material mezclado deberá compactarse antes de cualquier proceso ulterior como la sinterización.

2.5.1.6 Briquetado, peletización y otros métodos de aglomeración

Para tratar los concentrados, polvos de combustión u otros materiales secundarios se utilizan muchas técnicas, entre las que se incluyen el embalado de hilo o chatarra pequeña, la compresión de briquetas de material como se ha indicado anteriormente y la extrusión o laminación de pastas para producir bolas de material de tamaño uniforme. A este efecto se utilizan agentes de recubrimiento y compactantes, que tienen por objeto reducir la formación de polvo en pasos de proceso subsiguientes.

La briquetas y pastillas, que contienen una mezcla de mineral fino o concentrado, polvo reciclado y material adicional como agentes reductores, se producen frecuentemente para asegurar condiciones de fundición eficaces. Tras agregar compactantes o agua, la mezcla es alimentada a una prensa, que a menudo produce briquetas en forma de almohada, o es peletizada en un tambor de peletización giratorio o en un disco de peletización. El material aglomerante debe tener unas propiedades tales que las briquetas tengan suficiente cohesión en fresco para poder ser manipuladas fácilmente y no romperse cuando se cargan en el horno.

Pueden usarse varios tipos de aglomerantes, como melaza y cal, silicato sódico, escoria de acero o cemento, y también reducen la formación de polvo. Puede agregarse brea para mejorar la cohesión en fresco. Las fracciones espesas de polvo de filtro del filtro de bolsa del horno y el polvo de filtro de las operaciones de trituración y cribado pueden mezclarse con los otros materiales a briquetar.

2.5.1.7 Sinterización y calcinación

Estos procesos se utilizan para aumentar el tamaño de materia prima o su composición química de modo que sea adecuada para su proceso ulterior. La aglomeración y la sinterización permiten un flujo de gas más uniforme a través del lecho del horno y reducen la formación de polvo, el volumen de gas y las emisiones fugitivas [tm 109, UNEP 1993].

La sinterización y la calcinación se utilizan asimismo con este fin, y además se utilizan para ajustar la forma química de la mezcla o convertir el azufre presente, como en la calcinación de dolomita en dolomita calcinada en la producción de magnesio. El principal mecanismo de aglomeración en la sinterización se consigue calentando el mineral hasta una temperatura en la que los minerales de la ganga comienzan a fundirse, en la que las partículas individuales se funden juntas en una matriz de escoria fundida. En algunos casos, la recristalización, es decir, la formación de nuevos cristales a lo largo de los anteriores límites de grano, puede influir en el proceso de sinterización. El sinterizado normalmente se tritura y se clasifica, y los materiales finos se devuelven al proceso de sinterización, a veces el material devuelto es 2 - 4 veces mayor que el sinterizado producido. Las partículas se envían a la fundición.

La sinterización y tostación de minerales de sulfuro se realizan a menudo conjuntamente a altas temperaturas, y en este caso los gases producidos tienen un elevado contenido de dióxido de azufre. La oxidación del azufre proporciona el calor necesario para el proceso. Generalmente, el mineral se mezcla con sinterizado de retorno y agentes fundentes, y puede peletizarse antes de la sinterización. En el caso de óxidos, se agrega también coque.

Las plantas de sinterización utilizan una parrilla móvil, una parrilla continua o una correa de acero para llevar el material a través de las zonas de calentamiento y de enfriamiento; algunas plantas utilizan paletas de acero para contener el material de alimentación. Los gases se extraen hacia arriba o hacia abajo a través del lecho (sinterización con tiro ascendente o descendente). También se utiliza una maquina de sinterización que utiliza una combinación de las etapas de tiro ascendente y descendente, lo que permite minimizar lo volúmenes de gas y las emisiones fugitivas, así como recuperar el calor de forma eficaz. En ocasiones se emplea una capa de material sinterizado entre la parrilla y la mezcla para proteger la parrilla de acero.

La sinterización de minerales de sulfuro es exotérmica, otros materiales utilizan gas natural como combustible. Los gases calientes se reciclan normalmente para precalentar el lecho o el aire de combustión El sinterizado se enfría mediante aire que circula sobre el lecho, o mediante inmersión en agua. El sinterizado es luego cribado y en ocasiones triturado para producir un material de alimentación final de tamaño constante. Los materiales finos se devuelven al proceso de sinterización.

La calcinación se realiza en hornos rotatorios de lecho fluidizado o de solera múltiple, normalmente no hay adición de carbono durante el proceso. La calcinación de los concentrados de sulfuro realiza la etapa de tostación y se discute en los capítulos de producción de los metales.

2.5.1.8 Procesos de volatilización

Estos procesos se utilizan para volatilizar los metales volátiles como el plomo y el zinc desde un sustrato. El proceso utiliza altas temperaturas y una fuente de carbono para producir una escoria inerte mediante la vaporización o volatilización de metales del material. Esto permite recuperar los metales, normalmente en forma de óxido, para su proceso ulterior. Se utilizan hornos Waelz y hornos de volatilización de escoria. La volatilización también se realiza durante los procesos de conversión en discontinuo, cuando se eliminan los metales volátiles durante el proceso.

2.5.1.9 Eliminación de recubrimientos y de aceites

Estas operaciones se realizan normalmente sobre materias primas secundarias para reducir el contenido orgánico del material de entrada a algunos procesos principales. Se utilizan procesos de lavado y de pirólisis. La centrifugación permite recuperar aceite y reducir la carga sobre el sistema térmico. Las variaciones importantes en el contenido orgánico pueden causar una combustión ineficaz en algunos hornos y producir volúmenes elevados de gases de combustión con compuestos orgánicos residuales. La presencia de recubrimientos puede también reducir de forma significativa la velocidad de fusión [tm 121, Hoogovens 1998, tm 125, ETSU 1994]. Esto puede causar emisiones considerables de humo, dioxinas y polvos metálicos a la atmósfera, a menos que los sistemas de recogida de gases y de combustión sean suficientemente potentes. Pueden producirse chispas o partículas en combustión que pueden causar considerables daños al sistema de eliminación. La eliminación de recubrimientos de la chatarra contaminada dentro del horno es también menos eficaz en muchos casos que la eliminación del recubrimiento en material triturado en un horno separado, debido a la producción de más escoria [tm 125, ETSU 1994], pero algunos hornos están especialmente diseñados para admitir contaminantes orgánicos.

La eliminación de aceite y de algunos recubrimientos se realiza en un horno especialmente diseñado como un secador de escoria. En la mayoría de casos se utiliza un horno rotatorio a baja temperatura para volatilizar el aceite y el agua. Se utiliza calentamiento directo e indirecto del material. Se utiliza un sistema de postcombustión operado a alta temperatura (más de 850 ºC) para destruir los productos orgánicos producidos en el horno, y los gases se filtran normalmente en un filtro de tejido.

El desprendimiento mecánico se utiliza frecuentemente para eliminar el aislamiento de cables y recubrimientos de otros materiales. Algunos procesos utilizan técnicas criogénicas para hacer que el recubrimiento sea quebradizo y por consiguiente más fácil de eliminar. También puede realizarse un lavado con disolventes (en ocasiones clorados) o con detergentes. Los sistemas con vapor de disolventes con condensadores integrales son los más comunes. Estos procedimientos se utilizan asimismo para desengrasar los elementos de producción. En estos casos se utilizan sistemas de tratamiento para evitar la contaminación del agua.

2.5.1.10 Incineración y pirólisis

Esta técnica se utiliza normalmente para tratar película fotográfica, material barrido, catalizadores y otros materiales para concentrar el contenido de metales preciosos o recuperar el níquel. También se utiliza para el pretratamiento de catalizadores para eliminar el contenido

orgánico antes del tratamiento ulterior. Estos procesos se realizan normalmente a baja temperatura para evitar el arrastre de otros metales. Los gases producidos por el incinerador son luego tratados en un sistema de postcombustión y un filtro de bolsa. En estos procesos debe considerarse la posible formación de dioxinas.

Para la etapa de incineración o pirólisis se utilizan hornos de caja simple y hornos rotatorios. Las materias primas se introducen en los hornos de caja en bandejas. Las cenizas ricas en metales se recogen o enfrían en agua antes de su ulterior proceso.

2.5.1.11 Procedimientos de lixiviación

La lixiviación o prelixiviación se utiliza para eliminar impurezas como metales alcalinos y alcalinotérreos, magnesio, sulfato o cloruro de algunos concentrados y materias primas secundarias antes de su ulterior proceso. La lixiviación se utiliza asimismo para reducir el contenido de cadmio, cloruro, sulfato, etc. en residuos, o para recuperarlos como subproductos. Ejemplos: El óxido Waelz puede lavarse para producir material adecuado para uso en un proceso primario; el cadmio presente en el polvo de filtros puede ser eliminado antes de reciclar el polvo a la fundición. La prelixiviación se utiliza asimismo para eliminar metales de matrices complejas o para concentrar los metales preciosos que se utilizan para recubrir catalizadores. Los minerales como el cuarzo se lavan y criban antes de su uso. Se utilizan procesos de lavado en circuito abierto o cerrado, y en estos últimos se utiliza purga de la solución de lixiviación. El agua residual se trata antes de su evacuación.

2.5.1.12 Técnicas de separación

Estos procesos se utilizan para eliminar las impurezas de las materias primas antes de su uso. Las técnicas de separación para minerales y concentrados (como la flotación) se utilizan por lo general en la mina cuando el materia se concentra o “beneficia”, pero estas técnicas se utilizan asimismo en muchos centros de producción para tratar la escoria y eliminar las fracciones ricas en metales. La separación magnética se utiliza para eliminar elementos férreos.

Las técnicas de separación se utilizan más frecuentemente para las materias primas secundarias, y la más común es la separación magnética. Los medios pesados y la separación por densidad (flota/se hunde) son utilizados por la industria de proceso de chatarra, pero pueden encontrarse en la industria de metales no férreos, por ejemplo en el proceso de chatarra de baterías para extraer el material plástico. En este caso, la diferencia en densidad y en tamaño de las distintas fraccione se utiliza para separar el metal, los óxidos metálicos y los componentes de plástico utilizando un aguador. La clasificación con aire se utiliza asimismo para separar los metales de materiales menos densos como el plástico y las fibras de la chatarra electrónica. La flotación se utiliza asimismo para enriquecer los residuos de lixiviación.

La separación magnética se utiliza para eliminar trozos de hierro y reducir la contaminación de las aleaciones. Generalmente, se utilizan imanes en bandas sobre las cintas transportadoras. Las soleras en pendiente en un horno de reverbero se utilizan para fundir zinc plomo y aluminio y dejar las impurezas grandes, de mayor punto de fusión (ej. hierro) en la solera para su ulterior proceso.

Los campos electromagnéticos móviles (separación por corrientes de Foucault o parásitas) se utilizan para separar el aluminio de otros materiales. Una variación de esta técnica utiliza este campo electromagnético móvil para bombear aluminio fundido u otros metales sin contacto directo entre el metal y los componentes mecánicos.

Otras técnicas de separación comportan el uso del color, de radiación UV, IR, rayos X, láser y otros sistemas de detección en combinación con clasificadores mecánicos o neumáticos. Estos

se utilizan por ejemplo para separar las pilas de Ni/Cd de otros tipos de pilas, y se están desarrollando técnicas para otras aplicaciones.

2.5.1.13 Sistemas de transferencia y carga

Estos sistemas se utilizan para transportar las materias primas entre las etapas de pretratamiento, y luego al proceso principal. Se utilizan técnicas similares a las empleadas para las materias primas, existiendo problemas similares de producción de polvo, contención y extracción. Las materias recogidas se reutilizan.

Los materiales pretratados pueden ser más secos que las materias primas y se utilizan métodos más estrictos para evitar las emisiones de polvo; por lo general no se utilizan sistemas de pulverización de agua, pero se requieren altos niveles de mantenimiento. Las cintas para el transporte de los materiales que forman polvo son generalmente cerradas, y en estos casos se suelen emplear sistemas eficaces de extracción y eliminación en las áreas expuestas y sensibles como puntos de cambio de transportador. Una alternativa es el uso de pulverizadores o neblinas finas de agua. En los transportadores se utilizan rascadores de fondo para evitar el transporte de material en la sección de retorno de la correa. También se emplean con frecuencia sistemas de transporte neumático de fase densa.

2.5.2 Niveles actuales de emisión y consumo

Las posibles emisiones a todo el medio ambiente del entorno son similares a las registradas en la manipulación de materias primas. Además, hay emisiones a la atmósfera de humo, gases ácidos, humo y polvo de procesos térmicos y polvo de procesos mecánicos, y emisiones de metales al agua de sistemas de granulación y filtración. Las emisiones de estos procesos se recogen normalmente.

2.5.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de las emisiones y residuos, así como las técnicas que reducen el consumo global de energía. Todas ellas están disponibles comercialmente. Se incluyen ejemplos con objeto de demostrar técnicas, que ilustran un alto nivel de comportamiento medioambiental. Las técnicas que se ofrecen como ejemplos dependen de la información facilitada por la industria, los Estados miembros de la UE y la evaluación efectuada por la Oficina Europea de IPPC.

Las técnicas empleadas dependen en gran medida del tipo de material que se utiliza . Por ejemplo, los artículos grandes y pesados se tratan con una serie de técnicas totalmente distintas que los materiales finos y polvorientos. Estos temas son específicos de los distintos centros de producción y materiales. No obstante, las operaciones de preproceso y transferencia deben tratar a menudo materiales que están secos o que pueden producir emisiones a cualquiera de las partes del medio ambiente. Por consiguiente, se requiere un diseño más detallado del equipo de proceso empleado en esta etapa, y los procesos deben ser monitorizados y controlados de forma eficaz. La naturaleza del material (ej. formación de polvo, materiales pirofóricos) debe ser tenida en cuenta, debiendo cuantificarse las posibles emisiones de COVs y dioxinas en los procesos térmicos. Los sistemas de extracción y eliminación, en particular, deben estar cuidadosamente diseñados, construidos y mantenidos. La revisión de las técnicas aplicadas en esta sección incluye los aspectos que se encontrarán en las distintas opciones de proceso. También debe hacerse referencia a las técnicas detalladas para la manipulación de materias primas. No obstante, los siguientes puntos se consideran los más importantes.

- Uso de procesos de pretratamiento y transferencia con equipos de extracción y eliminación bien diseñados y robustos, para evitar la emisión de polvo y otros materiales. El diseño de este equipo debe tener en cuenta la naturaleza de las emisiones, el índice máximo de emisiones y todas las posibles fuentes.
- Uso de sistemas de transporte cerrados para materiales polvorientos. Estos sistemas deben estar provistos de equipos de extracción y eliminación cuando sean posibles emisiones de polvo.
- Procesos que "fluyan" directamente al siguiente proceso, si es posible, con el fin de minimizar la manipulación y conservar la energía calórica.
- Uso de sistemas húmedos de molienda, mezcla y peletizado si no son posibles o apropiadas otras técnicas para el control del polvo.
- Sistemas de limpieza térmica y pirólisis (ej. secado y decapado de virutas) que utilice potentes equipos de postcombustión para destruir los productos de combustión, como COVs y dioxinas. Los gases deben mantenerse a una temperatura superior a 850 ºC (1.100 ºC si hay más de un 1% de compuestos orgánicos halogenados), en presencia de un mínimo de un 6% de oxígeno, durante un 2 segundos como mínimo. Tiempos de permanencia inferiores pueden también producir la destrucción completa de los COVs y dioxinas, pero debe demostrarse localmente. Los gases deben enfriarse rápidamente a lo largo del margen de temperatura de reformación de dioxinas.
- Para reducir el impacto de los COVs, los procesos de lavado para eliminar aceite u otros contaminantes deben utilizar disolventes benignos. Deben emplearse sistemas eficaces de recuperación de disolventes y vapores.
- Las correas de acero, los procesos de sinterización con tiro ascendente o con tiro descendente totalmente cerrado son técnicas a considerar. La sinterización en correa de acero tiene varias ventajas para ciertos grupos de metales y puede minimizar los volúmenes de gases, reducir las emisiones fugitivas y recuperar calor. Estos se discuten más adelante. Los sistemas de extracción de gases de escape deben evitar las emisiones fugitivas.
- El uso de horno rotatorios con enfriamiento húmedo de cenizas para los procesos que comportan una reducción en el volumen del material, como la película fotográfica. Las instalaciones de menor tamaño pueden usar un horno de parrilla móvil. En ambos casos, los gases de combustión deben limpiarse para eliminar el polvo y los gases ácidos si los hay.
- Si es necesario para minimizar la generación de humo y vapores y para mejorar las velocidades de fusión, el proceso de separación debe estar diseñado para producir materiales limpios que sean apropiados para procesos de recuperación.
- La recogida y el tratamiento de los efluentes líquidos antes de la evacuación del proceso para extraer los metales no férreos y otros componentes.
- El uso de buenas prácticas de diseño y construcción y un adecuado mantenimiento.

Existen varios procesos o combinaciones de procesos que se utilizan para producir y fundir metales. Los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos se muestran abajo. El orden en que aparecen no es significativo ni implica una clasificación. Las técnicas descritas en los capítulos de los metales específicos ofrecen más detalles del proceso pirometalúrgico o hidrometalúrgico, los metales para los que se utilizan y las ventajas y desventajas específicas en dichas aplicaciones.

Los hornos se utilizan para diversidad de aplicaciones en esta industria, como la tostación y calcinación de materias primas, la fusión y refinado de metales, y para la función de minerales y concentrados.

Un mismo "tipo" de horno o proceso puede usarse para diversidad de aplicaciones, y esta

Tabla 2.3: Resumen de métodos de pretratamiento

Método de pretratamiento	Materiales	Grupo de metales	Comentario
Secado	Concentrados y fundentes	Todos	Alimentación seca a una fundición
Trituración	Escoria	Todos	Mecánica o a base de agua
	Baterías y Pilas		Mecánica 1 o 2 etapas. Posibles emisiones de ácidos a todos los medios.
Mezcla	Concentrados y fundentes	Todos	Uso de etapas de transporte y mezcla
Aglomeración	Concentrados y fundentes Residuos	Todos (Raramente Cu y Ni)	Recubrimiento y peletización
Sinterización	Concentrados y fundentes	Pb, Zn, Ferroaleaciones	Emisiones de SO_2 y polvo
Volatilización	Polvo de filtros, escorias	Pb, Zn	Los polvos de filtro de una serie de procesos contienen Pb y Zn
Eliminación de recubrimientos y aceites	Cables Virutas La centrifugación puede recuperar aceite y reducir la carga sobre el sistema térmico.	Cu, Al, Ti etc.	Emisiones de COVs y dioxinas de sistemas térmicos. Hay disponibles sistemas mecánicos y criogénicos.
Incineración	Película, catalizadores.	Metales preciosos.	Emisiones de COVs y dioxinas
Lixiviación	Materias primas Residuos	Pb, Zn, PMs	
Separación	Material plástico Metales	Pb, Cd, PMs, Al	Sistemas a base de aire o líquidos
Desengrase	Productos – utilizando sistemas a base de disolventes o de tipo acuoso.	Cu etc.	Potencial de hidrocarburos clorados

información pretende por lo tanto ofrecer un resumen de las diversas aplicaciones [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 35, LRTAP 1995].

Un aspecto importante de la elección del proceso es la relación entre la recogida de vapores y gases; se utilizan procesos cerrados, semicerrados y abiertos. El diseño del sistema de recogida de vapores está fuertemente influenciado por la geometría, que en algunos casos puede dificultar la recogida de vapores. El uso de sistemas de transferencia que hacen necesario mover las campanas extractoras de un horno es una ilustración de este factor.

El otro factor importante en la aplicabilidad de un tipo de proceso particular es el tipo y la variabilidad de la materia prima utilizada; algunos procesos permiten el uso de una gama de materiales, pero otros requieren un tipo de material definido. Estos aspectos se estudian con mayor detalle en los capítulos de producción de los distintos metales, en el apartado de técnicas a considerar en la Determinación de las Mejores Técnicas Disponibles. De modo similar, la operación y el mantenimiento de estos sistemas es también un factor crítico.

2.6 Técnicas de Producción de Metales y de Control de Proceso

Metal	Tipo de horno que puede encontrarse	Comentarios
Cobre	Hornos de fusión flash. Hornos de fusión de baño. Hornos eléctricos. Hornos rotatorios o convertidores. Altos hornos. Hornos de cuba. Hornos de inducción Hornos de reverbero.	• Diversas aplicaciones según la materia prima y la etapa del proceso.
Aluminio	Células de fusión electrolítica. Hornos de reverbero Hornos rotatorios y de cuba. Hornos de inducción.	• Células de fusión electrolítica sólo para aluminio primario.
Plomo	Horno de Fusión Imperial (ISF). Horno flash (Kivcet). Horno de baño (QSL, ISA Smelt/Ausmelt). Horno rotatorio corto. Caldera de calefacción. Máquina de sinterización.	
Zinc	ISF y horno de destilación New Jersey. Horno de calcinación de lecho fluidizado, máquina de sinterización. Horno de inducción y de crisol. Hornos de volatilización de escoria.	• El control de temperatura de la fundición es vital.
Metales Preciosos	Horno eléctrico. Alto horno. Horno de crisol. Incinerador rotatorio y estático. Copela y BBOC. Destilación al vacío	• Diversas aplicaciones según la materia prima y la etapa del proceso.
Mercurio	Horno rotatorio. Horno de tubo. Horno Herreshoff.	
Metales Refractarios	Horno de empuje. Horno de banda. Horno discontinuo. Horno rotatorio. Horno de haz de electrones. Horno de inducción al vacío.	• Los hornos de empuje, de banda, discontinuos y rotatorios se emplean para la producción de polvo. • El horno de haz de electrones se usa para la fusión de lingotes.
Ferroaleaciones	Horno insuflado. Horno de arco eléctrico, horno eléctrico. Hornos de crisol de reacción. Horno Herreschoff. Reactores metalotérmicos.	• El horno de arco eléctrico se utiliza como horno abierto, semicerrado y cerrado. • El horno Herreshoff se utiliza sólo para la tostación de Mo.
Alkali Metals	Células de fusión electrolítica. Hornos eléctricos, Hornos de inducción.	• Los hornos de inducción se usan principalmente para refundición.
Níquel y Cobalto	Hornos de fusión flash. Hornos de fusión de baño. Hornos eléctricos, Hornos de reverbero. Convertidores. Hornos de secados y rotatorios Hornos de inducción.	• Diversas aplicaciones según la materia prima y la etapa del proceso.
Carbono y grafito	Hornos Pit, hornos de vacío. Hornos eléctricos.	

Tabla 2.4: Aplicaciones típicas de hornos

Existen varios procesos o combinaciones de procesos que se utilizan para producir y fundir metales. Los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos se muestran abajo. El orden en que aparecen no es significativo ni implica una clasificación. Las técnicas descritas en los capítulos de los metales específicos ofrecen más detalles del proceso pirometalúrgico o hidrometalúrgico, los metales para los que se utilizan y las ventajas y desventajas específicas en dichas aplicaciones.

Los hornos se utilizan para diversidad de aplicaciones en esta industria, como la tostación y calcinación de materias primas, la fusión y refinado de metales, y para la función de minerales y concentrados.

Un mismo "tipo" de horno o proceso puede usarse para diversidad de aplicaciones, y esta información pretende por lo tanto ofrecer un resumen de las diversas aplicaciones [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 35, LRTAP 1995].

Un aspecto importante de la elección del proceso es la relación entre la recogida de vapores y gases; se utilizan procesos cerrados, semicerrados y abiertos. El diseño del sistema de recogida de vapores está fuertemente influenciado por la geometría, que en algunos casos puede dificultar la recogida de vapores. El uso de sistemas de transferencia que hacen necesario mover las campanas extractoras de un horno es una ilustración de este factor.

El otro factor importante en la aplicabilidad de un tipo de proceso particular es el tipo y la variabilidad de la materia prima utilizada; algunos procesos permiten el uso de una gama de materiales, pero otros requieren un tipo de material definido. Estos aspectos se estudian con mayor detalle en los capítulos de producción de los distintos metales, en el apartado de técnicas a considerar en la Determinación de las Mejores Técnicas Disponibles. De modo similar, la operación y el mantenimiento de estos sistemas es también un factor crítico.

2.6.1 Hornos para tostación, calcinación, etc.

2.6.1.1 Hornos de secado rotatorios

Los hornos de secado rotatorios presentan el mismo esquema que un horno rotatorio, pero funciona sin fundir la carga.

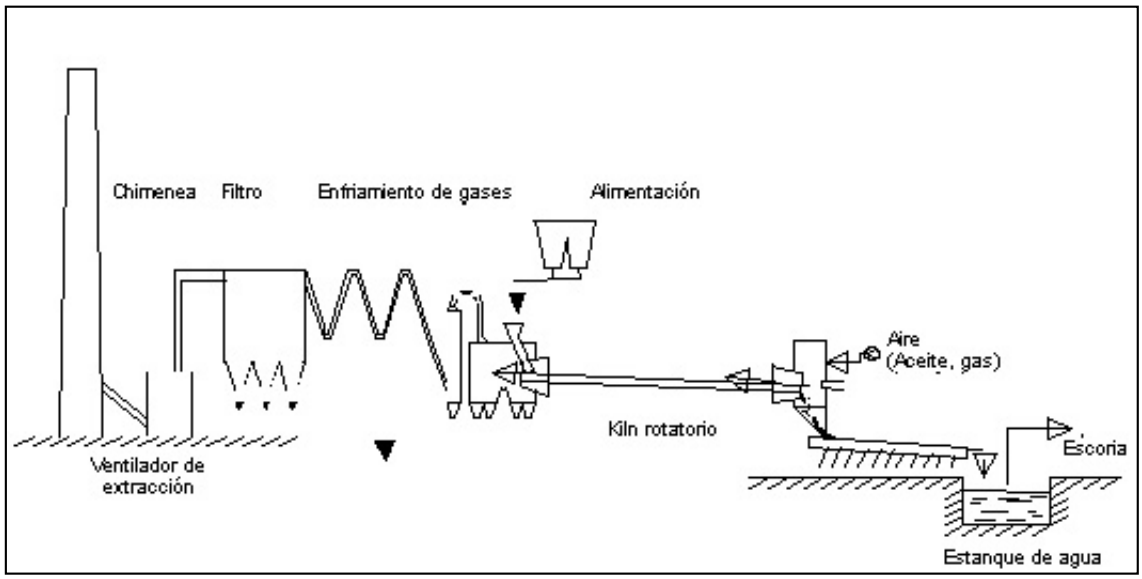


Figura 2.1: Horno de secado rotatotio [tm 124, DFIU Cu 1999].

Estos horno de secado se utilizan para una serie de procesos de volatilización y calcinación. Los ejemplos principales son la producción de óxido mediante la volatilización en un horno Waelz; la producción de calcita para el proceso de ferroníquel; la calcinación de hidróxido de aluminio y la calcinación de hidróxido magnésico para obtener un óxido de magnesio ligeramente cocido para producción electrolítica de magnesio. Otras aplicaciones son el pretratamiento de una serie de materias primas a altas temperaturas, la incineración de película y papel fotográfico y el secado de concentrados y mezclas de materiales a bajas temperaturas.

2.6.1.2 Horno de tostación de lecho fluidizado

Estos hornos son especialmente adecuados cuando se requiere un buen control de temperatura, por ejemplo en la tostación con sulfatado o tostación a muerte de concentrados de zinc, así como para la calcinación de Al_2O_3.

El aire de combustión se inyecta a través de toberas en una parrilla situada en el fondo del horno, y a través del lecho fluidizado del material que se tuesta en la parrilla. El concentrado es alimentado a la parte superior del lecho. El oxígeno reacciona con los sulfuros en el lecho para producir óxidos, es decir, el calcinado. Se forma SO_2 gas a alrededor de 900 - 1.000 °C mediante la oxidación del sulfuro para formar óxido. A esta temperatura, prácticamente todo el hierro se combina con los óxidos de metales pesados para dar ferrita en presencia de oxígeno en exceso.

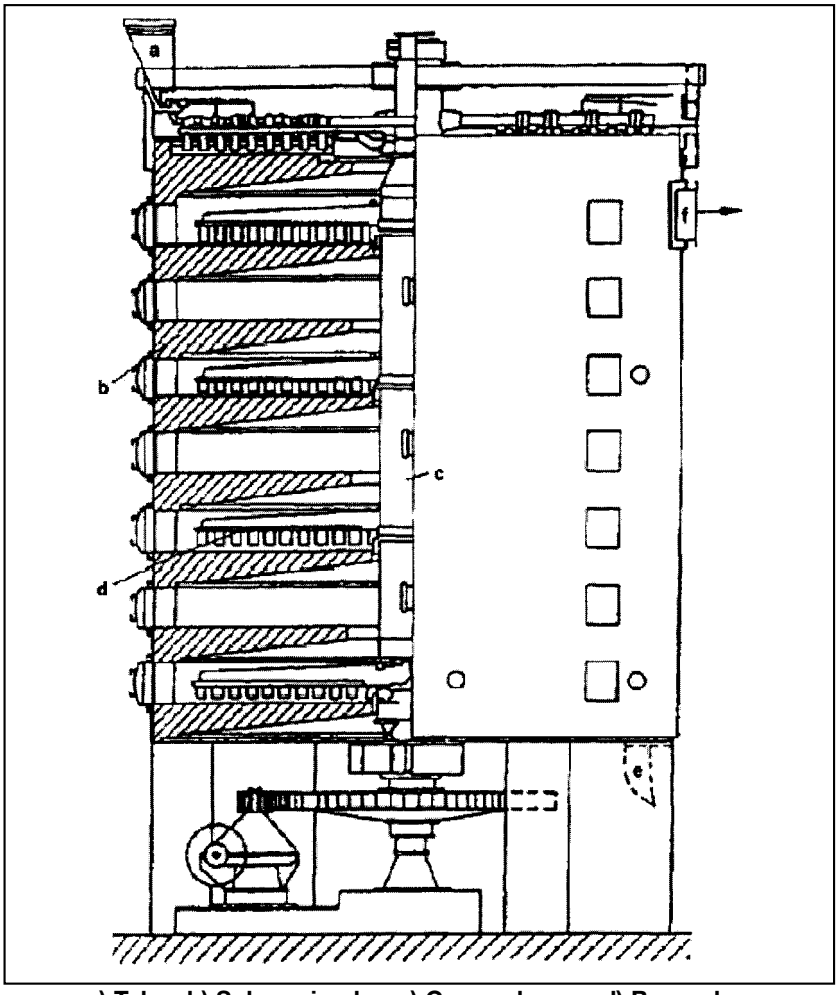
Parte del calcinado se extrae mecánicamente del horno, pero parte es arrastrado en la corriente de gas y se elimina en un sistema de caldera de recuperación de calor y PE. La tostación elimina algunas pequeñas impurezas como Cl, F, Se y Hg en la fase gaseosa.

El calor desarrollado en la tostación se recupera como vapor mediante serpentines de refrigeración en la caldera de recuperación de calor. El uso del vapor puede variar en función de los requisitos del centro de producción, pero parte del mismo se utiliza siempre para calentamiento en el proceso.

2.6.1.3 Horno Herreshoff

El horno consiste en una torre que contiene una serie de 8 a 12 soleras de ladrillos refractarios en forma anular dispuestos verticalmente y encerrados en un cuerpo cilíndrico de acero con revestimiento refractario. La alimentación al horno se realiza por el exterior de la solera superior, y el material se mueve mediante brazos de agitación al centro de esta solera, en donde cae al centro de la segunda solera. El flujo de material en la segunda solera es desde el centro hacia fuera, sonde cae al exterior de la tercera solera. Este flujo en zigzag se repite hasta la descarga del material tostado. Los brazos de agitación van fijados a un tubo central de rotación vertical refrigerado por aire. Hay quemadores de gas o de aceite dispuestos en varios puntos del horno, según las características de combustión del material. El aire de refrigeración que se utiliza para enfriar el tubo central se utiliza normalmente como aire de combustión precalentado para el horno.

Este horno se utiliza para tostar minerales de sulfuro, para producir metal directamente en el caso de mercurio o un óxido como el óxido de molibdeno. El renio vaporizado que se libera en el proceso de tostación de la molibdenita puede recuperarse del as de escape del horno de tostación mediante un sistema de lavador húmedo y posteriormente una planta de recuperación de renio. El horno Herreshoff también se utiliza para regenerar el carbón activado.



a) Tolva; b) Solera circular; c) Cuerpo hueco; d) Brazo de agitación con dientes; e) Salida de descarga; f) Salida de gas

Figura 2.2: El horno Herreshoff.

2.6.1.4 Hornos de sinterización

Las materias primas para la planta de sinterización son concentrados, finos de minerales, polvos de combustión y otras materias secundarias. En la planta de sinterización el material se aglomera primero en el grado requerido, pudiendo peletizarse. El material aglomerado es alimentado al horno de sinterización en una capa o en recipientes portadores, y los gases calientes pasan hacia arriba (tiro ascendente) o hacia abajo (tiro descendente) a través del lecho.

En la máquina de Sinterización con Correa de Acero se emplea un horno de múltiples compartimentos, a través del cual se transporta el aglomerado sobre una correa de acero perforada. El aglomerado se seca en el compartimento de secado haciendo circular gas del último compartimento de enfriamiento. En el compartimento de precalentamiento, la temperatura del aglomerado aumenta, de modo que el material es calcinado y el carbono del lecho se inflama. El gas de calentamiento se toma del segundo compartimento de enfriamiento. En el compartimento de sinterización se alcanza la temperatura de sinterización. El gas de calentamiento, además de la energía de la combustión del carbono y de la oxidación del hierro, se toma del primer compartimento de enfriamiento.

Los compartimentos del extremo frontal tienen tiro descendente, se circula aire de refrigeración a los tres compartimentos de enfriamiento a través del lecho. En caso de que se requiera energía adicional para controlar el perfil de temperatura en los compartimentos, se

quema CO gas del proceso de fundición o gas natural en los compartimentos de precalentamiento y sinterización. Se utiliza parte del producto sinterizado o pelets para protegerlo de temperaturas demasiado elevadas. Los gases de escape se limpian en lavadores en cascada y/o filtro de bolsa. El polvo es reciclado a la aglomeración.

Los hornos de sinterización se aplican a la sinterización de gran variedad de minerales, polvos y lodos. El horno de sinterización de correa de acero se utiliza para pelets de cromita, mineral de manganeso y concentrado de niobio, pero puede tener otras aplicaciones.

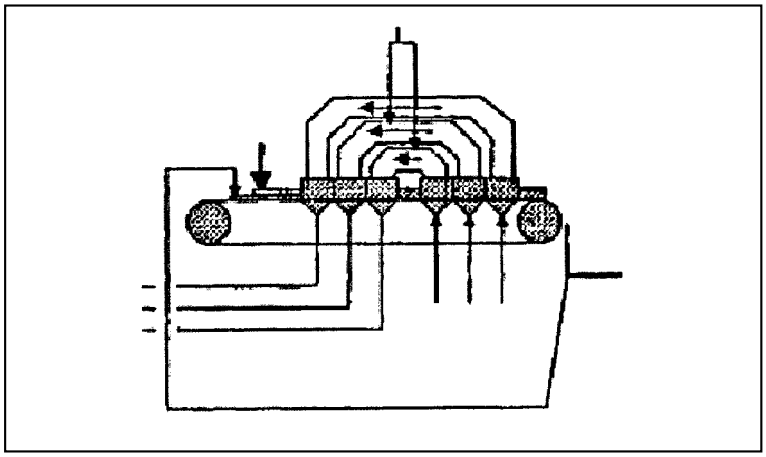


Figura 2.3: Horno de sinterización con correa de acero.

2.6.2 Hornos de fundición

2.6.2.1 Horno de reverbero

El horno de reverbero se utiliza para la fundición de concentrados y materiales secundarios. Existen dos tipos generales, un horno de baño simple para la fundición de calcinados o concentrados, y un horno de solera con reverbero para fusión o refinado. Los hornos pueden en ocasiones ser inclinados para soplar o colar metales Pueden usarse toberas para la inyección de gases de tratamiento o para la adición de material fino.

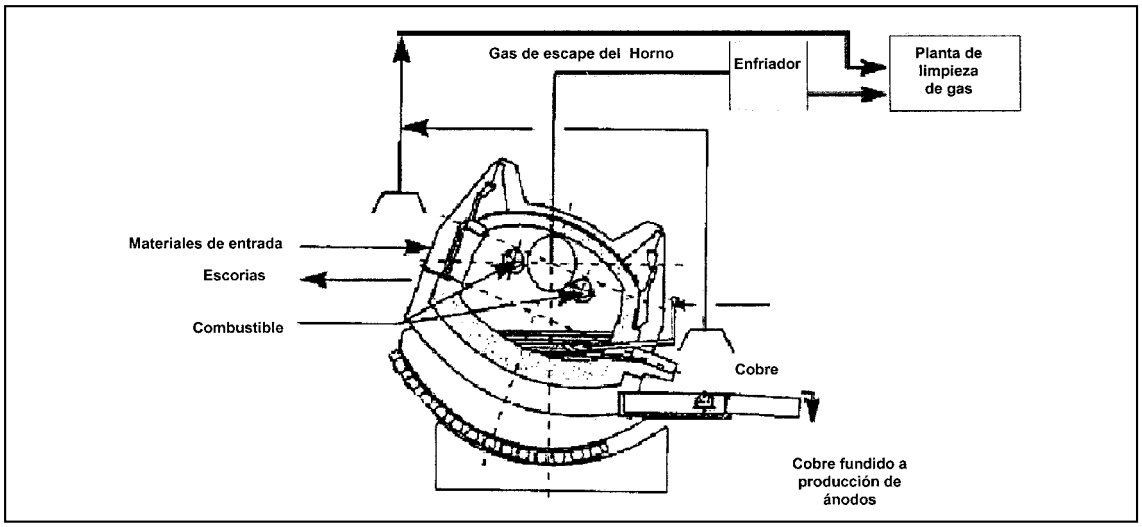


Figura 2.4: Ejemplo de un horno de solera con reverbero basculante utilizado para materiales secundarios [tm 124, DFIU Cu 1999; tm 226, VDI 2102 1999].

El horno se construye con distintas configuraciones según el metal y la aplicación particular, entre las variaciones se incluyen la incorporación de soleras inclinadas y pozos laterales para aplicaciones específicas de fusión, así como toberas y lanzas para la adición de gases.

La escoria se elimina normalmente mediante sangrado.

Cuando se funden minerales de sulfuro en un horno de reverbero, las concentraciones de dióxido de azufre son normalmente bajas debido al elevado volumen de gases de combustión y la baja velocidad de eliminación de azufre en el horno.

Estos hornos se utilizan para la fundición de diversas materias primas primarias y secundarias, así como para refinado al fuego.

2.6.2.2 El alto horno (y el horno de fundición Imperial - ISF)

Este es un tipo de horno de cuba. Utiliza un chorro de aire caliente inyectado desde toberas en la parte inferior del horno para quemar coque que se mezcla con la carga del horno de óxido metálico o material secundario y agentes fundentes; los materiales se briquetan frecuentemente antes de su carga. La combustión de una parte del coque eleva la temperatura del horno, y el resto produce CO, que junto con el hidrógeno producido por la reacción del agua con el gas, reduce los óxidos metálicos a metal. La reacción produce un gas rico en monóxido de carbono. Este puede recogerse, limpiarse y quemarse para precalentar el aire de inyección o puede quemarse en un sistema de postcombustión separado o en una parte rica en oxígeno del horno. En algunos casos, se introducen materias como óxido de zinc en polvo a través de las toberas.

El metal se recoge en una solera o crisol en el fondo del horno y puede sangrarse de forma continua o discontinua. Si se sangra en discontinuo, la escoria flota sobre el metal y el metal se sangra desde un orificio de sangrado separado. Durante el proceso de sangrado se utiliza extracción y eliminación de vapores.

El cuerpo del horno es refrigerado normalmente por agua, en toda su altura o en la parte

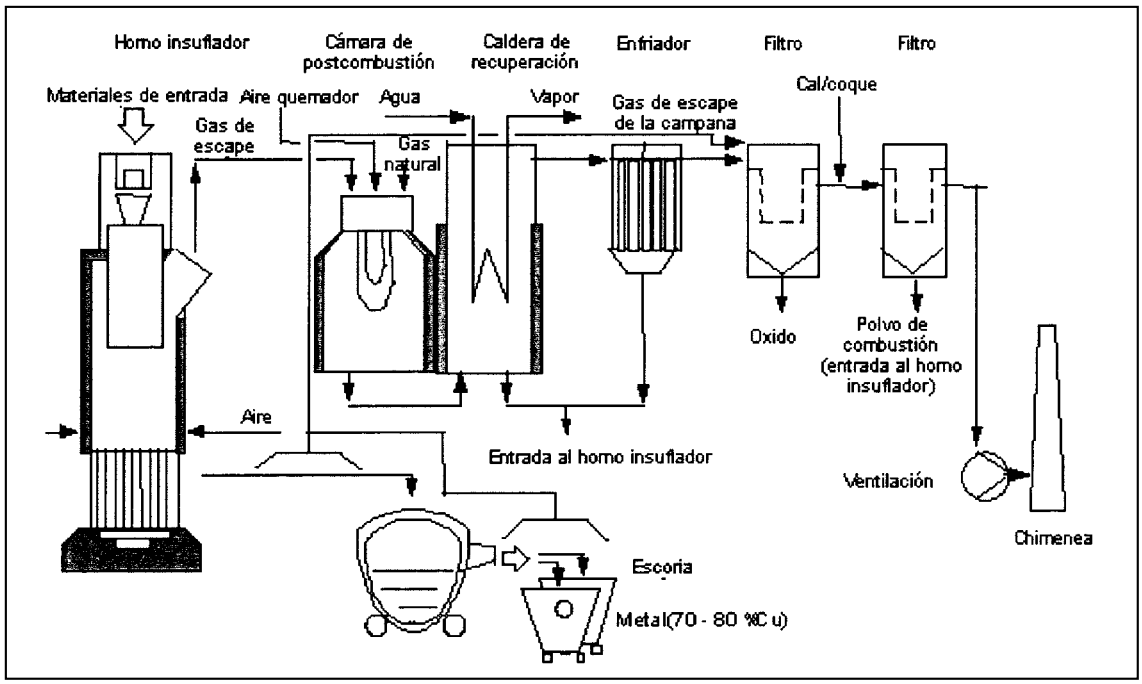


Figura 2.5: Alto horno para producción de cobre secundario [tm 124, DFIU Cu 1999; tm 226, VDI 2102 1999].

inferior, con lo que el horno insuflado puede también denominarse horno de camisa de agua. Hay dos variaciones del horno insuflado, según el método de alimentación y la temperatura operativa utilizada para fundir el metal. Los hornos pueden ser: a) "de tragante caliente" en los que el material de carga se alimenta a través de una "campana" o transportador vía una esclusa de transferencia o b) "de tragante frío", en los que el horno se carga desde una tolva y el propio material de alimentación realiza la obturación superior.

Los altos hornos se utilizan para fundir y recuperar diversos metales, como metales preciosos, cobre y plomo de materias primas primarias y secundarias, así como ferromanganeso con alto contenido en carbono. Desarrollos recientes permiten la carga de materiales finos en el horno a través de las toberas, y esto puede evitar el briquetado y reducir la manipulación de material polvoriento.

Una aplicación específica del alto horno es el Horno de Fundición Imperial, que se utiliza para concentrados mixtos de plomo/zinc. Este horno utiliza un condensador de salpicaduras de plomo fundido tras la sección del horno insuflador para recoger el zinc vapor emitido por los gases mientras el plomo se recoge en la solera. El zinc y el cadmio recogidos en el condensador se purifican en un sistema de destilación fraccionada (Columna de Destilación New Jersey).

2.6.2.3 Hornos de arco eléctrico

Los hornos de arco eléctrico operan sobre el principio de pasar una corriente alterna grande entre una serie de electrodos de carbono, normalmente tres (para una corriente eléctrica trifásica) con el fin de producir arcos eléctricos. También puede usarse una fuente de corriente de CC (corriente continua), y en este caso el arco descarga entre una serie de electrodos y un revestimiento superficial de carbono.

El horno de arco eléctrico puede dividirse en los siguientes componentes principales:

- Equipo para añadir minerales o concentrados o una mezcla de materias primas al horno.
- Equipo para suministrar energía eléctrica al horno consistente en una rejilla metálica, transformadores, barra colectora y electrodos.
- El cuerpo o la cuba del horno, consistente en un cuerpo, el revestimiento y la campana del horno, que protege el equipo del calor y de la carga química.
- Equipo para sangrar el metal y la escoria del horno.

La materia prima puede cargarse en el horno en distintas formas. Para hornos pequeños, la materia prima puede cargarse manualmente con un carro de carga. El carro de carga puede en ocasiones usarse para el caldeo necesario, para romper la formación de costra en la parte superior de la carga del horno. Los hornos de arco eléctrico grandes se cargan normalmente mediante tubos de carga con los que la carga fluye desde los tubos a la solera de modo que el material de los tubos forma, en un horno cerrado, un cierre hermético a los gases.

El sistema de suministro eléctrico transforma la energía eléctrica, que normalmente es de alto voltaje, en la corriente de bajo voltaje y alta intensidad que se requiere para el proceso. Alrededor del horno se hallan dispuestos tres transformadores de horno con el fin de obtener una simetría eléctrica. El uso de transformadores separados tiene algunas ventajas en el control del horno. Los electrodos se conectan al sistema de suministro eléctrico a través de la barra colectora. Los electrodos pueden ser precocidos o del tipo Søderberg. Son de carbono o grafito y se consumen en el proceso, por lo que deben sustituirse continuamente.

El sistema Søderberg que se muestra en la figura 2.6 se basa en una funda externa de acero del electrodo que actúa como conformador de la pasta de carbono. La pasta de carbono se cuece

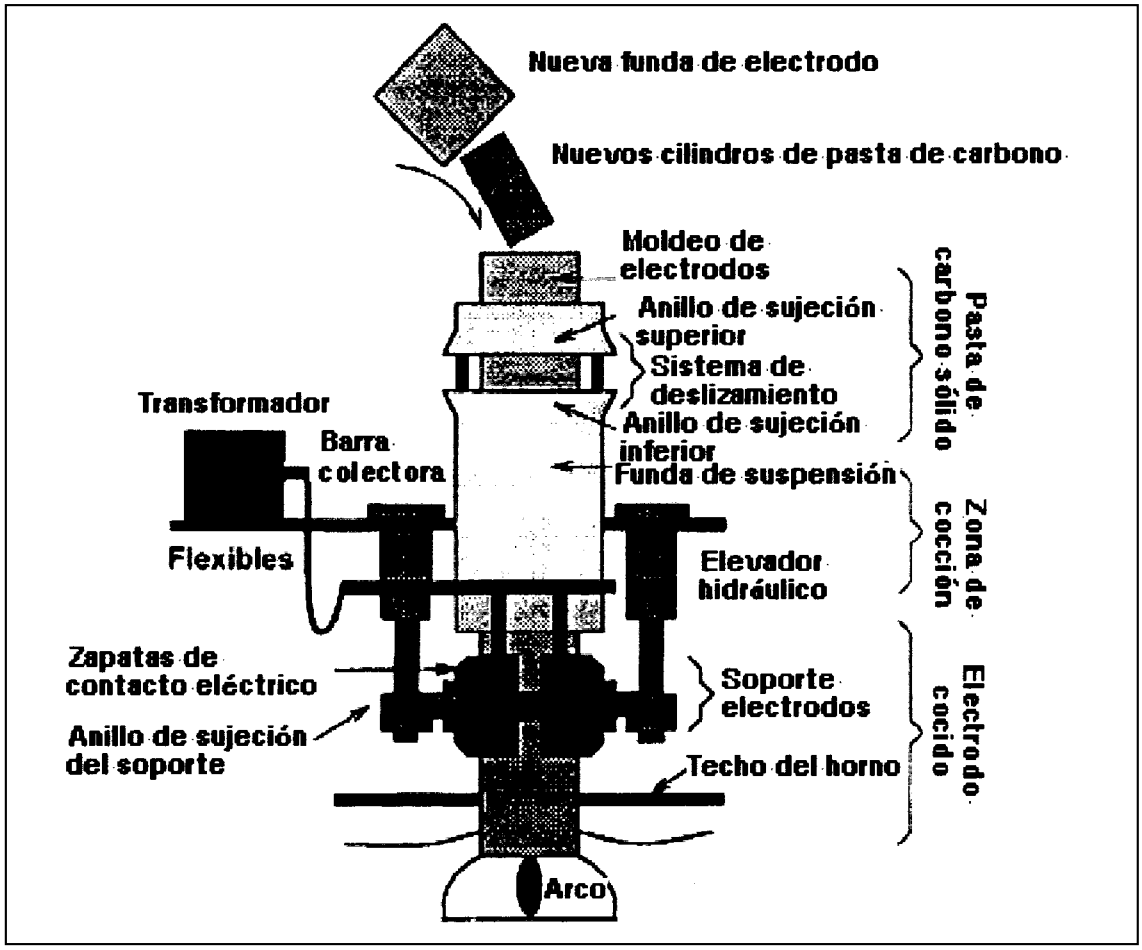


Figura 2.6: Sistema de electrodos de Søderberg en un horno de arco eléctrico.

formando un electrodo fijo dentro de la funda de acero cuando se calienta el electrodo a medida que entra en la parte más caliente del horno. Parte del calor es debido a la corriente eléctrica en el electrodo. El carbono de los electrodos puede consumirse para reducir los óxidos a un metal, o puede desgastarse por la acción del arco. Pueden producirse concentraciones significativas de monóxido de carbono. Algunas instalaciones utilizan electrodo huecos que permiten alimentar el material al horno a través del electrodo.

La materia prima proporciona parte de la resistencia del circuito eléctrico y promueve la formación del arco eléctrico, que produce las altas temperaturas. La profundidad de inserción de los electrodos regula la resistencia. Existen hornos de arco de corriente continua, que utilizan clavijas anódicas o soleras conductoras. Los hornos de arco eléctrico pueden operarse en continuo o en discontinuo.

Los hornos pueden ser abiertos, semicerrados (normalmente con extracción desde un cuarto orificio en la campana) o totalmente cerrados con conductos de alimentación y válvulas de cierre para la carga. En el último caso, todos los gases del horno de extraen de forma eficaz y se limpian, pudiendo usarse para precalentar los materiales de alimentación o como fuente de combustible. Las campanas y ocasionalmente el cuerpo del horno pueden ser refrigerados por agua para controlar el proceso y evitar daños.

Estos hornos se emplean para la fundición de una serie de ferroaleaciones. También se utilizan para fundir y refinar metales refractarios y aleaciones a alta temperatura, y en estos casos pueden operar al vacío.

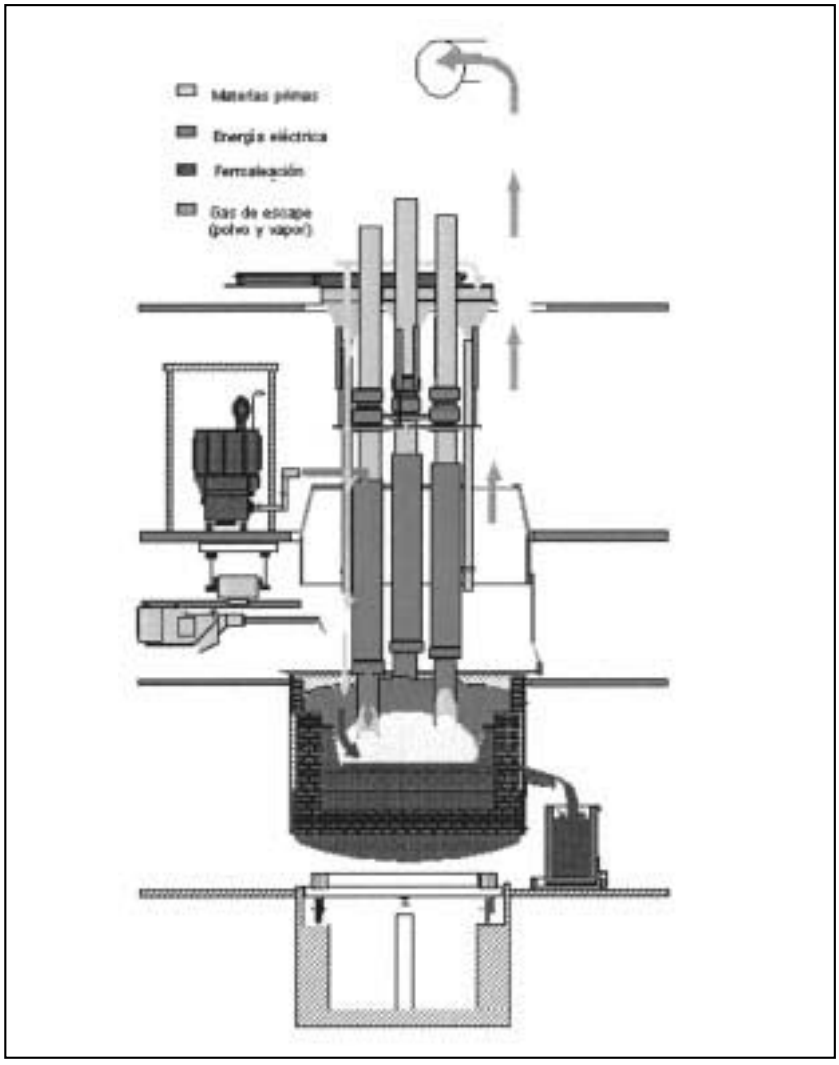


Figura 2.7: Horno Rotatorio de Arco Eléctrico.

El horno puede operarse en discontinuo o en continuo con una carga fundida. En este último caso, los electrodos de "sumergen" en la escoria y no tocan el arco (excepto durante la puesta en marcha), sino que operan como un horno de resistencia eléctrica o un Horno de Arco Eléctrico Sumergido.

2.6.2.4 Horno eléctrico (de resistencia eléctrica)

Este tipo de horno utiliza un esquema similar al horno de arco eléctrico. Según el tamaño del horno, de 3 a 6 electrodos tipo Søderberg o precocidos se sumergen en la capa líquida. La temperatura de fusión se mantiene mediante calentamiento con resistencias eléctricas. El horno opera normalmente en continuo.

Los materiales molidos o sólidos se alimentan en diversas formas, mediante artesas, conductos de alimentación o un electrodo hueco. En procesos de fundición, los concentrados de mineral tostado se transfieren al líquido fundido a través de la parte superior del horno o lateralmente mediante cargadores individuales, y los electrodos se sumergen en la capa de escoria fundida.

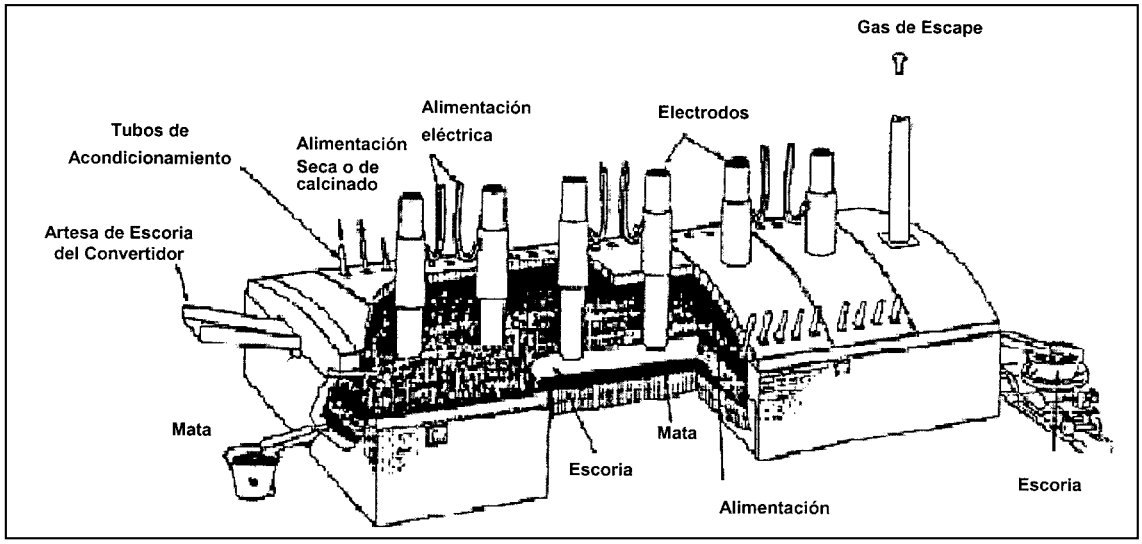


Figura 2.8: Horno eléctrico para fundición de concentrado o calcinado.

Pueden operarse de diversas formas utilizando coque y agentes escoriantes según la aplicación. Los electrodos de carbono se consumen a medida que se reducen los óxidos, pero los volúmenes de gas producidos durante el funcionamiento se mantienen al mínimo, dado que no hay gases producidos por la combustión de un combustible. Estos hornos son normalmente herméticos y los gases se recogen fácilmente para ser tratados y eliminar, y si es posible reutilizar, el polvo, el CO y el dióxido de azufre.

Estos hornos se utilizan en la producción de una serie de metales a partir de materias primas primarias y secundarias, como metales preciosos, plomo y cobre, así como para limpieza de escorias [tm 124, DFIU Cu 1999]. Algunas escorias de fundición primaria, como las de Cu, se limpian normalmente en hornos circulares. También se utilizan para la recuperación de metales preciosos, en particular plata.

2.6.2.5 Hornos Pit y de crisol con revestimiento refractario

Se trata de hornos Pit simples construidos con Al_2O_3 u otro material refractario y cilindros de acero con revestimiento refractario dispuestos para formar crisoles, que contienen el proceso. Normalmente se utilizan para reacciones metalotérmicas. Los hornos Pit y de crisol con revestimiento refractario se suelen utilizar en la producción de ferroaleaciones especiales como ferrovanadio y ferromolibdeno, así como para metales refractarios.

2.6.2.6 Horno ISA Smelt/Ausmelt

Este horno utiliza una lanza de acero para la inyección de combustible gas, aceite o carbón y oxígeno o aire, en un horno de baño cilíndrico. La lanza se sumerge en el baño fundido y se sirve de la formación de una capa de escoria para evitar un deterioro rápido.

Otras materias primas se introducen en el horno mediante un transportador cerrado en el que reaccionan a alta velocidad y se funden. La lanza de combustión sumergida agita el baño y produce una escoria junto con la mata o el metal deseado. La separación de las fases fundidas requiere un horno de sedimentación separado desde el que las fases se funden separadamente. El horno puede usarse en discontinuo cuando las condiciones del horno, como el gas inyectado a través de la lanza, se cambian al final de un lote de producción. Ejemplos de operación en discontinuo son: a) la

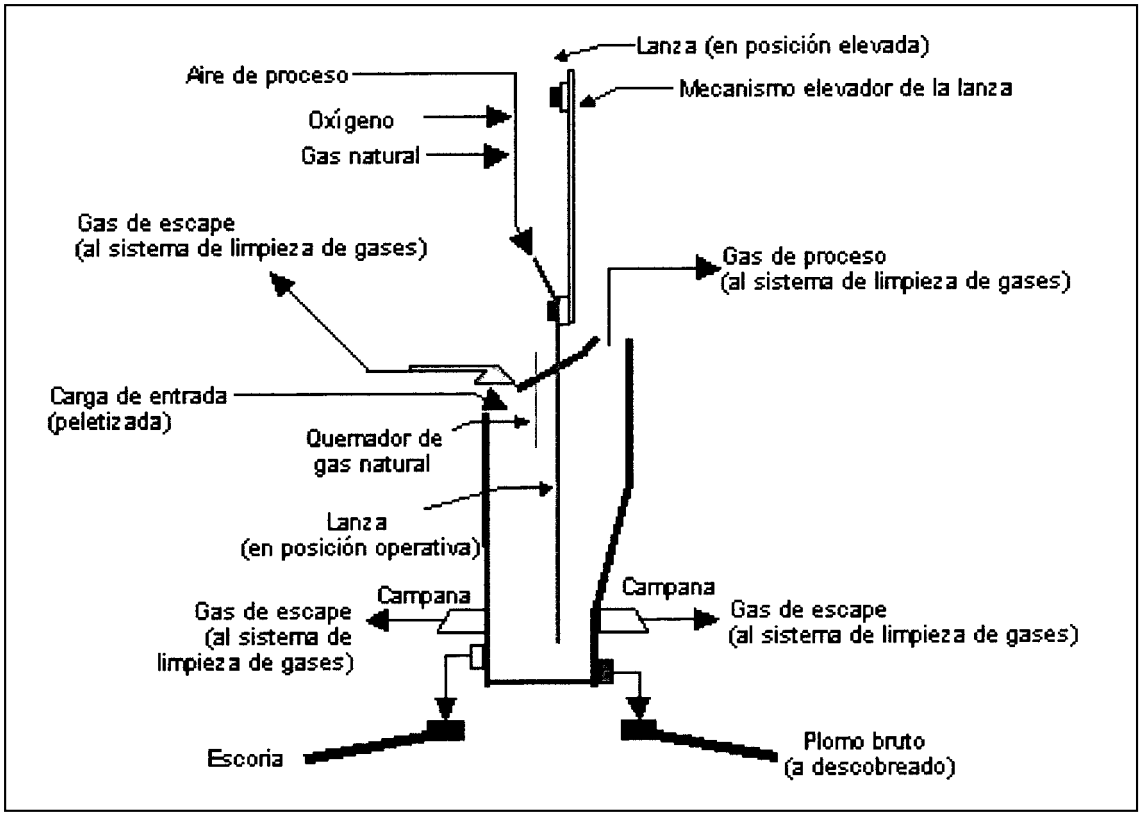


Figure 2.9: El proceso ISA Ausmelt/Smelt [tm 124, DFIU Cu 1999].

fundición de material secundario de cobre/plomo para dar una mata de cobre y plomo, seguido de una conversión de la mata a cobre negro mediante inyección de oxígeno; b) el tratamiento de residuos de lixiviación de zinc. La operación continua es posible utilizando dos hornos en serie, por ejemplo como se sugiere para el proceso de producción de plomo ISA.

El horno utiliza un robusto sistema de campana de extracción para recoger y tratar los vapores del horno y de las operaciones de sangrado. Cuando se funden concentrados de sulfuro, los gases pasan a un sistema de eliminación de azufre.

Existen una serie de aplicaciones para este tipo de horno, como la producción de mata de cobre a partir de concentrados (ISA Smelt) y la conversión y producción de plomo a partir de materias primas primarias y secundarias (ISA Smelt), el tratamiento de revestimientos de crisol consumidos y la volatilización de zinc (Ausmelt) [tm 38 - 45, Ausmelt 1997]. El horno ISA Smelt se utiliza asimismo para la producción de cobre y plomo a partir de un material mixto. Este horno se utiliza como horno de fusión directa en continuo, así como para operaciones en discontinuo y por pasos. Cuando se funde concentrado de cobre en mata, el proceso utiliza una alimentación húmeda que se alimenta continuamente con fundentes al horno.

2.6.2.7 Horno Rotatorio de Soplado Superior

Se trata de un horno rotatorio y basculante que utiliza lanzas para calentamiento e inyección. El horno es pequeño y normalmente está encerrado en una caja para contener las emisiones secundarias, que son tratadas. La rotación de los hornos promueve una buena mezcla de la carga y la reacción completa de los componentes, pero puede llevar a la abrasión del revestimiento refractario.

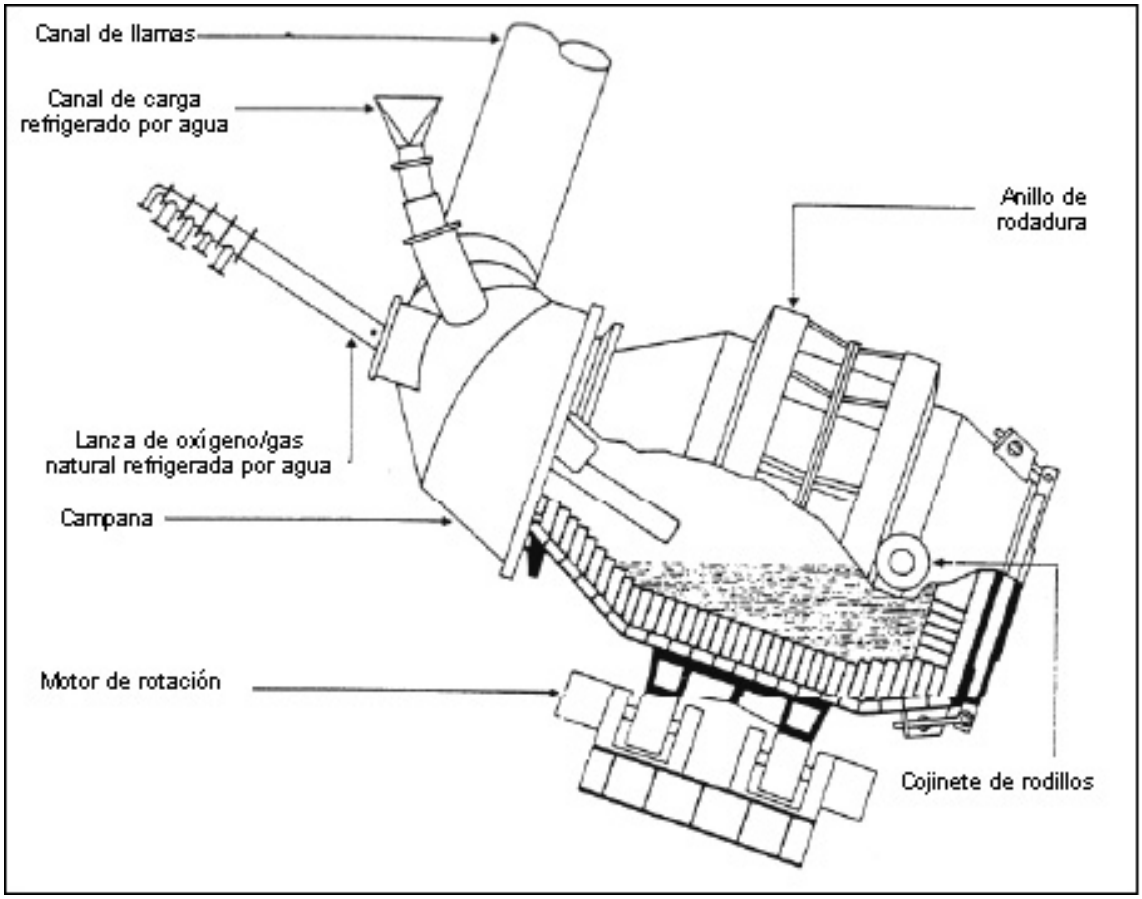


Figura 2.10: Horno Rotatorio de Soplado Superior.

El oxígeno y el combustible se agregan a través de las lanzas, que soplan sobre la superficie del material fundido. El uso de oxígeno produce la producción de bajos volúmenes de gas de escape y un elevado contenido en dióxido de azufre cuando se funden sulfuros. El proceso se realiza normalmente en discontinuo y es frecuente utilizar una serie de hornos de este tipo para fundición, conversión y limpieza de escorias.

El horno se emplea para fundición, conversión y tratamiento de escorias. Se utiliza para producir cobre y plomo primario y secundario, ferroníquel, y para la recuperación de metales preciosos.

Otros diseños comerciales de hornos rotatorios basculantes se utilizan asimismo para fundición, como el horno de mini-fundición y el horno de combustible oxiacetilénico rotatorio y basculante (TROF).

2.6.2.8 Procesos Noranda, El Teniente, Baiyin y Vanyucov

El Reactor Noranda utiliza un horno cilíndrico con revestimiento refractario para fundición. El concentrado peletizado y los aditivos se cargan en el baño de escoria fundida en el extremo superior del horno. Los quemadores alimentados a gas natural o aceite, situados en ambos extremos, producen el calor necesario para el proceso. Se inyecta aire enriquecido con oxígeno en el baño fundido mediante toberas, lo que produce la oxidación del azufre y el hierro.

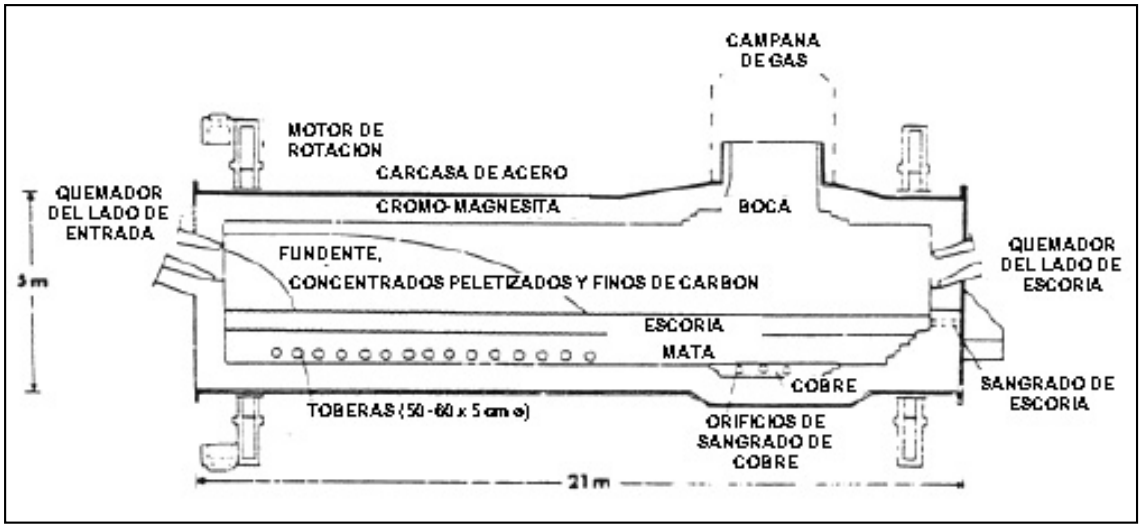


Figura 2.11: Reactor Noranda .

Durante la fundición continua en el horno, el material fundido se separa en dos fases líquidas: escoria y mata. Debido a sus distintas densidades, al sedimentar forman dos capas. La mata se extrae periódicamente del fondo del horno, y la escoria flota continuamente por el lado opuesto al de carga. El horno es cerrado y con extracción, y el gas extraído es lavado.

Este proceso se utiliza para fundir concentrados de cobre y puede producir cobre negro si se utilizan concentrados con bajo nivel de impurezas o mata de alta calidad. El procedimiento normal es producir una mata rica en cobre que es sometida a una conversión ulterior.

Los procesos El Teniente, Baiyin y Vanyucov son similares al proceso Noranda. En el proceso El Teniente, se añaden concentrados húmedos al horno con un inyector Gar, y se agregan concentrados secos a través de las toberas. Inicialmente se coloca una mata en el horno para favorecer el proceso y producir metal blanco. El proceso Bayrin utiliza un horno rectangular dividido en zonas de fusión y sedimentación. En el proceso Vanyucov, el aire enriquecido con oxígeno se inyecta en la capa de escoria y no en la capa de mata.

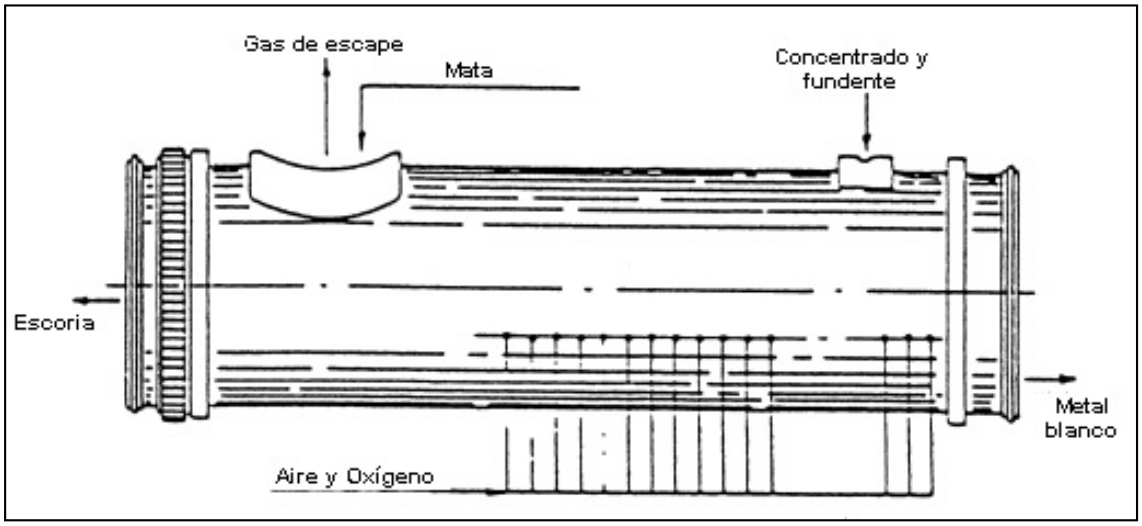


Figura 2.12: Reactor El Teniente.

2.6.2.9 Proceso Mitsubishi

Este proceso emplea tres hornos interconectados, un horno de fusión con baño, un horno eléctrico de limpieza de escoria y un horno convertidor. Entre los hornos se utiliza flujo por gravedad, lo que evita la transferencia mediante cuchara. Todos los hornos son cerrados y con extracción, y los gases de proceso, tras la recuperación del calor, se tratan para eliminar el polvo y el dióxido de azufre.

Los concentrados secos, el aire y los aditivos se cargan en el horno de baño mediante lanzas, y luego se funden para formar mata (60 - 65% de contenido de cobre) y escoria. Esta mezcla fluye continuamente a través de un canal al horno eléctrico de solera, que sirve como horno de sedimentación para separar la escoria. La mata se descarga de forma continua del horno de sedimentación, a través de un sifón, al horno de conversión.

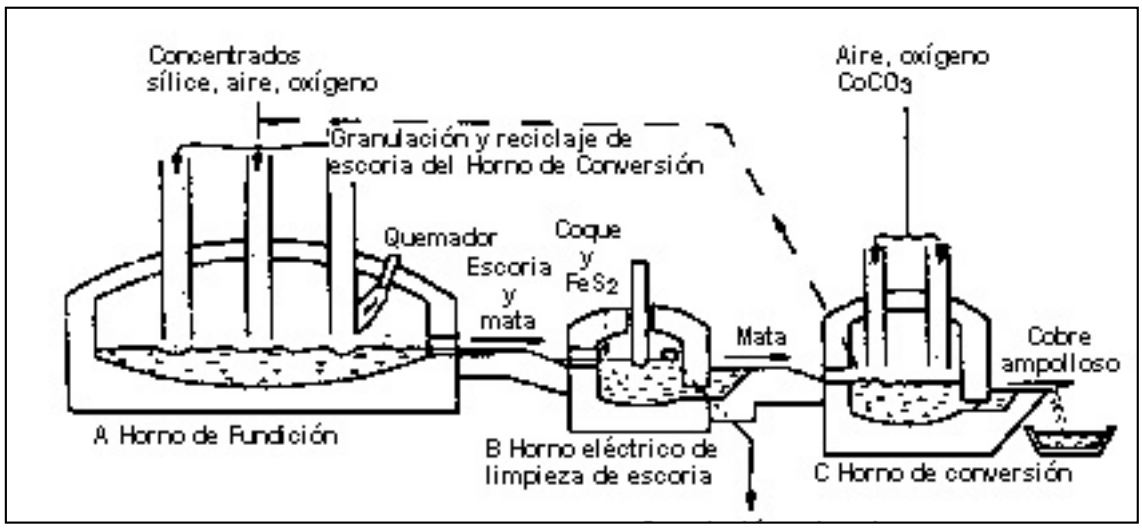


Figura 2.13: Proceso Mitsubishi.

En el convertidor, se inyecta aire, oxígeno y aditivos al baño de líquido a través de lanzas refrigeradas por agua para producir cobre negro. Las escorias del convertidor se reciclan al horno de fusión, que también puede alimentarse con chatarra anódica. Es posible que la etapa del convertidor pueda usarse con otros hornos de fusión.

Este proceso produce cobre negro en continuo.

2.6.2.10 Horno QSL

El horno es un cilindro horizontal dividido en una zona de oxidación y una zona de reducción. El horno está revestido con ladrillos de cromo-magnesita para poder soportar una temperatura de 1250 ºC. Las toberas en la parte inferior del horno suministran oxígeno a la zona de oxidación y una mezcla de aire a la zona de reducción de escoria. La materia prima puede ser húmeda y tener un tamaño desde trozos grandes a material fino. Se alimenta por la parte superior del horno mezclada con carbón y fundentes.

La zona de oxidación produce lingote de plomo, dióxido de azufre y una escoria rica en plomo. Esta fluye a la zona de reducción, de modo que se produce mayor cantidad de lingote de plomo, que fluye en la dirección inversa al orificio de sangrado de plomo. La escoria se sangra desde el lado de reducción y luego se granula. El lingote de plomo se sangra desde el lado de oxidación y luego se

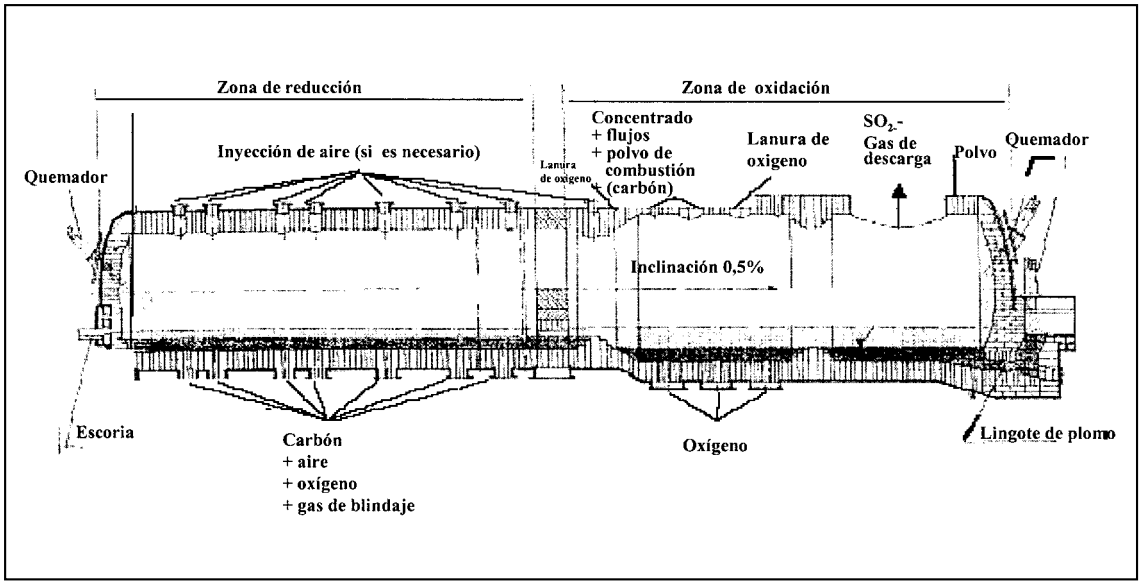


Figura 2.14: Proceso QSL [tm 102, DFIU Zn 1999].

refina. Las campanas y las envolturas completas extraen los gases de salida y de lavado. Los gases de escape se utilizan para recuperar el calor y luego se elimina el polvo antes de pasarlos a una planta de ácido sulfúrico. Otros gases de proceso se limpian en filtros de bolsa.

El proceso QSL está diseñado para producir plomo a partir de concentrados y algunos materiales secundarios en un horno de baño simple y potenciar al máximo la recuperación de energía.

2.6.2.11 Hornos de fusión de Ciclón

En este apartado se incluyen el Reactor de Ciclón al Fuego (RCF) y el reactor Contop. En estos procesos de fusión flash de alta intensidad, los concentrados de cobre y fundente se funden con oxígeno en cámaras de combustión tipo ciclón. En el proceso Contop, el ciclón se dispone verticalmente y la mezcla de reacción cae a una cámara de sedimentación debajo del ciclón. En el proceso RCF, la combustión tiene lugar en una cuba de reacción vertical y la separación de la mata y la escoria se produce en un ulterior reactor horizontal. La escoria y el metal blanco o la mata rica en cobre se separan en la antesolera y se sangran. El metal blanco o la mata se procesan en un convertidor estándar.

Estos procesos se utilizan principalmente para la fundición de concentrados de cobre.

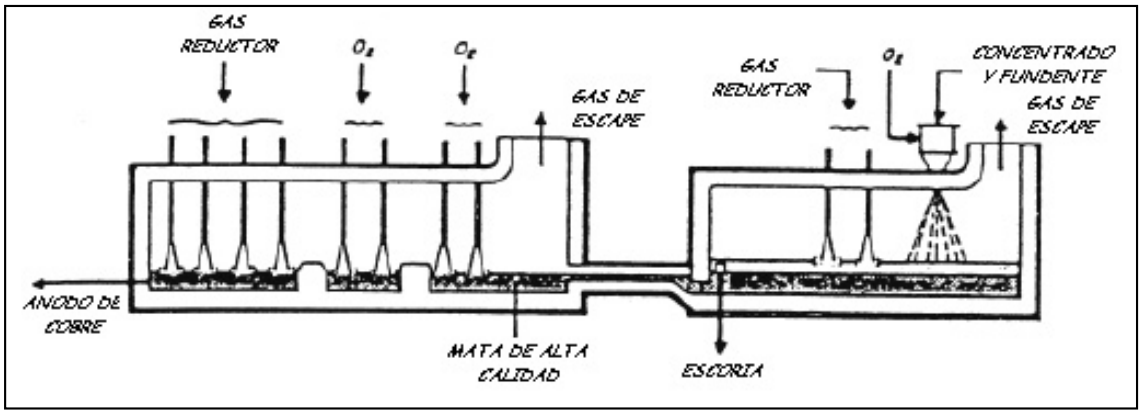


Figura 2.15: Proceso Contop.

2.6.2.12 Horno flash Outokumpu

Este horno utiliza un proceso de fusión flash. Los concentrados secos se funden utilizando el contenido energético de los concentrados para la producción del calor necesario para la fusión del concentrado y el fundente. La mezcla de alimentación de concentrado se alimenta continuamente con aire enriquecido con oxígeno a través de un quemador de concentrado a la cuba de reacción vertical de un horno cerrado en el que las reacciones entre el oxígeno y el concentrado se producen rápidamente en suspensión. El calor de reacción funde las partículas. Las partículas fundidas producen mata y escoria. Al mismo tiempo se produce dióxido de azufre. En instalaciones más antiguas se utilizaba el precalentamiento del aire de proceso a unos 200-800 ºC para conseguir un funcionamiento autógeno, pero en la actualidad la mayoría de instalaciones consiguen una operación autógena utilizando un enriquecimiento de oxígeno has alrededor de un 30 – 90% de oxígeno en el aire de proceso. El grado de enriquecimiento del oxígeno viene determinado por la calidad del concentrado y los requisitos del balance de calor. El flujo continuo de gas de escape abandona el horno a través de la toma superior, para recuperar el calor y eliminar las partículas. Tiene una concentración de dióxido de azufre alta y constante, por lo que se recupera azufre del gas, principalmente mediante conversión a ácido sulfúrico una vez eliminadas las partículas.

La escoria fundida y las partículas de mata se sedimentan a partir del gas en una parte de sedimentación horizontal del horno, formando un baño fundido en el que las fases se separan sin un sedimentador externo. La mata se extrae del horno por sangrado a cuchara, o pasa a través de artesas a granulación, según el método de conversión utilizado. La escoria se extrae del horno por sangrado continuo o semicontinuo, y puede seguirse procesando en un horno de escoria o en un circuito de flotación de escoria para la recuperación del cobre. En algunas instalaciones, el bajo contenido en cobre de la escoria permite desechar o utilizar directamente la escoria producida en la fundición primaria.

El horno flash es un método establecido para la producción de mata de cobre y níquel y cobre negro directamente a partir de concentrados. El horno produce mata de alta calidad y por

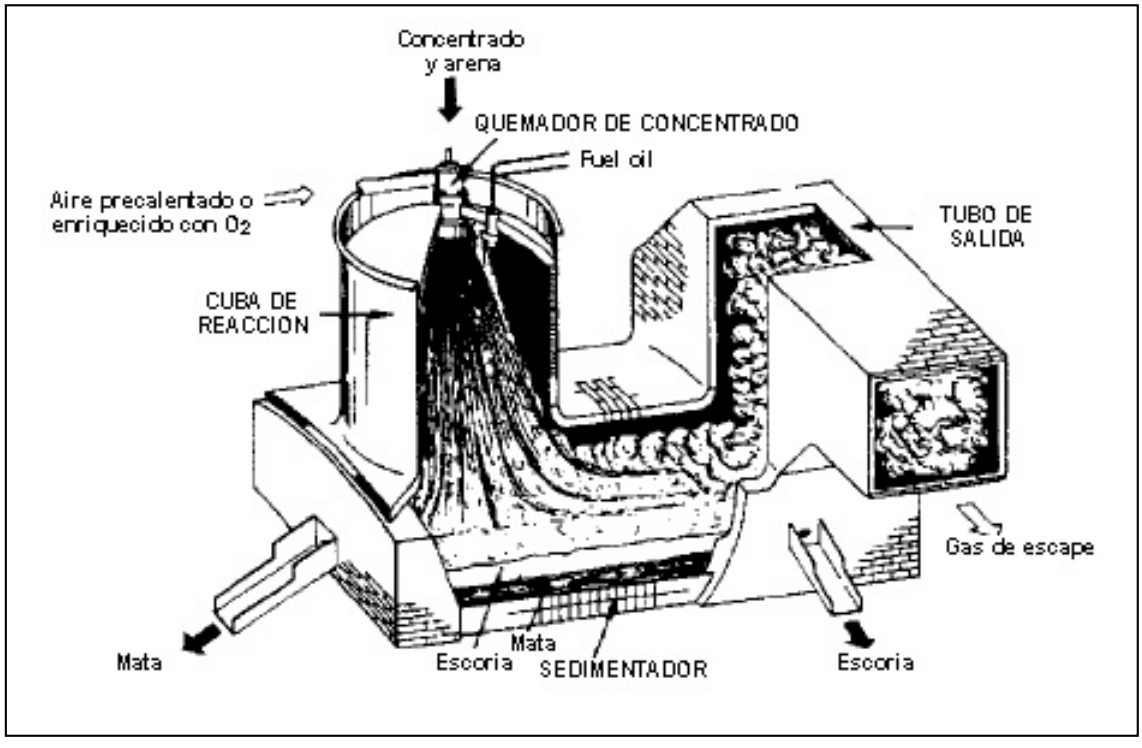


Figura 2.16: Horno Outokumpu.

ello la mayor parte del azufre del concentrado se emite en los gases de fundición y permite que el proceso de conversión (ej. convertidor en discontinuo Pierce-Smith) elimine el resto del azufre más fácilmente.

El horno se ha utilizado a nivel de demostración para la producción para la producción de lingote de plomo y para la volatilización de residuos de Jarosita.

El mismo tipo de horno se emplea en el proceso de Conversión Flash para la conversión de mata molida o granulada en cobre negro. El proceso tiene características similares al proceso de fundición flash, es decir, operación autógena con aire enriquecido con oxígeno y un flujo continuo de gas de escape con un alto contenido en dióxido de azufre.

2.6.2.13 Horno INCO

Se trata de un horno flash similar al Horno Flash Outokumpu, pero utiliza oxígeno puro para operar de forma autógena. El concentrado de mineral de cobre mezclado con agentes escoriantes se inyecta horizontalmente en el horno desde ambos extremos, y los gases de escape se recogen en el centro del horno.

Los concentrados se tuestan y funden en suspensión en el horno y caen al sedimentador del mismo modo que el Horno Flash Outokumpu. El calor producido por tostación es suficiente para un proceso de fundición autotérmica. La escoria, que tiene un contenido de cobre medio, sale continuamente por un extremo del horno, y la mata se sangra periódicamente en el centro de la pared lateral. El gas residual contiene hasta un 75% de SO_2.

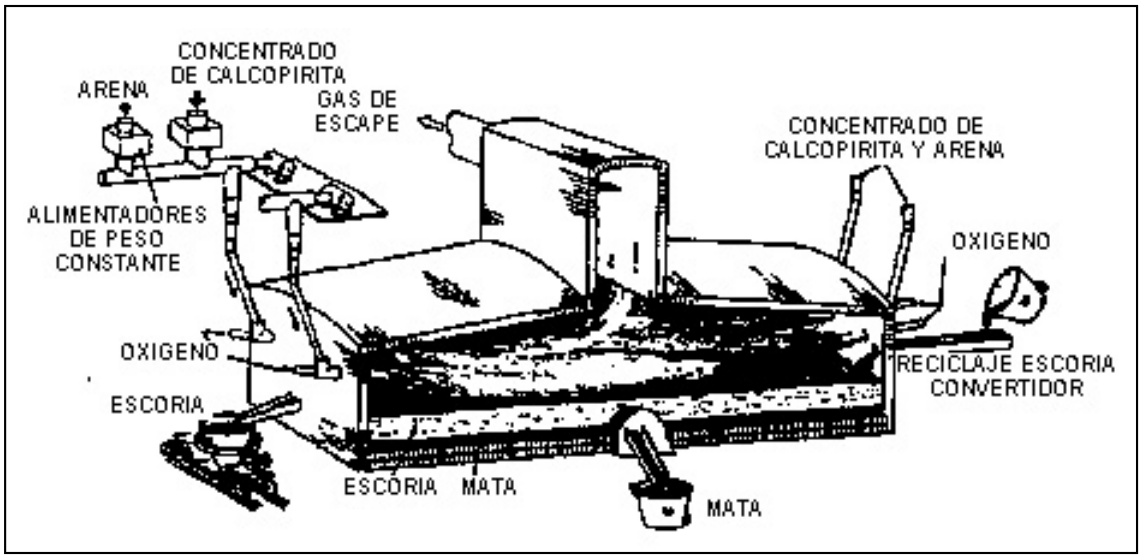


Figura 2.17: Horno INCO.

2.6.2.14 Horno Kivcet (KSS)

Se trata de un horno flash similar a Horno Flash Outokumpu. Los componentes de carga secos y mezclados, junto con oxígeno, se alimentan en continuo a través de quemadores en la parte superior de una cuba de oxidación. Al mismo tiempo se agrega menudo de coque.

La carga se inflama al entrar en la cuba de reacción, se alcanzan temperaturas de hasta 1.400 ºC y se produce una desulfurización completa. El menudo de coque sólo se calienta al caer por la cuba. El coque flota en el baño de escoria y reduce el PbO. La escoria y el lingote parcialmente

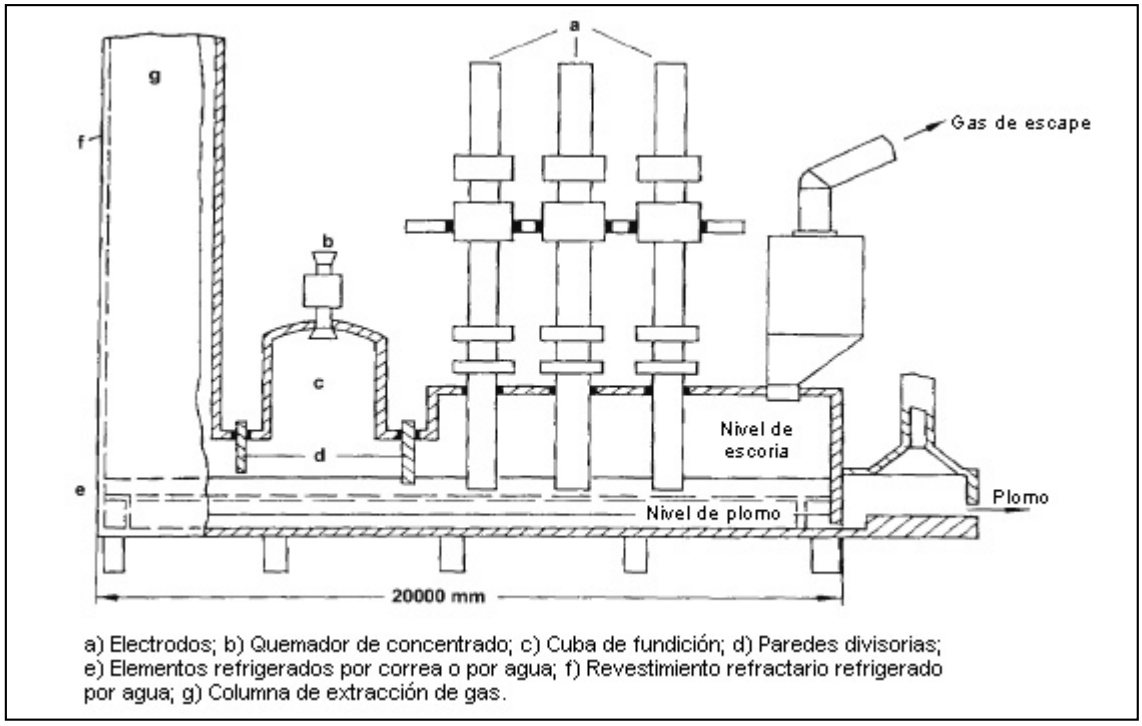


Figura 2.18: Horno Kivcet .

reducidos fluyen, por debajo de una pared divisoria sumergida, a la sección de reducción del horno, que está calentada eléctricamente y en la que se agrega más coque o carbón para la reducción final.

El lingote de plomo se envía para su refinado, la escoria puede enviarse a un horno Waelz. El polvo de combustión de la oxidación se devuelve directamente al horno. El polvo de combustión de la etapa de reducción se trata en un horno ISF. El proceso se utiliza asimismo para la producción de cobre.

2.6.3 Convertidores

2.6.3.1 Convertidor Pierce-Smith

Estos convertidores funcionan en discontinuo y utilizan toberas para inyectar aire u oxígeno en la mata para hacerla reaccionar en dos etapas para dar cobre negro o mata de níquel de alta calidad y escoria. También se utilizan para la producción de ferroníquel y de algunos óxidos metálicos.

Se producen grandes volúmenes de gases calientes durante los periodos de soplado, que se recogen mediante campanas situadas sobre la abertura del convertidor. El espacio entre la carcasa del convertidor y la campana permite el acceso de aire de paso, que causa la dilución de los gases efluentes ricos en SO_2. La concentración de SO_2 varía según el ciclo del proceso. Durante el soplado inicial, las concentraciones de SO_2 pueden ser considerablemente mayores del 10%, durante el periodo de soplado subsiguiente, y cuando se separa el convertidor de la campana, las concentraciones de SO_2 son mucho menores y a menudo nulas. La concentración variable de SO_2 no permite una alimentación satisfactoria a la planta de ácido, que precisa un caudal relativamente constante. Los gases pueden también mezclarse con gases de fundición mucho más fuertes. El uso de oxígeno para enriquecer el aire insuflado aumenta asimismo el contenido en SO_2, aunque el enriquecimiento está limitado debido a un desgaste del material refractario en rápido aumento. En algunas plantas se utilizan campanas refrigeradas por agua.

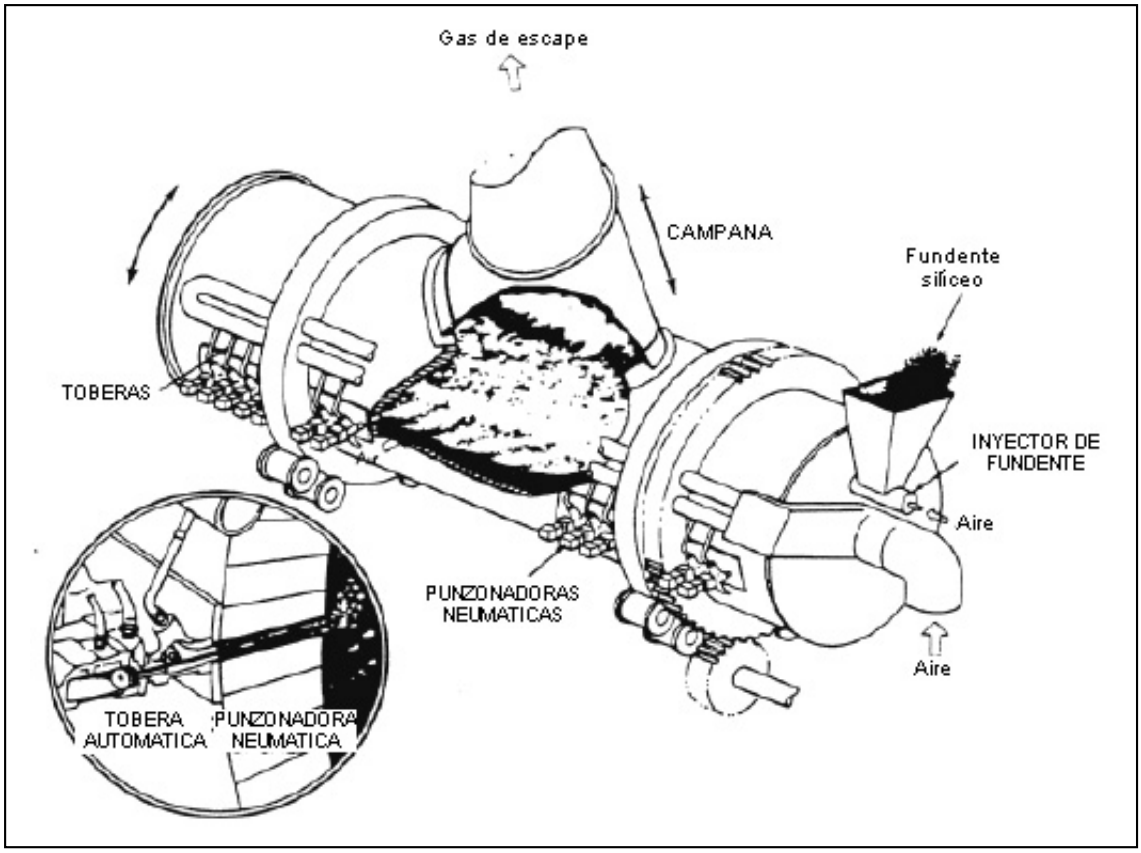


Figura 2.19: Convertidor Pierce-Smith.

El convertidor se carga mediante cucharas con mata líquida, y las escorias producidas durante la 5conversión de la mata y el cobre negro producido se vierten subsiguientemente en cucharas desde el convertidor. Durante estos procesos de sangrado se liberan emisiones fugitivas. El uso de instalaciones adicionales de extracción de vapores (ej. campanas secundarias y cortinas de aire) y el control de la posición del convertidor para evitar que haya soplado durante la apertura del convertidor, pueden reducir estas emisiones. También se utilizan sistemas de carga a través de la campana y la tobera, de modo que no siempre es necesario inclinar el convertidor para separarlo de la campana durante la carga de chatarra metálica y fundentes.

El formato general de horno de tambor adoptado por este tipo de convertidor se utiliza asimismo en los **Hornos de Anodo**, en los que se refina el cobre blíster (o ampolloso) o negro producido por el convertidor. Estos hornos emplean toberas para un ulterior soplado de aire, seguido de la adición de un agente reductor (normalmente gas natural o propano) para eliminar las trazas finales de azufre y luego convertir el óxido de cobre en cobre.

Este es con mucho el medio de conversión de mata más común, y se utiliza para producir cobre y mata de níquel de alta calidad, así como para refinar ferroníquel.

2.6.3.2 Convertidor Hoboken

Este convertidor opera mediante el mismo principio de soplado que el Convertidor Pierce-Smith, pero se evitan los grandes escapes de gas que ocurren normalmente cuando se inclina el convertidor para cargar y sangrar la escoria y el cobre bruto.

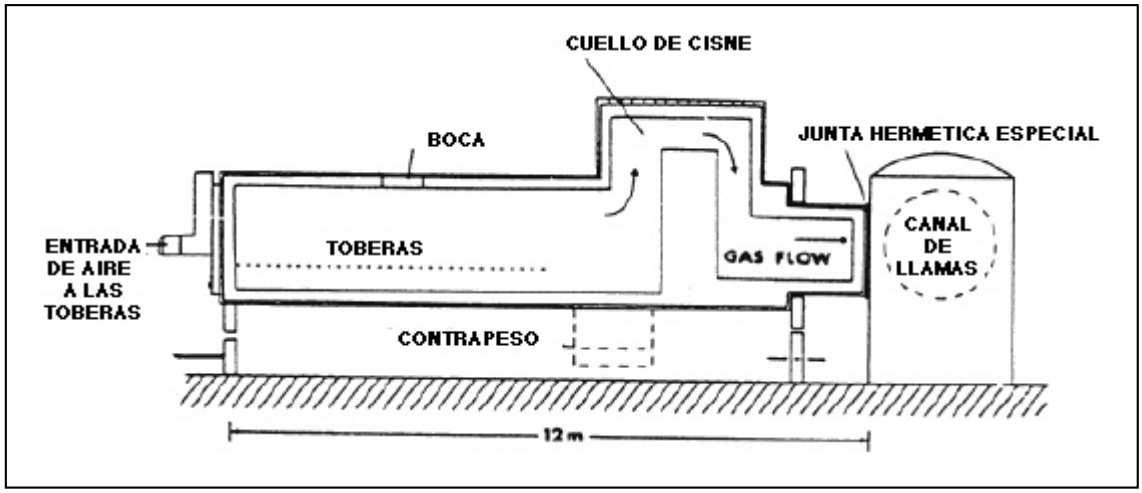


Figura 2.20: Convertidor Hoboken.

El gas efluente es aspirado a través del canal de llamas al final del convertidor. El sifón minimiza el escape de gas durante todas las fases de funcionamiento. El convertidor se carga a través de una pequeña abertura en la parte superior de la carcasa, de modo que la carga puede realizarse durante el soplado sin inclinar el convertidor, debido a la menor duración del proceso. La dilución de los gases efluentes debido a la infiltración de aire es pequeña, por lo que la concentración media constante de SO_2 es mayor que para el convertidor Pierce-Smith. No obstante, la concentración de SO_2 sigue variando a lo largo del ciclo. El resultado final es una menor pérdida de SO_2 del convertidor. El menor tamaño de la abertura usada para la carga puede crear problemas debido a la acumulación de escoria.

2.6.3.3 Otros convertidores

El horno ISA Smelt/Ausmelt, el TRBC, la etapa de convertidor del proceso Mitsubishi y el convertidor Noranda también se utilizan como convertidores. Estos hornos utilizan mata fundida como material de alimentación. El convertidor OBM se utiliza para ferroníquel. También se utiliza el convertidor flash (Kennecott/Outokumpu), en cuyo caso se emplea mata molida como material de alimentación. El Convertidor Mitsubishi y el Convertidor Flash son los únicos Convertidores en continuo utilizados en metalurgia actualmente.

2.6.4 Hornos de fusión y refinado

2.6.4.1 Hornos de inducción

Se trata de hornos simples de crisol o de canal calentados por una inductancia eléctrica externa, los hornos de inducción de canal se utilizan principalmente para la fusión de elementos de grandes dimensiones. En un caso, el horno de canal se utiliza para fundir latas de aluminio.

La corriente se induce en el metal que se ha cargado en el horno y se genera calor. Los hornos están equipados con campanas extractoras de vapores y sistemas de eliminación de polvo que pueden usarse durante las operaciones de aplicación de escoria y vertido. El acceso al horno de inducción para la carga y el sangrado significa que a menudo se utiliza un sistema de campanas móviles. Las campanas son robustas y pueden resistir un cierto impacto mecánico. Como alternativa, se utiliza un sistema eficaz de extracción fija o lateral.

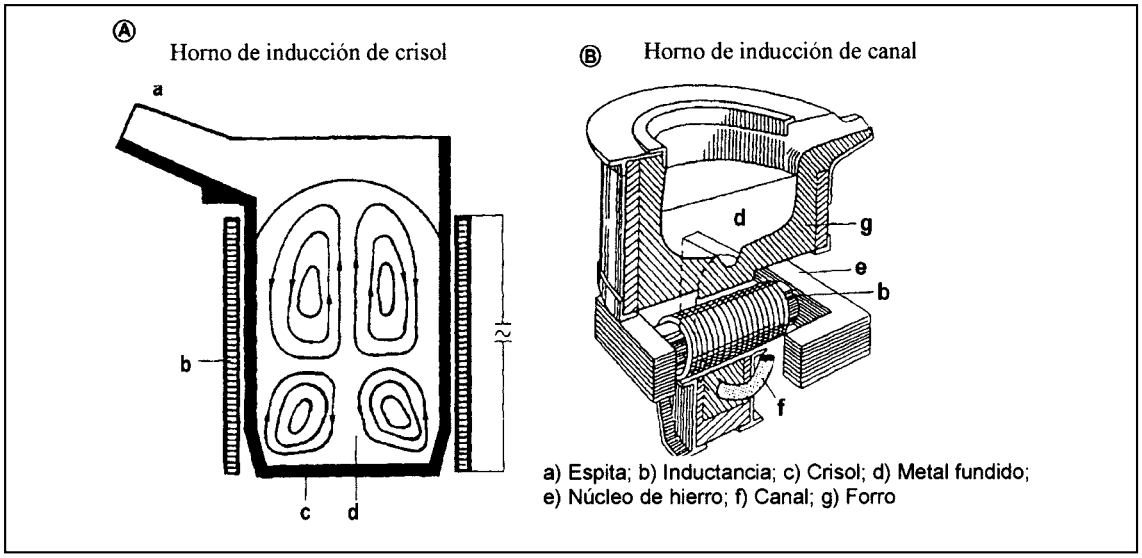


Figura 2.21: Hornos de Inducción.

La eficacia de este horno puede ser baja para algunos materiales, pero puede aumentarse, particularmente si el material de alimentación es pequeño. Los elementos grandes pueden cortarse para mejorar la eficacia, así como para permitir que las campanas de recogida de vapores puedan instalarse adecuadamente. Algunos procesos continuos conservan asimismo un "fondo" de metal fundido en la parte inferior del horno entre cargas si el funcionamiento lo permite.

Estos hornos se utilizan para capacidades de fusión pequeñas, de hasta 30 t, normalmente para cobre, latón, zinc y aluminio. También pueden utilizarse al vacío, por ejemplo en la fusión de superaleaciones, acero de alta aleación, metales puros y en algunos casos para destilación de metales. La temperatura del horno puede controlarse automáticamente para minimizar la producción de vapor al fundir metales volátiles u oxidables como el zinc o aleaciones que contengan zinc.

Estos hornos se utilizan asimismo para "retener" metal fundido para aleación y moldeo. La corriente inducida en estos hornos hace que el metal se agite electromagnéticamente, lo que promueve la mezcla de la carga y de los materiales de aleación que se agreguen.

2.6.4.2 Calderas con calentamiento indirecto

Se trata de hornos de crisol simples que se calientan externamente con los gases de combustión de la combustión de gas o aceite, con electricidad o, para temperaturas más bajas, mediante fluido térmico. El contacto directo con la llama se evita, para impedir que haya puntos calientes localizados en la base del crisol y poder mantener un buen control de temperatura en la fusión, de modo que se evite la oxidación y volatilización del metal.

Estas calderas se utilizan principalmente para fundir plomo limpio y aleaciones de plomo, así como zinc y sus aleaciones.

2.6.4.3 Horno de cuba para fusión de metal

Se trata de un horno vertical simple con una solera de recogida (dentro o fuera del horno), así como sistema de quemadores en el extremo inferior de carga de material en la parte superior. Los quemadores son normalmente alimentados a gas y están diseñados para producir una atmósfera oxidante o reductora. Esto permite fundir el metal con o sin oxidación. El metal se

alimenta a la parte superior del horno y se funde a medida que pasa por la cuba. Normalmente se dispone de control independiente de la relación entre combustible y aire para cada quemador. También se dispone de control continuo del nivel de CO e hidrógeno para cada fila de quemadores, y también se miden los gases de combustión de cada quemador. Normalmente, los gases de combustión se extraen y se miden. En ocasiones se utiliza un sistema de postcombustión para descomponer el monóxido de carbono, el aceite, los COVs o las dioxinas que puedan emitirse. La adición de oxígeno por encima de la zona de fusión se ha utilizado para aplicar postcombustión en los niveles superiores de los hornos de cuba o altos hornos.

El horno se utiliza para fundir metal puro, aunque ocasionalmente se utiliza metal contaminado con materia orgánica. Si se alimenta metal con aceite en el horno, pasa a través del gradiente de temperatura que existe entre la zona de carga y los quemadores. La baja temperatura puede producir una neblina de material orgánico parcialmente quemado. El horno de cuba también se utiliza para cargar material antes de la fundición.

2.6.4.4 Proceso Contimelt

Este proceso utiliza dos hornos interconectados, un horno de cuba con solera y un horno de tambor. El primero es un horno rectangular vertical con una cámara colectora horizontal que se alimenta con cobre blíster o cobre negro y otras materias primas. Los quemadores de oxi-gas suministran calor y el material se funde para producir cobre refinado al fuego y una pequeña cantidad de escoria que se separa.

El cobre fundido fluye a través de un sifón y batea a un horno horizontal cilíndrico donde se oxida mediante gas natural. El cobre refinado se moldea entonces como ánodos. Los gases del segundo horno se pasan a un sistema de postcombustión. Luego se combinan con gases extraídos del primer horno y pasan a una caldera de recuperación, a un quemador de precalentamiento de aire, a una etapa de enfriamiento y por último a un filtro de bolsa.

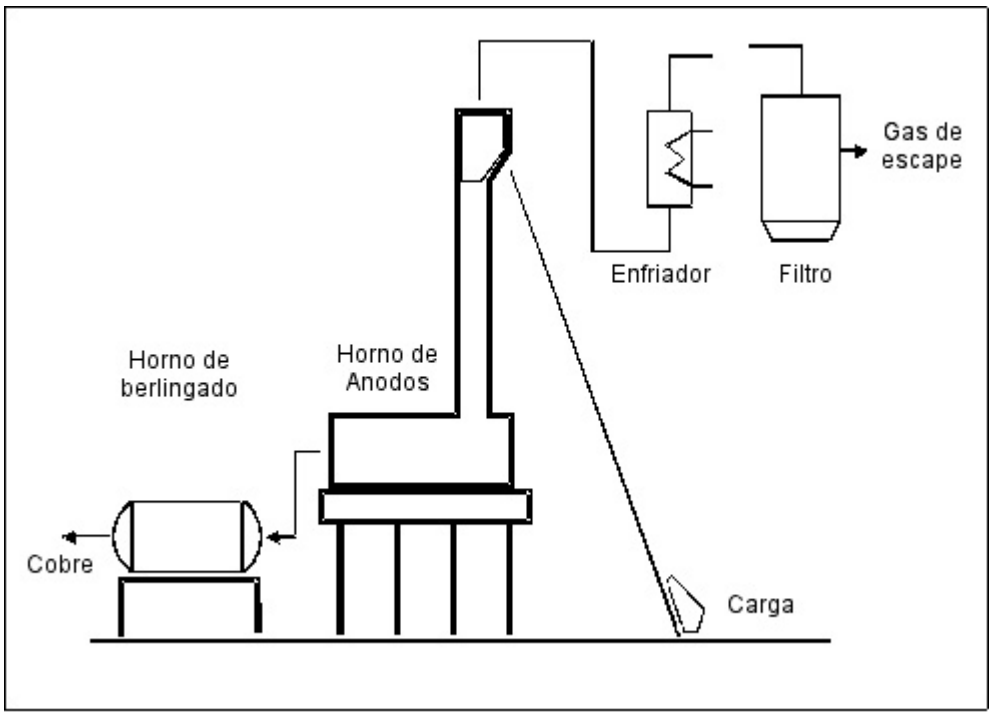


Figura 2.22: Proceso Contimelt [tm 124, DFIU Cu 1999].

Las condiciones operativas del horno pueden controlarse para minimizar la oxidación del metal. Este esquema permite la recuperación del calor mediante producción de vapor o precalentamiento de la carga.

Se trata de un proceso continuo de 2 etapas para fundir y tratar cobre negro y cobre blíster, chatarra de cobre de alta calidad y chatarra anódica para producir ánodos de cobre. Un proceso similar en la industria del aluminio es el proceso Meltower [tm 116, ALFED 1998]. Este proceso utiliza una torre de fusión vertical e incorpora precalentamiento de la carga mediante los gases de escape calientes.

2.6.4.5 Hornos de haz de electrones

Las elevadas temperaturas de fusión de los metales refractarios, como tungsteno, tantalio o niobio, no permiten su fusión en un horno de fusión normal. Para metales con elevado punto de fusión se ha desarrollado, usando electrones acelerados como fuente de energía para transferir su energía a la carga del horno. La fusión mediante haz de electrones se utiliza para producir metales libres de inclusiones de gran pureza. La capacidad de fundir metales de gran pureza es debida a la fuente calorífica de alta temperatura perfectamente limpia (electrones) y a la solera de cobre refrigerada por agua. El metal fundido solidifica al entrar en contacto con el cobre, de modo que el metal fundido sólo está en contacto con su propio sólido. La fusión y refinado mediante haz de electrones es un proceso bien establecido para la producción de metales refractarios ultralimpios, como vanadio, niobio, tantalio, molibdeno y tungsteno.

2.6.4.6 Horno rotatorio

Se trata de un cilindro rotatorio con revestimiento refractario equipado con quemador en un extremo. En un extremo se dispone de una puerta de carga, y a veces el quemador está integrado en la misma. Puede utilizarse combustión oxiacetilénica. Los hornos pueden ser “largos” o “cortos” y existen diversas variantes.

- Hornos rotatorios cortos: Fundición de plomo secundario, metales preciosos, etc.
- Hornos rotatorios largos: Fusión y recuperación de chatarra de aluminio, etc.
- Horno Thomas: Fusión y refinado de chatarra de cobre, etc.
- Horno rotatorio con toberas sumergidas: Refinado de cobre blíster o negro, limpieza de escoria, etc.

La rotación del horno puede variarse, para conseguir una reacción completa del material de carga y una alta eficacia. Las materias primas se cargan normalmente a través de una puerta situada en un extremo, que normalmente está en un recinto cerrado y con extracción para evitar emisiones de vapores. Los hornos utilizan combustión con aceite o gas, y quemadores oxiacetilénicos.

Las escorias y metal producidos durante el proceso pueden sangrarse desde una toma de sangrado en el extremo de la puerta o en el punto medio del horno. El orificio de sangrado se orienta mediante la rotación parcial del horno para mantener la separación del metal y la escoria. El sangrado desde el extremo de la puerta permite la recogida de vapores con un solo sistema de cierre y extracción. También se utilizan hornos rotatorios basculantes, que presentan índices de recuperación mejorados para algunos materiales de entrada y no se basan tanto en el uso de fundentes.

En estos hornos pueden fundirse o fusionarse distintos metales.

2.6.4.7 Horno de reverbero

Se trata de un horno de baño rectangular o circular, con revestimiento refractario, calentado por quemadores montados en las paredes o en el techo. Se utilizan diversos tipos de combustibles, y pueden usarse quemadores oxiacetilénicos para aumentar la velocidad de fusión. Se aplica extracción y tratamiento de los gases de combustión, y los hornos son parcialmente cerrados. Las campanas y bateas cubiertas permiten la extracción durante el sangrado y la carga.

La escoria puede eliminarse mediante rastrillado o sangrado.

Muchos diseños tienen grandes puertas de acceso que permiten la carga de objetos grandes. Esto introduce el problema de la hermeticidad y de la extracción durante la carga. La refrigeración por agua de las puertas puede reducir este problema reduciendo el alabeo de las puertas. Se utilizan carros de carga herméticos, y para concentrados pueden usarse conductos de carga. De forma similar, el cierre de la puerta puede verse afectado por la carga incorrecta de material en el horno. En algunos casos, un derrame de metal o escoria puede solidificar en la abertura, y en otros casos un alambre o cable puede evitar que las puertas se cierren debidamente.

La eficacia de fusión de un horno de reverbero normalmente no es grande, debido a una mala transferencia de calor del quemador. La eficacia se ha mejorado en la práctica mediante el uso de enriquecimiento con oxígeno o mediante combinaciones de combustible gas y líquido para extender la longitud de la llama.

Estos hornos se utilizan para la fusión, refinado y mantenimiento en discontinuo de diversos metales.

2.6.5 Resumen de hornos

Tabla 2.5: Hornos de secado, tostación, sinterización y calcinación

Horno	Metales Usados	Material Usado	Comentarios
Secador de serpentín de vapor Secador de lecho fluido Secador flash	Cu y otros	Concentrados	
Horno de secado rotatorio	Secado de la mayoría de metales. Volatilización de ZnO. Calcinación de alúmina, Ni y ferroaleaciones. Combustión de película en metales preciosos. Eliminación de aceite de chatarra de Cu y Al.	Minerales, concentrados y chatarra y residuos diversos.	Aplicaciones en secado, calcinación y volatilización. Se usa como incinerador.
Lecho fluidizado.	Cobre y zinc Al_2O_3	Concentrados. $Al(OH)_3$	Calcinación y tostación.
Máquina de sinterización con tiro ascendente	Zinc y plomo.	Concentrados y materias secundarias.	Sinterización.
Máquina de sinterización con tiro descendente	Zinc y plomo.	Concentrados y materias secundarias	Sinterización.
Máquina de sinterización con correa de acero	Ferroaleaciones, Mn, Nb.	Mineral.	Otras posibles aplicaciones.
Herreshoff	Mercurio y metales refractarios, Mo (recuperación de renio)	Minerales y concentrados.	Tostación, calcinación.

Tabla 2.6: Hornos de fundición y conversión

Horno	Metales Usados	Material Usado	Comentarios
Hornos de crisol cerrados con revestimiento refractario	Metales refractarios, ferroaleaciones especiales	Oxidos metálicos	
Pit abierto	Metales refractarios, ferroaleac. especiales	Oxidos metálicos	
Baiyin	Cobre	Concentrados	
Horno de arco eléctrico	Ferroaleaciones	Concentrados, mineral	
Contop/Ciclón	Cobre	Concentrados	
Horno de arco eléctrico sumergido	Metales preciosos, cobre, ferroaleaciones.	Escoria, materiales secundarios, concentrados.	Para la producción de ferroaleaciones se usan los tipos abierto, semicerrado y cerrado.
Rotatorio	Aluminio, plomo, metales preciosos	Chatarra y otros secundarios	Oxidación y reacción con sustrato.
Horno Rotatorio Basculante	Aluminio	Chatarra y otros secundarios	Minimiza el uso de fundente.
Reverbero	Aluminio, cobre, otros	Chatarra y otros secundarios	Fundición de material de óxido de cobre, refinado.
Vanyucov	Cobre	Concentrados	
ISA Smelt/Ausmelt	Cobre, plomo,	Intermedios, concentrados y materiales secundarios.	
QSL	Plomo	Concentrados y secundarios	
Kivcet	Plomo Cobre	Concentrados y secundarios	
Noranda	Cobre	Concentrados	
El Teniente	Cobre	Concentrados	
TBRC TROF	Cobre (TBRC), Metales preciosos	Mayoría de secundarios, incluidos limos	
Mini Fundición	Cobre/plomo/estaño	Chatarra	
Alto horno y horno ISF	Plomo, plomo/zinc, cobre, metales preciosos, ferromanganeso alto en carbono.	Concentrados, la mayoría de secundarios	Para la producción de ferromanganeso se utiliza sólo con recuperación de energía.
Horno flash Inco	Cobre, níquel	Concentrados	
Horno flash Outokumpu	Cobre, níquel	Concentrados	
Proceso Mitsubishi	Cobre	Concentrados y chatarra anódica	
Pierce Smith	Cobre(convertidor), ferroaleaciones, Producción de óxidos	Mata y chatarra anódica	
Hoboken	metálicos	Mata y chatarra anódica	
Convertidor flash Outokumpu	Cobre(convertidor) Cobre(convertidor)	Mata	
Convertidor Noranda	Cobre(convertidor)	Mata	
Convertidor Mitsubishi	Cobre(convertidor)	Mata	

Tabla 2.7: Hornos de Fusión

Horno	Metales Usados	Material Usado	Comentarios
Inducción	La mayoría	Metal y chatarra limpios	La agitación inducida favorece la aleación. Puede aplicarse vacío para algunos metales.
Haz de electrones	Metales refractarios	Metal y chatarra limpios	
Rotatorio	Aluminio, plomo	Varias calidades de chatarra	Se utilizan fundentes y sales para matrices complejas.
Reverbero	Aluminio (primario y secundario)	Varias calidades de chatarra	La configuración del baño o la solera puede variar. Fusión o mantenimiento.
Contimelt	Cobre	Anodo de cobre y chatarra limpia	Sistema de horno integral.
Cuba	Cobre	Anodo de cobre y chatarra limpia	Condiciones reductoras.
Tambor (Thomas)	Cobre	Chatarra de cobre limpia	Fusión, refinado al fuego.
Crisol con calefacción (calderas indirectas)	Plomo, zinc	Chatarra limpia	Fusión, refinado, aleación.
Crisoles con calentamiento indirecto	Metales preciosos	Metal limpio	Fusión, aleación.

2.6.6 Procesos electroquímicos

2.6.6.1 Electro-recuperación

Se utiliza una célula electrolítica consistente en un ánodo inerte de plomo o titanio y un cátodo, colocado en un electrolito acuoso que contiene la solución del metal. El cátodo es una pieza en bruto delgada de metal puro (lámina de inicio) o una lámina formadora de acero inoxidable o aluminio (placa catódica permanente). Los iones de metal pasan desde la solución y se depositan sobre el cátodo, mientras que en el ánodo se desprenden gases como cloro u oxígeno. El cloro se recoge en un compartimento hermético del ánodo, pero el oxígeno se libera normalmente y puede arrastrar algo de electrolito y producir una neblina ácida, que debe ser recogida y devuelta al proceso. El electrolito consumido se devuelve normalmente al proceso.

Este método se utiliza para la producción de cobre, cobalto, níquel, estaño, zinc y metales preciosos. Si se utilizan placas catódicas de metal puro, los depósitos pueden desprenderse o rascarse para ser fundidos y moldeados en la forma deseada.

2.6.6.2 Electro-refinado

Se utiliza una célula electrolítica consistente en un ánodo moldeado del metal a refinar y un cátodo, colocado en un electrolito que contiene la solución del metal. El cátodo es una pieza en bruto delgada de metal puro (lámina de inicio) o una lámina formadora de acero inoxidable o aluminio (placa catódica permanente). Los iones metálicos son disueltos desde el ánodo impuro y pasan a la solución, desde la cual se depositan en el cátodo.

Este método se utiliza para la producción de cobre, metales preciosos, plomo y zinc. Si se

utilizan placas catódicas permanentes, los depósitos de metal puro pueden desprenderse o rascarse para ser fundidos y moldeados en la forma deseada.

Durante el electro-refinado se separan otros metales contenidos en los ánodos, los metales solubles se disuelven en el electrolito, y los metales insolubles como los metales preciosos, Se y Te, forman un limo anódico que sedimenta en las células electrolíticas. Los limos anódicos se extraen periódicamente de las células, recuperándose los metales valiosos. En algunos casos se utilizan bolsas anódicas para contener los limos.

Una parte del electrolito se sangra del sistema, y de él se recuperan otros metales.

2.6.6.3 Electrólisis de sales fundidas

Una célula electrolítica está construida con cátodos y ánodos inertes (acero o carbono), de modo que puedan soportar las elevadas temperaturas del electrolito. El metal fundido se deposita en la cátodo y se extrae periódicamente mediante vacío o desplazamiento. En el ánodo se desprenden gases como cloro u oxígeno; el cloro se recoge y se recicla o se vende. Para aluminio, el oxígeno reacciona con el ánodo de carbono, que se consume continuamente.

La electrólisis de sales fundidas puede usarse para la producción de aluminio, litio, sodio y magnesio.

2.6.7. Procesos hidrometalúrgicos

En estos procesos se emplean ácidos y NaOH, y en ocasiones también Na_2CO_3 para disolver el contenido de metal antes del refinado y la electro-recuperación. Los materiales a lixiviar están normalmente en forma de óxido, bien un mineral de óxido, bien un óxido producido por tostación [tm 137, Copper Expert Group 1998]. La lixiviación directa de concentrado de zinc se realiza asimismo tanto a presión elevada como a presión atmosférica. Algunos minerales de sulfuro de cobre pueden lixiviarse con ácido sulfúrico o con otros medios, en ocasiones utilizando bacterias naturales para promover la oxidación y la disolución, pero se utilizan tiempos de estancia muy largos. Puede agregarse aire, oxígeno o cloruro a los sistemas de lixiviación para que obtener unas condiciones apropiadas, y también se utilizan soluciones que contienen cloruro férrico. Las soluciones que se producen se tratan de diversas formas para refinar y recuperar los metales. Una práctica común es devolver las soluciones consumidas a la etapa de lixiviación cuando sea apropiado, para conservar los ácidos y soluciones alcalinas.

2.6.7.1 Lixiviación en montones

La lixiviación abierta en montones se realiza normalmente en la mina. El material se tritura y moltura para permitir un contacto íntimo entre las partículas y el ácido, y luego se dispone en montones naturales sobre un revestimiento impermeable. Los montones se rocían con ácido, que se infiltra a través del material [tm 130, Chadwick 1994]. Se recoge en el revestimiento y se recircula para permitir que se acumule el contenido en metal. El tiempo de lixiviación de un mismo montón puede ir desde 100 días para mineral de óxido de cobre hasta 500 días para mineral de sulfuro de cobre.

2.6.7.2 Lixiviación atmosférica (tanque abierto)

La lixiviación abierta de óxidos y concentrados se realiza en tanques abiertos o parcialmente cerrados, recirculando la mezcla para mantener la temperatura y la concentración del ácido. El

sistema se utiliza normalmente en varios tanques en serie. A continuación se realiza una sedimentación para separar el residuo, y luego la purificación o recuperación de la solución de metal. Algunos residuos de lixiviación pueden seguirse lixiviando si se aumenta la concentración del ácido y la temperatura. El uso de varias etapas de lixiviación puede mejorar la eficacia de lixiviación, pero puede producir la disolución de más impurezas, particularmente hierro, que posteriormente debe ser eliminado.

2.6.7.3 Lixiviación a presión (autoclave)

La lixiviación a presión o en autoclave puede realizarse como un proceso de lixiviación completo o como parte de una serie de etapas de lixiviación. Se utilizan recipientes a presión resistentes a los ácidos o a los álcalis, y la solución se recircula para hacer que se produzcan las reacciones. Puede agregarse oxígeno, aire o cloro para aumentar la oxidación. Las etapas de reducción de presión pueden hacer que se produzcan neblinas ácidas, y están diseñadas para contenerlas.

2.6.7.4 Extracción con disolventes

Los metales pueden extraerse de las soluciones acuosas con ciertos disolventes orgánicos insolubles en agua. Las fases acuosa y orgánica se dispersan entre sí y, mediante el control del pH de la mezcla y el agente complejante utilizado, el metal deseado se extrae selectivamente a la fase orgánica. Tras la separación de fases se obtiene una solución de metal puro reextrayendo el metal de la fase orgánica a una fase acuosa secundaria (stripping), desde la cual el metal puede recuperarse en distintas formas. La siguiente figura muestra el principio de un proceso de este tipo:

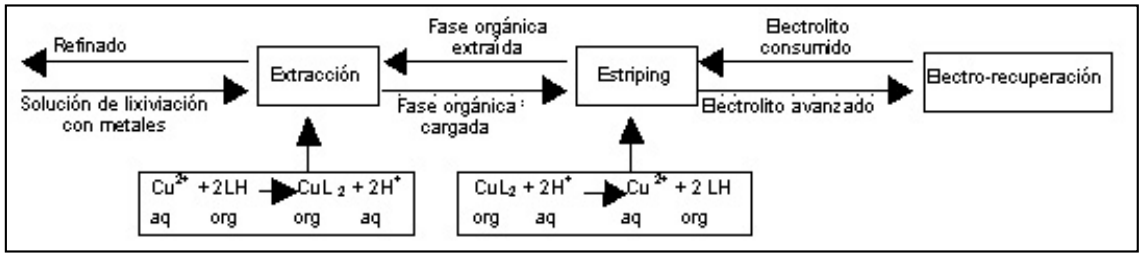


Figura 2.23: Etapas de proceso de la extracción con disolventes (SX).

2.6.8 Técnicas de control de proceso

Los principios de las Mejores Técnicas Disponibles incluyen los conceptos de cómo se diseña, opera, controla, asigna personal y mantiene un proceso. Estos factores permiten alcanzar un buen comportamiento en términos de prevención y minimización de emisiones, eficacia de proceso y ahorro de costes. Se utiliza un buen control de proceso para conseguir estas mejoras, así como para mantener condiciones seguras.

El control de proceso se ha desarrollado recientemente en este sector, y se aplica a diversos procesos. Se utilizan las siguientes técnicas:

El muestreo y análisis de materias primas se utiliza comúnmente para controlar las condiciones de la planta. Debe conseguirse una buena mezcla de distintos materiales de partida para obtener una eficacia de conversión óptima y reducir las emisiones y rechazos.

Los sistemas de pesaje y medición de material de entrada son ampliamente utilizados. Los silos de pérdida de peso, las básculas de cinta transportadora y las básculas convencionales se utilizan con frecuencia para este fin.

Se utilizan microprocesadores para controlar a velocidad de alimentación del material, las condiciones de los procesos críticos y de combustión, así como adiciones de gas. Se miden varios parámetros para poder controlar los procesos, existiendo alarmas para los parámetros críticos:

- Medición en línea de temperatura, presión (o depresión) de los hornos y volumen o caudal de gases.
- Control de los componentes de los gases (O_2, SO_2, CO).
- El control en línea de la vibración se utiliza para detectar bloqueos y posibles fallos del equipo.
- Medición en línea de intensidad y voltaje de los procesos electrolíticos.
- Medición en línea de las emisiones para controlar los parámetros de proceso críticos.

Medición y control de la temperatura de los hornos de fusión para evitar la producción de vapores de metales y de óxidos metálicos por sobrecalentamiento.

Los gases de proceso se recogen con sistemas de hornos cerrados o semicerrados. Se utilizan velocidades de extracción variables e interactivas para asegurar que se mantengan velocidades óptimas de recogida de gases y se minimicen los costes energéticos.

Los vapores de disolventes se recogen y recuperan en la medida de lo posible. Se realizan extracciones posteriores de vapores de disolventes para evitar la emisión de COVs y olores.

Los operarios, técnicos y otros deben recibir formación continuada y ser evaluados en el uso de las instrucciones operativas, el uso de las modernas técnicas de control descritas, así como sobre las acciones a realizar e importancia de las mismas cuando se producen alarmas.

Optimización de los niveles de supervisión para aprovechar lo anteriormente descrito y mantener la responsabilidad de los operarios.

Uso de sistemas de gestión medioambiental y sistemas de calidad.

Realización de estudios de riesgos y de viabilidad en la fase de diseño y en todos los cambios de proceso.

Uso de sistemas de mantenimiento sólidos. Cada vez más se dispone de personal de mantenimiento especializado que forma parte de equipos de operarios que complementan a los equipos especializados en mantenimiento.

En diversas secciones de este documento se incluyen comentarios generales sobre algunos aspectos de diseño de proceso; estos aspectos de diseño se utilizan comúnmente en este sector. El diseño global de procesos debe enfocarse con detenimiento a través de ingenieros profesionales con experiencia y conocimiento del proceso, así como de su impacto medioambiental y requisitos.

Las escorias, metales y matas se analizan mediante muestras tomadas a intervalos. El análisis en línea de estas materias es una técnica emergente.

Para algunos procesos hay que tener en cuenta reglamentos especiales, como las Directivas Seveso o de Incineración de Residuos.

2.7 Técnicas de Recogida de Gases de Escape

Los pasos de proceso involucrados en la producción de metales no férreos comportan la posible producción de polvo, vapores y otros gases derivados del almacenamiento, manipulación y proceso de materiales. Las técnicas para la prevención de emisiones fugitivas derivadas de las fases de almacenamiento y manipulación se cubren anteriormente en este capítulo, y esta sección se ocupa de loa gases de proceso. Las técnicas utilizadas siguen las prioridades de prevención, minimización y recogida de vapores.

La hermeticidad de los hornos (o el uso de hornos cerrados) en combinación con el control de proceso es la técnica que debe aplicarse siempre que sea posible para prevenir o contener las emisiones de la planta de proceso. La sección que cubre los hornos indica cuándo es posible cerrar herméticamente los hornos y cuándo es posible usar otras técnicas de recogida para conseguir una recogida integral de gases.

Hay otras técnicas disponibles para recoger las emisiones que no son previsibles o no se han contenido [tm 75, Theodore 1994; tm 76, Scapa 1998; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995]. Los gases y vapores que escapan de los procesos se emiten en el área de trabajo y luego escapan al entorno circundante. Por consiguiente, afectan la salud y la seguridad del personal y contribuyen al impacto medioambiental del proceso. Las técnicas de recogida de gases se utilizan para prevenir o minimizar estas emisiones fugitivas.

Las emisiones fugitivas son muy importantes pero son difíciles de medir y cuantificar. Para estimarlos pueden usarse métodos de estimación de volúmenes de ventilación o velocidad de deposición. En un centro de producción se ha utilizado un método fiable a lo largo de varios años [tm 163, Steudtner 1998]. Este método, que se utiliza para medir el volumen y la composición de las emisiones fugitivas de polvo, ha demostrado ser fiable [tm 161, Petersen 1999] y a continuación se detallan los resultados de las mediciones de control realizadas. Los resultados muestran que la magnitud de las emisiones fugitivas puede ser mucho más importante que las emisiones recogidas y eliminadas. Cuanto menores son las emisiones controladas, más significativas son las emisiones fugitivas. Las emisiones fugitivas pueden llegar a duplicar o triplicar el volumen de las emisiones controladas.

Tabla 2.8: Comparación de las emisiones eliminadas y fugitivas de polvo en una fundición de cobre primario. [tm 161, Petersen 1999]

	Emisión de polvo kg/a	
	Antes de la recogida secundaria adicional de gas (1992)	**Después de la recogida secundaria adicional de gas (1996)***
Producción de ánodos t/a	220.000	325.000
Emisiones fugitivas: -		
Total fundición:	66.490	32.200
Línea techo fundición:	56.160	17.020
Emisiones controladas **(Fundición primaria): - Fundición/planta de ácido**	7.990	7.600
Chimenea campanas secundarias	2.547	2.116

Nota. * Emisiones tras una inversión de 10 millones de Euros para mejorar el sistema de captura y tratamiento de gases fugitivos. Energía adicional = 13,6 GWh/a.

También puede usarse técnicas del sistema de detección y medición del alcance de la luz (LIDAR) para medir algunos componentes de las emisiones fugitivas como SO_2 y COVs.

2.7.1 Técnicas aplicadas

El polvo, vapores y gases se recogen mediante sistemas de hornos cerrados, con una envoltura total o parcial, o a través de campanas [tm 75, Theodore 1994]. Los hornos cerrados pueden cargarse desde sistemas herméticos de lanzas o quemadores, a través de electrodos huecos, a través de campanas o toberas, o mediante sistemas que se acoplan herméticamente al horno durante la carga. Las campanas están diseñadas para estar lo más cerca posible de la fuente de emisión al tiempo que dejan espacio para las operaciones de proceso. Las campanas móviles se utilizan en algunas aplicaciones, y algunos procesos utilizan campanas para recoger los vapores primarios y secundarios.

2.7.1.1 Uso de energía

La recogida de gases requiere el movimiento de volúmenes de aire considerables. Esto puede consumir grandes cantidades de energía eléctrica, y los sistemas modernos se basan su diseño en sistemas de captura que aumenten el índice de captura y minimicen el volumen de aire desplazado [tm 124, DFIU Cu 1999]. El diseño del sistema de recogida o de campanas es un factor muy importante, ya que puede mantener la eficacia de captura sin un excesivo consumo de energía en el resto del sistema. Los sistemas herméticos como hornos cerrados permiten alcanzar una eficacia de captura muy elevada.

Se utilizan conductos y ventiladores para transportar los gases recogidos a los procesos de eliminación o tratamiento. La eficacia de la recogida depende de la eficacia de las campanas, la integridad de los conductos y el uso de un buen sistema de control de presión/caudal. Se utilizan ventiladores de velocidad variable para obtener velocidades de extracción adecuadas para cambiar condiciones como el volumen de gas con el mínimo consumo de energía. Los sistemas pueden también ser diseñados teniendo en cuenta las características de la planta a la que se asocian, como la planta de eliminación o la planta de ácido sulfúrico. Se aplica un buen diseño y mantenimiento de los sistemas.

2.7.1.2 Criterios de diseño

Los sistemas de recogida y las velocidades de extracción se diseñan sobre la base de información fiable acerca de las características del material a recoger (tamaño, concentración, etc.), la forma de la nube de polvo en los extremos de la operación y los efectos de los cambios de volumen, temperatura y presión en el sistema.

Se realiza una correcta medición o estimación del volumen de gas, de la temperatura y de la presión, con el fin de asegurar que se mantengan índices de extracción suficientes durante los caudales máximos de gas. Algunas de las características del gas y del polvo son también críticas para un buen diseño y para evitar problemas de abrasión, deposición, corrosión y condensación, por lo que se miden. Otro factor significativo es poder tener acceso a las zonas de llenado o sangrado del horno mientras se mantienen buenos índices de recogida; para ello, en la fase de diseño se aprovecha la experiencia acumulada por los operarios.

2.7.2 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

2.7.2.1 Algunos ejemplos de las técnicas a considerar

Las técnicas a considerar se basan en la aplicación de los principios de buenas prácticas arriba indicados. Una buena práctica se basa en el diseño y mantenimiento profesional de los

sistemas de recogida, así como en la monitorización en línea de las emisiones en el conducto de gas limpio. Los siguientes ejemplos se utilizan para ilustrar una buena práctica, aunque no se trata de una lista exhaustiva y otros principios pueden ser aplicables.

- El uso de hornos cerrados puede contener los gases y evitar las emisiones fugitivas. Los ejemplos son hornos de fundición cerrados, hornos de arco eléctrico cerrados, y la celda de alimentación hermética para la producción de aluminio primario. Los hornos cerrados se basan en velocidades de extracción de gases suficientes para evitar la presurización del horno. La celda de alimentación hermética que se ilustra va normalmente conectada a un sistema de extracción de buen tamaño que proporcione una velocidad de extracción suficiente para evitar el escape de gases durante la apertura de las cubiertas de la célula durante periodos de tiempo cortos, por ejemplo, durante los cambios de ánodos.

Esta técnica es aplicable únicamente a procesos nuevos o ampliamente modificados.

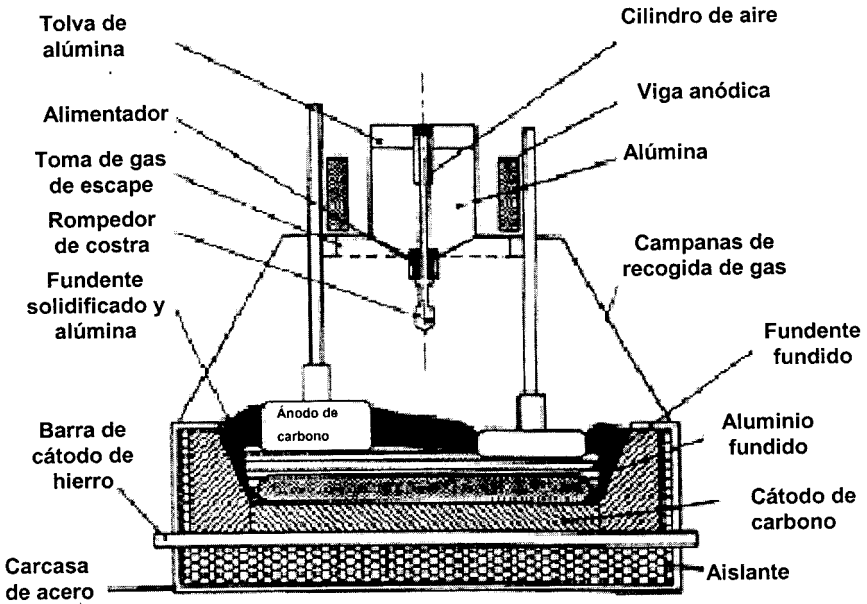


Figura 2.24: Célula de precocción de ánodos para alimentación.

- El uso de sistemas de carga herméticos para los hornos, con el fin de evitar emisiones fugitivas durante la apertura del horno. Ejemplos son el uso de cucharones de carga que quedan herméticamente fijados a la puerta de alimentación del horno, así como el uso de sistemas de carga a través de las campanas. Estas técnicas pueden ser aplicables a algunos procesos nuevos y existentes, particularmente para procesos en discontinuo.

- Una práctica importante establecida para conseguir una buena extracción es el uso de controles automáticos para los registros de humos, de modo que sea posible dirigir el punto de extracción a la fuente de vapores sin utilizar demasiada energía. Los controles permiten el cambio automático del punto de extracción durante las distintas etapas del proceso. Por ejemplo, la carga y el sangrado de los hornos no se producen normalmente al mismo tiempo, por lo que los puntos de carga y sangrado pueden estar diseñados para que estén juntos, de modo que sólo se precise un punto de extracción. El punto de extracción se diseña asimismo para permitir un buen acceso al horno y permitir una buena

velocidad de extracción. Las campanas deben ser de construcción robusta y estar adecuadamente mantenidas.

Un ejemplo de ello es una adaptación de un horno rotatorio corto. La puerta de alimentación y los orificios de sangrado están en el mismo extremo del horno, y la campana de recogida de vapores permite el pleno acceso de una cuchara de escoria y cinta transportadora, siendo también lo bastante robusta para resistir pequeños impactos durante su uso.

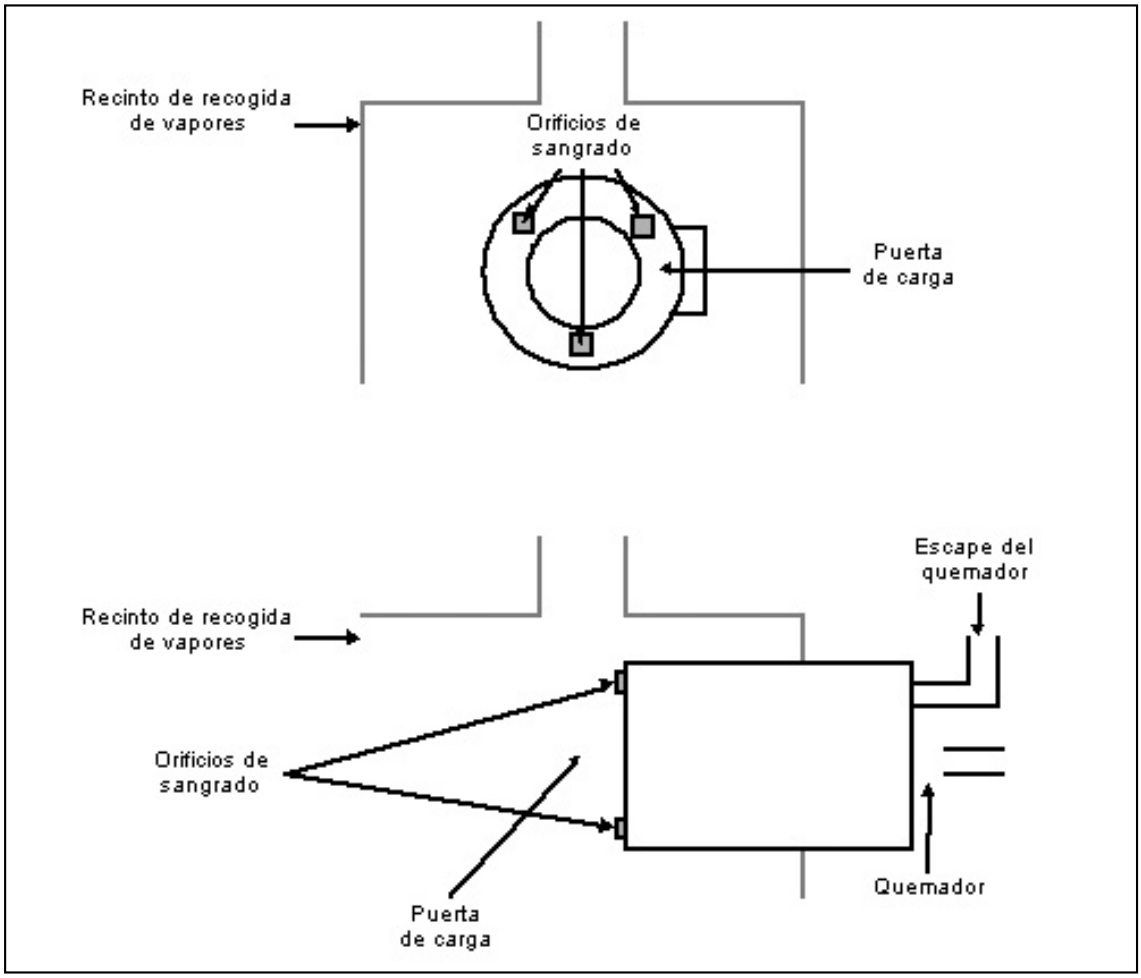


Figura 2.25: Sistema coincidente de carga y sangrado.

Este principio se aplica fácilmente a un horno rotatorio corto, pero también se consigue el principio de dirigir el esfuerzo de extracción a una fuente cambiante de vapores, controlando automáticamente los registros de chimenea para extraer la fuente principal de vapores durante el ciclo operativo, es decir, durante la carga, sangrado, etc.

El horno corto y el TRBC pueden asimismo ser totalmente cerrados.

Estas técnicas pueden ser aplicables a todos los procesos nuevos y existentes, particularmente para procesos en discontinuo.

- Si no se dispone de hornos cerrados, por ejemplo, al modernizar un horno abierto existente, puede usarse el máximo posible de hermeticidad para contener los gases del horno.

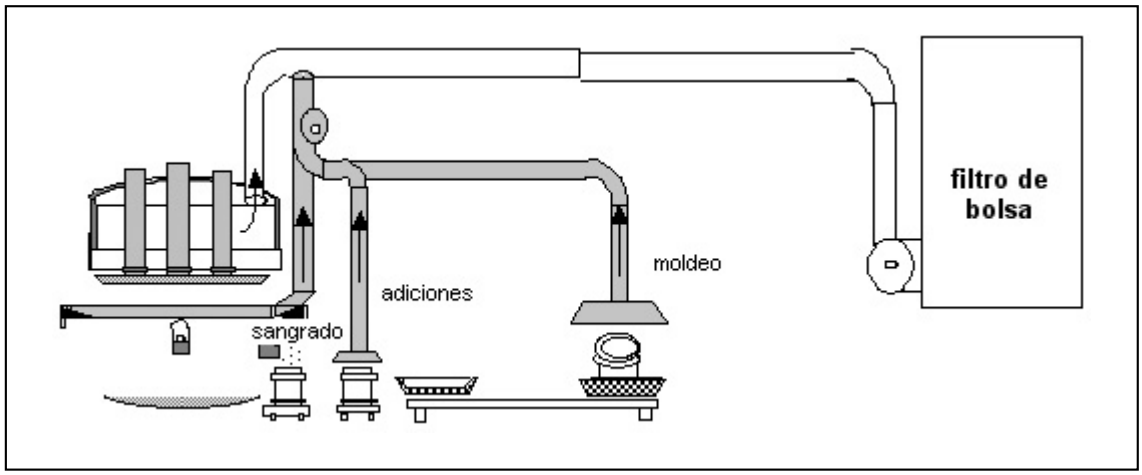


Figura 2.26: Recogida de vapores mediante un cuarto orificio.

Un ejemplo de ello es el uso de un "cuarto orificio" en el techo de un horno de arco eléctrico para extraer los gases de proceso con la mayor eficacia posible, como se muestra en la figura superior.

- El mantenimiento de la campana colectora, de los conductos, del sistema de filtros y del ventilador es vital para asegurar que las velocidades de recogida o extracción se mantengan al nivel deseado. Los desperfectos físicos derivados de colisión o abrasión, así como depósitos en los conductos y en las aspas del ventilador, son algunos de los problemas que pueden encontrarse. Para solucionarlos debe aplicarse un programa de inspección regular y de mantenimiento preventivo. Esta técnica es aplicable a todos los procesos nuevos y existentes.

- La recogida de gases de un convertidor en discontinuo puede ser difícil, ya que las transferencias de las cucharas interfieren con las campanas de recogida. Algunas instalaciones recogen todos los vapores de la línea de techo a expensas de un elevado coste energético. Otra instalación utiliza un sistema de hasta 3 campanas además de la campana principal. Estas campanas pueden estar conectadas a la planta de ácido sulfúrico (campana 1) o al sistema de limpieza secundaria (campanas 2 y 3). Durante las operaciones de llenado y vertido, las campanas individuales se mueven mediante motores a las posiciones que aseguren una máxima eficacia de recogida. El sistema de tratamiento de gas se muestra más adelante en la figura 2.28.

2.7.2.2 Emisiones fugitivas

Para la prevención de emisiones fugitivas se utiliza una buena extracción, según se ilustra arriba, pero algunos sistemas no pueden recoger todos los gases de proceso y éstos se emiten al espacio de trabajo, siendo luego extraídos por los extractores de techo. Estas emisiones son especialmente difíciles de medir, pero hay técnicas que pueden usarse efectivamente.

- Pueden tomarse muestras medioambientales para medir el impacto de las emisiones fugitivas. En este caso se recogen una serie de muestra de aire o de polvo en una serie de puntos determinados mediante un modelo de dispersión atmosférica. Es necesario establecer una correlación con las condiciones atmosféricas para estimas las emisiones.

- Las emisiones fugitivas de una nave, como el recinto de un horno, pueden medirse tomando muestras de los ventiladores de la nave. El caudal de gas de los ventiladores puede estimarse midiendo la diferencia de temperatura entre el caudal de los ventiladores y el aire ambiente [tm 163, Steudtner 1998].

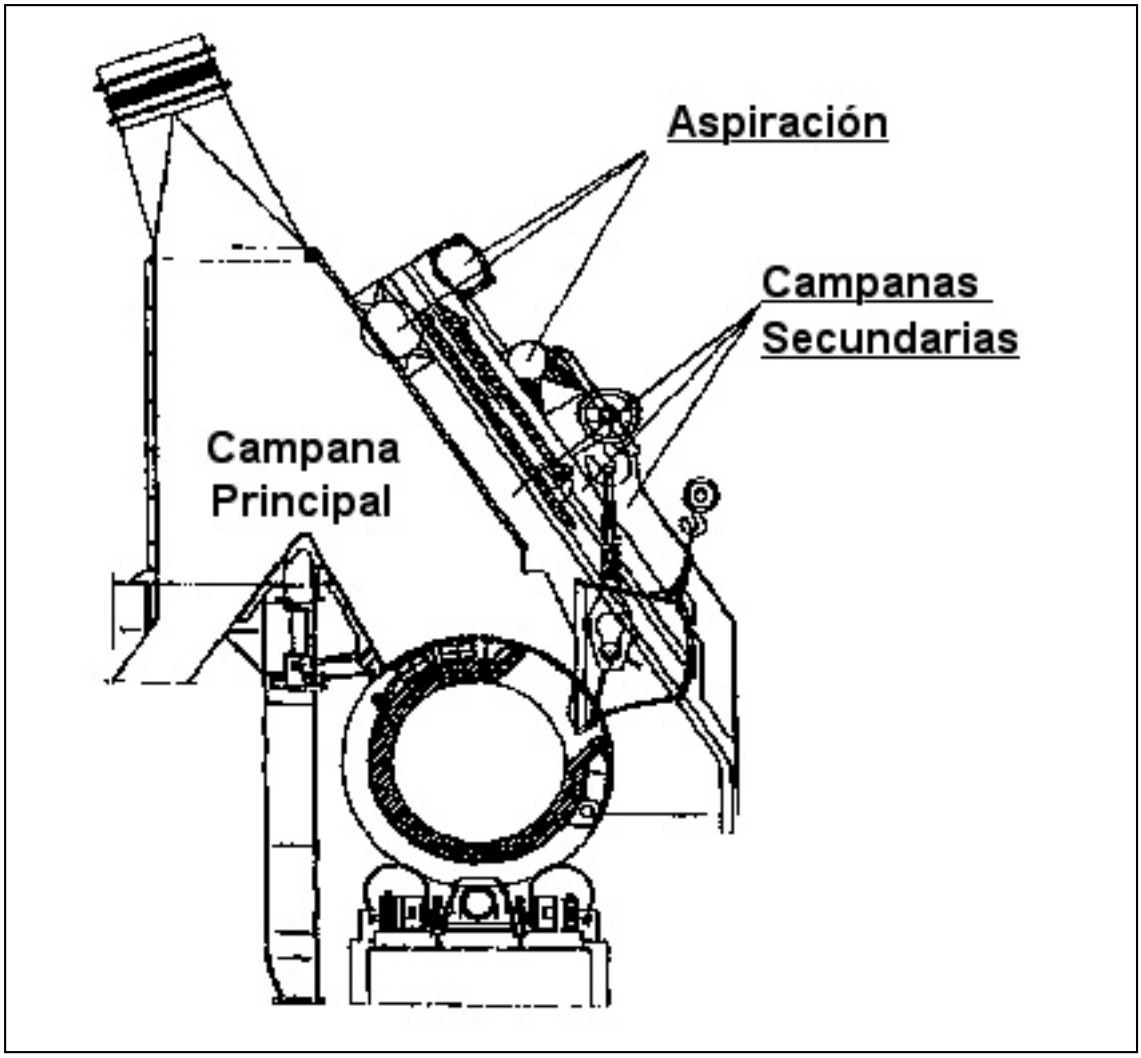


Figura 2.27: Sistema de campanas secundarias para un convertidor [tm 201, Velten 1999].

Como se ha indicado anteriormente, las emisiones fugitivas pueden ser muy significativas, por consiguiente si las emisiones fugitivas no pueden prevenirse o minimizarse a un nivel aceptable, pueden usarse sistemas secundarios de recogida de humo como se ilustra en los ejemplos inferiores.

a) Algunos hornos pueden estar equipados con campanas secundarias con el fin de evitar las emisiones fugitivas durante la carga o el sangrado, como se ha descrito anteriormente. La aspiración de los ventiladores se aplica directamente en la fuente de vapores, con el fin de optimizar la reducción de las emisiones fugitivas.

Alternativamente, el aire podría extraerse a través del ventilador de techo, pero debería manejarse un gran volumen de aire, que tal vez no podría ser limpiado eficazmente con un filtro de tejido. Otras desventajas son un elevado consumo energético, una elevada inversión, más residuos (medios de filtrado usados). Para casos específicos se diseñan sistemas secundarios de recogida de humos. El consumo energético puede minimizarse controlando automáticamente el punto de extracción con registros de chimenea y controles de ventilador, de modo que los sistemas puedan aplicarse donde y cuando se precisen, por ejemplo durante la carga o durante la "apertura" de un convertidor.

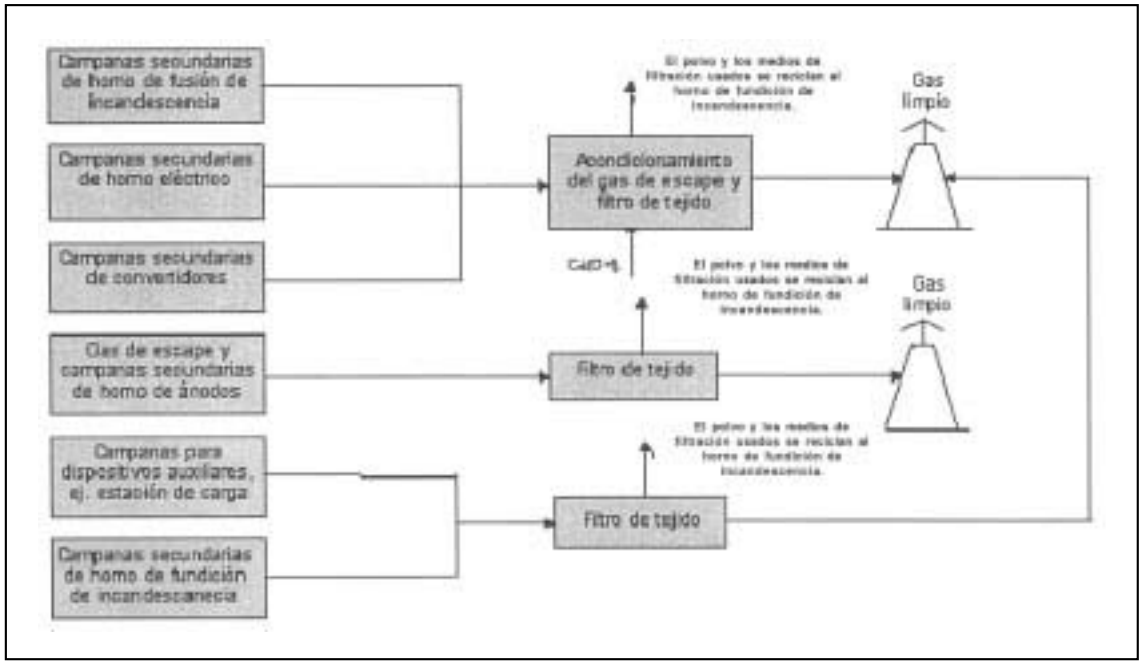


Figura 2.28: Esquema de sistema secundario de recogida de vapores para un proceso de cobre primario [tm 124, DFIU Cu 1999].

En el proceso que se muestra arriba, el caudal de aire se controla a través de un sistema de control de ciclo cerrado reduciendo los registros. Se utilizan ventiladores con control de velocidad con el fin de minimizar el consumo de energía. 580.000 Nm^3/h de gases secundarios son capturados y limpiados en filtros de tejido. Se consumen 13,6 GWh/a de energía eléctrica y se recogen 700 kg de polvo por hora [tm 124, DFIU Cu 1999].

b) El siguiente ejemplo muestra cómo el vapor de sangrado de un alto horno puede ser recogido por un sistema secundario de recogida de vapores.

El equipo de eliminación de polvo está compuesto de varias campanas situadas sobre el orificio de sangrado de un alto horno, el canal principal de moldeo de metal y el dispositivo en el que se vierte el metal líquido en la cuchara de torpedo. El vapor recogido se limpia en un filtro de bolsa separado. El sistema de campanas (visto desde la parte superior del alto horno) se muestra en la figura siguiente.

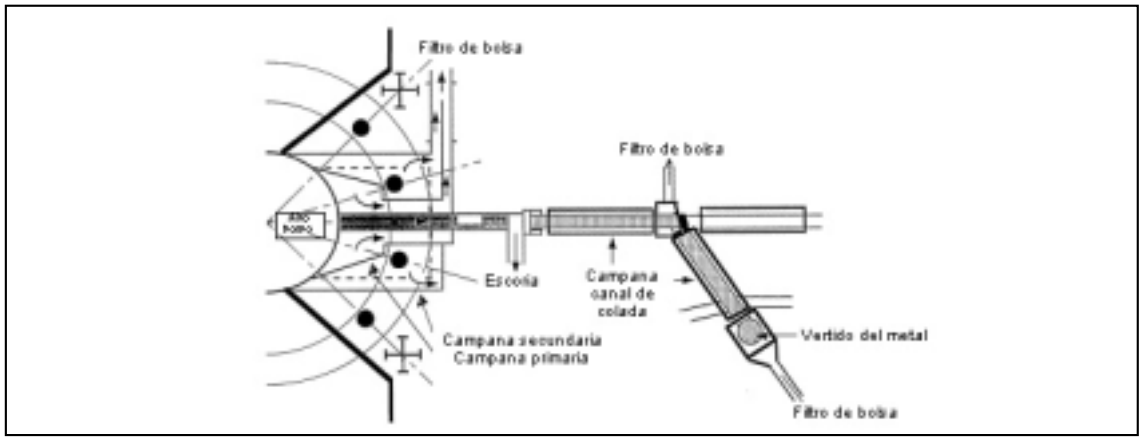


Figura 2.29: Recogida de vapores del orificio de sangrado [tm 195, SFPO 1999].

2.8 Técnicas de Eliminación y Recuperación de Aire

Los gases recogidos se transfieren a la planta de eliminación, en la que se eliminan los contaminantes y se recuperan algunos componentes. El polvo y los gases ácidos se eliminan normalmente, y los componentes metálicos valiosos o tóxicos se recuperan para su uso en otros procesos. El diseño del proceso de eliminación es crítico, y es necesario tener en cuenta factores como la eficacia, la adecuación del método y la carga de entrada y salida del material a recoger.

2.8.1 Técnicas y procesos aplicados

En la industria de metales no férreos se utilizan las siguientes técnicas de eliminación, cuyos principios operativos se indican.

2.8.1.1 Eliminación de polvo y partículas

La industria utiliza las siguientes técnicas para la eliminación de partículas como polvo y vapores de los distintos procesos.

2.8.1.1.1 Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (PE) se utilizan ampliamente en la industria, y pueden operar en una amplia gama de condiciones de temperatura, presión y carga de polvo. No son particularmente sensibles al tamaño de las partículas, y recogen polvo en condiciones húmedas y secas. Sus diseños son resistentes a la corrosión y a la abrasión [tm 75, Theodore 1994; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995: tm 222, VDI 3678 1998].

Un PE consiste en una serie de electrodos de descarga de alto voltaje y los correspondientes electrodos colectores. Las partículas se cargan y posteriormente se separan de la corriente de gas bajo el influjo del campo eléctrico generado entre los electrodos. El campo eléctrico es aplicado entre los electrodos por una corriente continua de baja intensidad y alto voltaje (100 kV). En la práctica, un PE se divide en una serie de zonas discretas (normalmente se usan hasta 5 zonas).

Las partículas se eliminan de la corriente de gas en cuatro etapas:

- aplicación de carga eléctrica al polvo
- colocación del polvo cargado en un campo eléctrico
- captura del polvo en el electrodo colector
- eliminación del polvo de la superficie del electrodo

Los electrodos de descarga deben ser sometidos a agitación o vibración para evitar la acumulación de polvo, y su resistencia mecánica debe ser compatible con la transmisión de la agitación o vibración. La fiabilidad mecánica de los electrodos de descarga y de su armazón de soporte es importante, ya que un solo cable roto puede cortocircuitar todo el campo eléctrico del precipitador.

El rendimiento de un PE sigue la Fórmula Alemana, que relaciona la eficacia con la superficie total de los electrodos colectores, el caudal volumétrico de los gases y la velocidad de migración de las partículas. Por consiguiente, para un polvo dado, la maximización de la superficie de los electrodos colectores es muy importante, por lo que una práctica común es utilizar un amplio espacio entre electrodos. Esta práctica se basa a su vez en un buen diseño y control del rectificador.

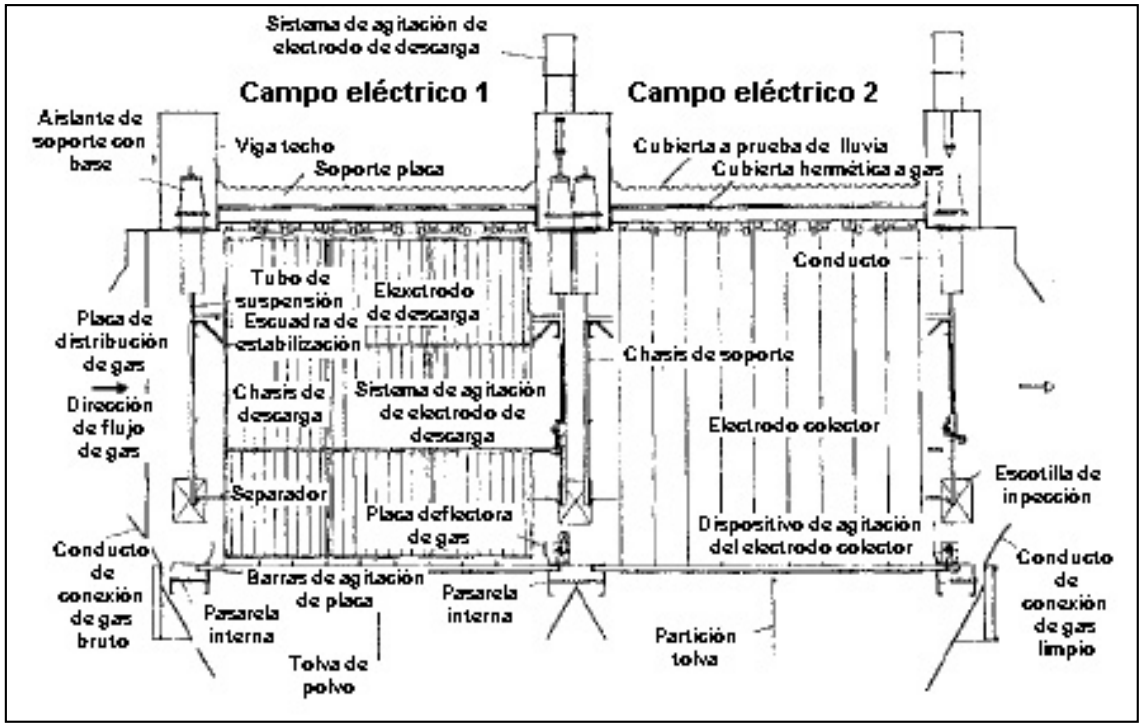


Figura 2.30: Esquema típico de un precipitador electrostático (sólo se muestran dos zonas) [tm 198, Lurgi 1999].

La industria utiliza un buen diseño de rectificador, que incluye el uso de secciones independientes de rectificador para cada zona del PE. Esto permite variar el voltaje aplicado en las zonas de entrada y salida para tener en cuanta la reducción de la carga de polvo hacia la salida y permite operar las zonas con voltajes progresivamente más elevados sin chispas. También se aplica un buen diseño, mediante el uso de sistemas automáticos de control. Estos mantienen un nivel de alto voltaje (AV) óptimo aplicado a los electrodos en una zona partículas sin que se produzcan chispas. Se utiliza un monitor automático para aplicar el voltaje máximo sin que se generen chispas y variando constantemente el AV. El suministro de EV de valor fijo no suele proporcionar una eficacia de recogida óptima.

La resistividad (inverso de la conductividad) del polvo es particularmente importante. Si es demasiado baja, las partículas que llegan al electrodo colector pierden su carga fácilmente y puede producirse el reingreso del polvo. Si el polvo tiene una resistividad demasiado elevada, se forma una capa aislante en el electrodo, lo que impide la descarga normal de la corona y produce una reducción de la eficacia de recogida. La mayoría de polvos tienen una resistividad dentro del rango normal, y la recogida puede mejorarse acondicionando el polvo. Normalmente se utiliza amoníaco y trióxido de azufre. La resistividad también puede disminuirse reduciendo la temperatura del gas o agregando humedad al gas.

El PE normalmente no consigue concentraciones finales de polvo tan bajas como las conseguidas por un filtro de tejido. Para obtener el mejor rendimiento de un precipitador, se optimiza el flujo de gas a través de las unidades para obtener un flujo uniforme y evitar que el gas circule por fuera del campo eléctrico. Un diseño correcto de los conductos de entrada y el uso de dispositivos de distribución de flujo dentro de la boquilla de entrada sirven para conseguir un flujo uniforme a la entrada del precipitador. En estas circunstancias, es posible conseguir emisiones de polvo del orden de 5 - 15 mg/Nm^3.

2.8.1.1.2 Precipitador electrostático húmedo

Los precipitadores electrostáticos húmedos operan según los mismos principios. En este caso, el polvo producido es eliminado por las placas colectoras enjuagándolas con un líquido apropiado, normalmente agua, intermitentemente o mediante pulverización continua. Ofrecen ventajas con ciertos tipos de polvo que se adhieren a las placas convencionales o cuando los componentes de la corriente de gas interfieren con la operación, por ejemplo en el caso de un gas frío y húmedo. Se produce un efluente líquido que precisa ulterior tratamiento.

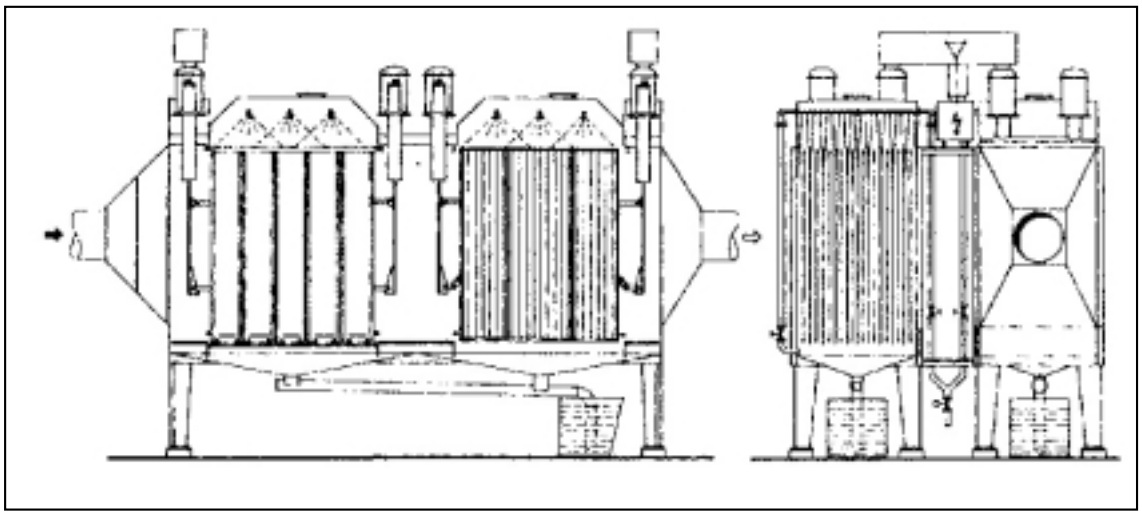


Figura 2.31: Precipitador electrostático húmedo [tm 198, Lurgi 1999].

2.8.1.1.3 Ciclones

Los ciclones se instalaron en muchos de los procesos en los años 80, y todavía se utilizan ampliamente. El ciclón es un dispositivo de limpieza de gas por inercia. El polvo se separa de la corriente de gas cuando se cambia la dirección del flujo de gas y el polvo continua en la dirección original gracias a su inercia y se deposita en una superficie de recogida.

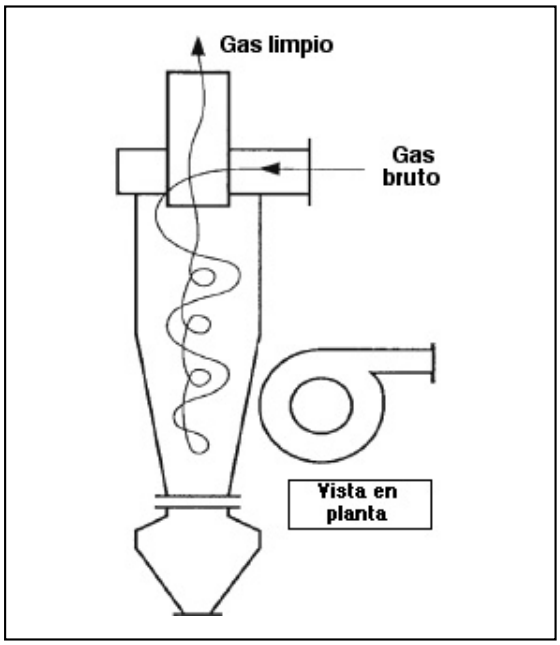


Figura 2.32: Esquema de un ciclón [tm 198, Lurgi 1999].

El gas de entrada se circula por un flujo en espiral. Las fuerzas centrípetas que actúan dentro de la espiral producen el cambio de dirección, y las partículas por encima de una masa crítica se depositan en las paredes del ciclón.

Los ciclones no son normalmente adecuados para controlar las emisiones directamente desde los procesos en este sector industrial. Su eficacia para controlar el polvo fino es demasiado baja para poder tratar de forma eficaz las emisiones de los hornos. La experiencia en su uso ha demostrado que no son capaces de dar respuesta a las exigencias modernas en cuanto a emisiones. No obstante, los ciclones se utilizan de forma eficaz como sistema de recogida primaria en conjunción con otra técnica, particularmente en procesos grandes en los que el ritmo de producción puede variar [tm 75, Theodore 1994; tm 220, VDI 3476 1990].

2.8.1.1.4 Filtros de tejido o de bolsa

Los sistemas de filtro de tejido se utilizan para muchas aplicaciones dentro de este sector industrial, debido a su elevada eficacia para controlar las materias con partículas finas que se producen en las operaciones de fusión [tm 75, Theodore 1994; tm 79, Soud 1995; tm221, VDI 3677 1997]. No obstante, debido a su tendencia a obstruirse en ciertas circunstancias y su sensibilidad al fuego, no son adecuados para todas las aplicaciones. Antes de los filtros de bolsa se utilizan cámaras de sedimentación y enfriamiento, y también calderas de recuperación de calor, para reducir el riesgo de incendios, acondicionar las partículas y recuperar el contenido calórico del gas de escape antes de la eliminación del polvo.

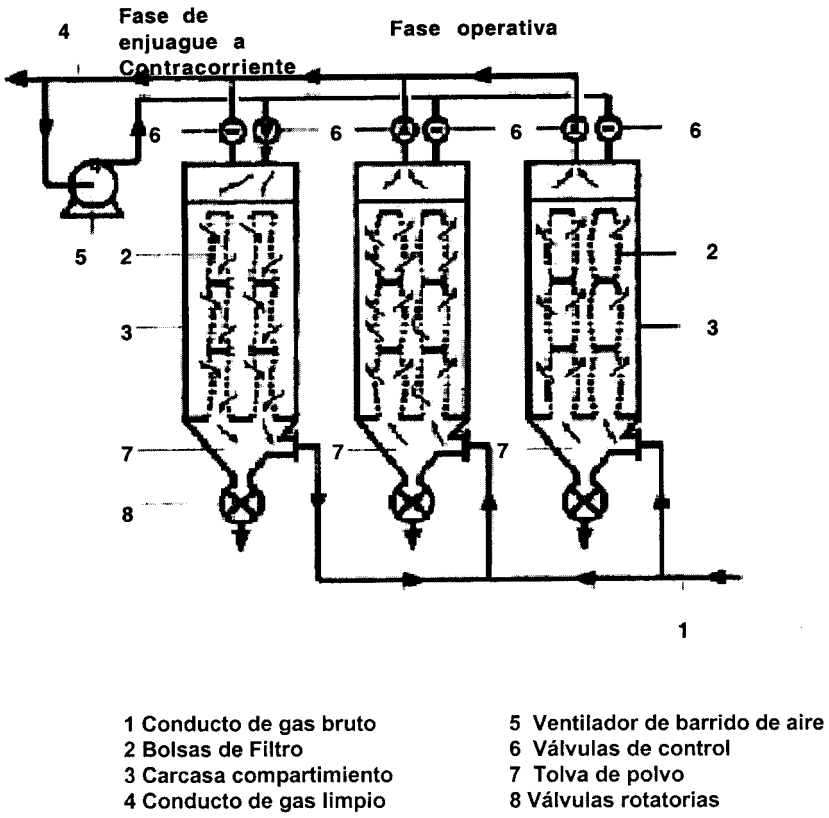


Figura 2.33: Esquema general de un filtro de tejido (con un compartimento en el ciclo de limpieza) [tm 198, Lurgi 1999].

El principio básico de la filtración con tejido es utilizar una membrana de tejido que sea permeable al gas pero retenga el polvo. Las bolsas van normalmente en un soporte metálico, y cada bolsa incorpora un método de cierre en la estructura de la bolsa. Inicialmente, el polvo se deposita en las superficies de las fibras y en la profundidad del tejido pero, al acumularse la capa superficial, esta misma se convierte en el medio de filtración dominante. A medida que se espesa el aglomerado de polvo, la resistencia al flujo de gas aumenta. Por consiguiente, es necesario realizar una limpieza periódica del medio de filtración para controlar la caída de presión a través del filtro. La dirección de flujo del gas a tratar puede ser desde el interior de la bolsa hacia el exterior, o desde el exterior al interior de la bolsa.

Los filtros de tejido se clasifican normalmente de acuerdo con el método mediante el cual se limpia el medio de filtración. La eliminación regular del polvo del filtro es importante con el fin de mantener una buena eficacia de extracción, pero también afecta la vida operativa del filtro.

Los métodos de limpieza más comunes son la circulación inversa de aire, la agitación mecánica, la vibración y los pulsos de aire comprimido. También se utilizan bocinas acústicas para la limpieza de las bolsas. Los mecanismos de limpieza normales no devuelven el tejido a su estado impecable, y las partículas depositadas en las capas profundas del tejido ayudan a reducir el tamaño de poro entre las fibras, lo que permite conseguir elevadas eficacias de eliminación en vapores con partículas por debajo de una micra.

Los filtros de tejido se diseñan basándose en la velocidad de filtración prevista, que se define como la máxima velocidad de gas aceptable que circula a través de una unidad de

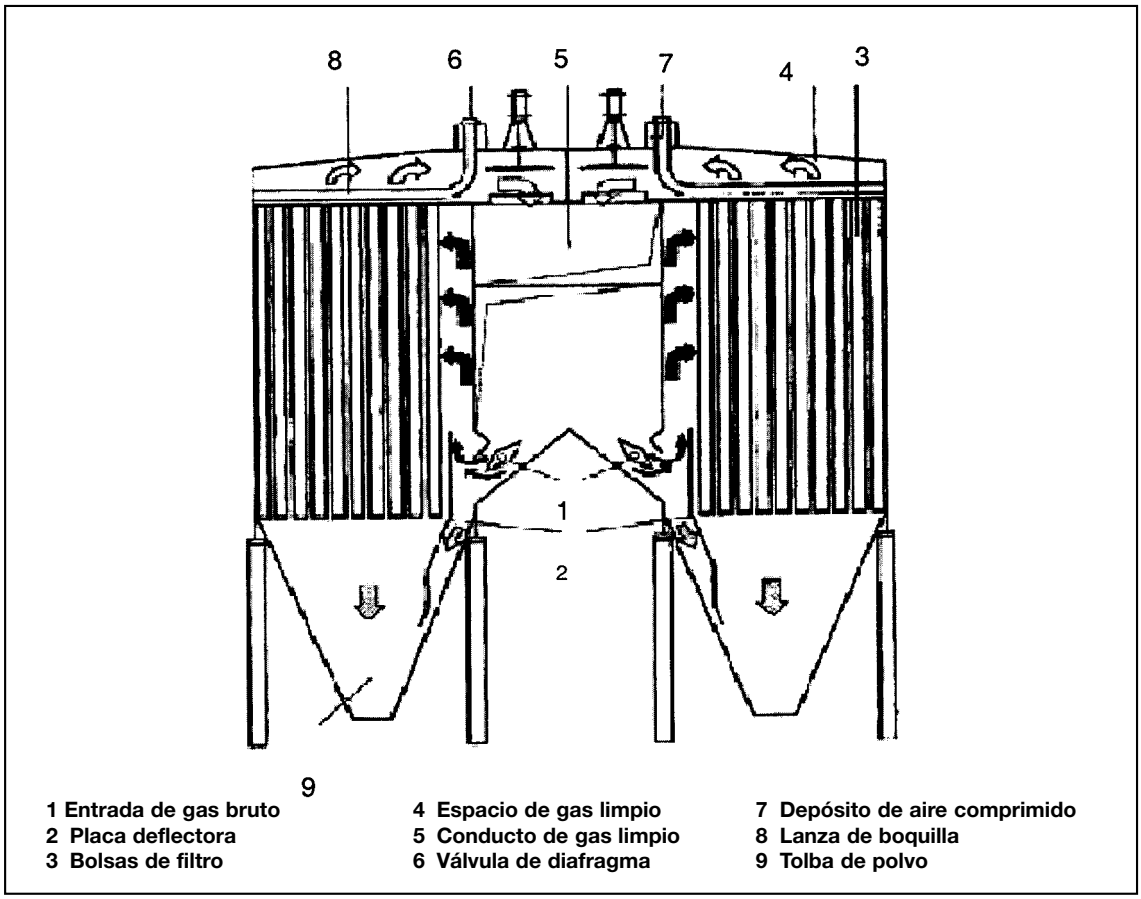


Figura 2.34: Sistema de limpieza por pulsos inversos [tm 198, Lurgi 1999].

superficie de tejido ($m^3/s \div m^2$ - expresada en m/s). Las velocidades de filtración normalmente están entre 0,01 y 0,04 m/s según la aplicación, el tipo de filtro y el tejido.

La selección de tejido tiene en cuenta la composición de los gases, la naturaleza y tamaño de partícula del polvo, el método de limpieza a emplear, la eficacia requerida y factores económicos. La temperatura del gas también se tiene en consideración, junto con el método de enfriamiento del gas, si lo hay, y el punto de rocío resultante del vapor de agua y ácido.

Las características del tejido considerado incluyen su resistencia química, la forma de las fibras y el tipo de hilo, la estructura del tejido, su resistencia a la abrasión y la flexión, la resistencia, la eficacia de recogida, el acabado del tejido y su permeabilidad.

En la tabla siguiente se presenta una comparación de los parámetros más frecuentemente usados de distintos sistemas de filtro [tm 144, Elkem 1998].

Tabla 2.9: Comparación entre distintos sistemas de filtros de bolsa [tm 144, Elkem 1998]

Parámetro	Filtro de chorro Pulsátil (Pulse Jet)	Filtro de membrana con fibra de vidrio	Filtro de fibra de vidrio
Relación aire/tejido	80 –90 m/h	70 – 90 m/h	30 – 35 m/h
Límites de temperatura	200 ºC	280 ºC	280 ºC
Tipo de bolsa	Poliéster/Nomex®	Membrana de Gore-Tex®/fibra de vidrio	Fibra de vidrio
Tamaño de la bolsa	0,126 x 6,0 m.	0,292 x 10 m	0,292 x 10 m
Superficie de tejido por bolsa	2,0 m^2	9,0 m^2	9,0 m^2
Jaula	Sí	No	No
Caída de presión	2,0 kPa	2,0 kPa	2,5 kPa
Duración de la bolsa	Hasta 30 meses	6 –10 años	6 – 10 años

El desgaste de las bolsas de filtro produce una reducción gradual en el rendimiento, que puede medirse. Los daños o el fallo catastrófico de varias bolsas es un peligro cuando se produce corrosión, se filtra material abrasivo o cuando hay peligro de fuego. Los sistemas simples de control en línea, como indicadores de caída de presión o indicadores de polvo sólo dan una indicación general del rendimiento.

Los dispositivos triboeléctricos u ópticos se utilizan para medir la tendencia en el polvo emitido desde las bolsas, con el fin de detectar posibles fallos, y pueden usarse para detectar picos de polvo durante un ciclo de limpieza. Si estas mediciones están integradas en un sistema de limpieza zonal, puede determinarse la zona que contiene las bolsas dañadas y realizar reparaciones locales [tm 126, Robson 1998]. También se utilizan mediciones y alarmas de temperatura.

Existe una serie de distintos diseños de filtros de bolsa con distintos tipos de materiales de filtración; en principio todos ellos consiguen valores de emisiones bajos, o sea emisiones de polvo por debajo de 5 mg/Nm^3. El uso de técnicas de filtración con membrana (filtración superficial) produce además un aumento de la vida útil de las bolsas, un límite de temperatura elevado (hasta 260 ºC) y costes de mantenimiento relativamente bajos. Las bolsas de filtro con membrana consisten en una membrana ultrafino de PTFE expandido laminada sobre un material de soporte. Las partículas de la corriente de gas de escape son capturadas en la superficie de la bolsa. En lugar de formar un aglomerado en el interior o penetrar en el tejido de la bolsa, las partículas son repelidas por la membrana, formando así un aglomerado de menor tamaño. Esta técnica es aplicable a todas las plantas nuevas y existentes, y puede también usarse para la rehabilitación de los filtros de tejido existentes [tm 144, Elkem, 1998].

Los tejidos de filtro sintéticos como Gore-Tex® y Tefaire® (Teflón/Fibra de vidrio) han permitido el uso de filtros de tejido en una amplia gama de aplicaciones y han prolongado su vida útil. El comportamiento de los materiales de filtro modernos en condiciones de altas temperaturas o abrasivas ha mejorado recientemente, y los fabricantes de tejidos pueden ayudar a especificar el material para aplicaciones específicas. Con el diseño correcto y el tipo de polvo adecuado, se consiguen emisiones de polvo muy bajas (< 1 mg/Nm^3), y la mayor vida útil y fiabilidad permiten amortizar el gasto que suponen los tejidos modernos.

Los filtros de bolsa en algunos procesos de ferroaleaciones utilizan filtros a presión con ventiladores en el lado del vapor/gas sucio. Desarrollos recientes utilizan un filtro de aspiración cerrado con ventiladores en el lado del gas limpio. Esta técnica se utiliza en la mayoría de los otros sectores metálicos y combina las ventajas de una limpieza suave de la bolsa, lo que significa una mayor vida de la bolsa, con bajos costes de operación y mantenimiento debido al filtro cerrado y al volumen de gas definido [tm 144, Elkem, 1998].

2.8.1.1.5 Filtros cerámicos y de malla metálica

Existen varios ejemplos en los que se utilizan estos filtros en la aplicación correcta en esta industria [tm 76, Scapa 1998], consiguiéndose eficacias muy elevadas de eliminación de polvo. Se eliminan las partículas finas como las del grupo de MP_{10}.

Los filtros cerámicos de baja densidad operan de forma similar a los filtros de bolsa por lo que respecta a los principios operativos, estructura general y operaciones de limpieza. En lugar bolsas de tejido y sus soportes metálicos, se utilizan elementos rígidos que se asemejan a filtros de bujía. Tienen un alto grado de resistencia térmica y con frecuencia son las limitaciones de la estructura las que determinan el límite superior de temperatura. La expansión del sistema de soporte al aumentar la temperatura es también un factor fundamental , ya que la estanqueidad de los elementos de filtro de la estructura puede verse afectada, produciendo fugas desde la corriente de gas “sucio” a la corriente de gas “limpio”. Los sistemas de detección de fallos en línea se utilizan del mismo modo que los filtros de bolsa.

Los filtros cerámicos están fabricados con aluminosilicatos y pueden ir pre-recubiertos con una serie de materiales para mejorar su resistencia a los agentes químicos o al ácido. Los elementos de filtro son relativamente fáciles de manipular cuando son nuevos, pero se hacen frágiles tras su exposición al calor y por lo tanto pueden romperse durante el mantenimimiento o por intentos violentos de limpiarlos.

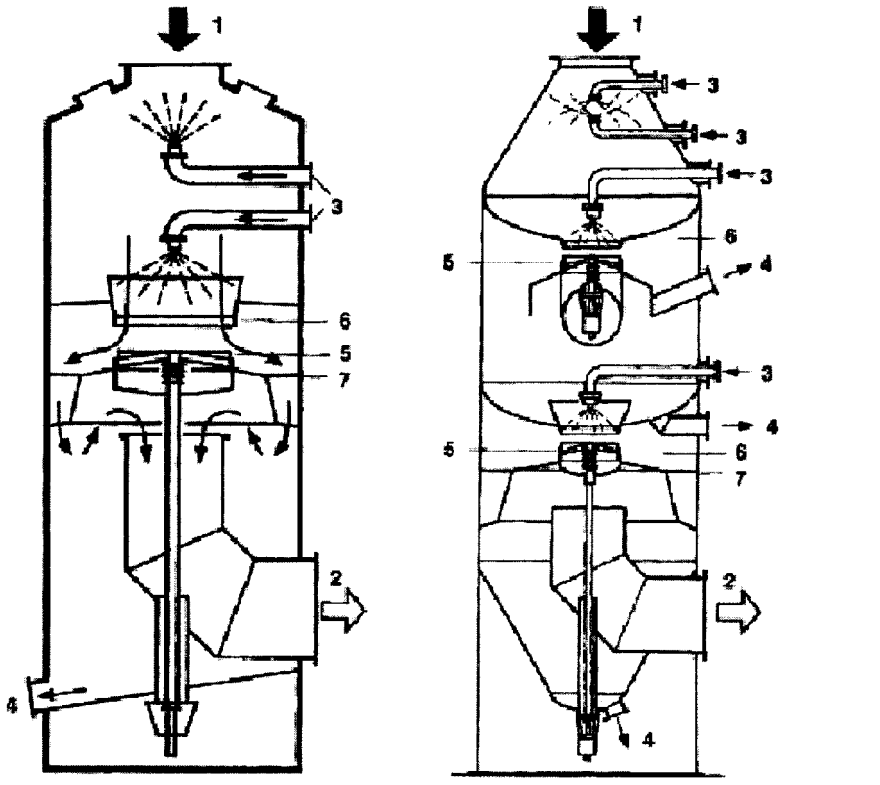
La presencia de polvos “pegajosos” es también un problema potencial, ya que es posible que no puedan ser limpiados del elemento durante el ciclo de limpieza normal y causen un aumento significativo en la caída de presión. El efecto de la temperatura en el material a recoger es por consiguiente un factor importante en el diseño de una planta. Con un correcto diseño y el tipo de polvo apropiado, se consiguen emisiones de polvo muy bajas de hasta 0.1 mg/Nm^3.

Se ha reportado un comportamiento similar a temperaturas elevadas usando un filtro de malla metálica rediseñado. Este tipo de filtro permite el rápido establecimiento de un aglomerado de polvo tras la limpieza, mientras la zona está “fuera de línea”.

2.8.1.1.6 Lavadores húmedos

La recogida de partículas mediante lavado con líquidos se produce según tres mecanismos principales: impacto por inercia, intercepción y difusión. El tamaño de partícula a recoger es un factor importante [tm 75, Theodore 1994; tm 223, VDI 3679 1998], y la capacidad de humidificación del material a recoger puede también ser significativa.

La experiencia demuestra que la eficacia de los lavadores húmedos depende en gran medida de su uso total de energía, en particular de la caída de presión a lo largo de la zona de recogida. Además, siempre que el líquido esté uniformemente distribuido dentro del lavador, caídas de presión similares darán a menudo eficacias similares en el mismo polvo para diseños de lavadores bastante distintos. Así, no es posible diseñar un lavador húmedo con una elevada eficacia sin un alto consumo energético, a menos que el polvo en cuestión sea particularmente fácil de humedecer. Existe una gran variedad de diseños de lavadores de alta energía basados en los principios de flujo radial, chorro, Venturi y de cascada, y los lavadores se aplican a tipos de polvo difíciles de eliminar con otras técnicas. En general, los gases se utilizan luego en otro proceso (ej. como gas de combustión) y no se emiten. También se utilizan en conjunción con PEs húmedos para enfriar y limpiar los gases antes de entrar en contacto con las plantas de ácido sulfúrico y absorber los gases ácidos. Esto se detalla más adelante en el apartado 2.8.1.2.



1. Entrada de gas bruto
2. Salida de gas limpio
3. Entrada de liquido de lavado
4. Desagüe de liquido de lavado
5. Anillo ajustable
6. Difusor
7. Aletas de refrigeración

1. Entrada de gas bruto
2. Salida de gas limpio
3. Entrada de liquido de lavado
4. Desagüe de liquido de lavado
5. Anillo ajustable
6. Difusor
7. Aletas de refrigeración

Figura 2.35: Lavador de flujo radial [tm 198, Lurgi 1999].

Los lavadores húmedos en cascada se utilizan con frecuencia para eliminar el polvo de gases de escape ricos en CO, y el gas se utiliza como gas de alta capacidad calorífica. También se utiliza para tratar los gases de una máquina de sinterización con correa de acero, el polvo es muy abrasivo pero se humedece fácilmente, y se han logrado valores de < 4 mg/Nm^3. El uso de un

lavador permite llevar a cabo el enfriamiento del gas al mismo tiempo que la eliminación de polvo. De lo contrario, la vida del filtro de bolsa se vería gravemente restringida, y el rápido desgaste del tejido produciría un mal rendimiento.

2.8.1.1.7 Sistemas de postcombustión y antorchas

Estos sistemas de combustión se emplean en la industria para oxidar CO, así como material carbonado gaseoso en una corriente de gas [tm 217, VDI 2442 1987; tm 218, VDI 2443 1995; tm 220, VDI 3476 1990]. Se utilizan tres tipos:

- Sistemas de postcombustión de alta temperatura, en los que los gases se calientan normalmente entre 850 ºC y 1.000 ºC durante un mínimo de 0,5 segundos (siempre que no haya componentes clorados), y los resultados pueden confirmar la destrucción del contenido de COVs presente. Los sistemas de postcombustión emplean un sistema de quemador (no necesariamente utilizado en continuo) y pueden emplear un sistema regenerativo para utilizar la energía térmica del gas y de los compuestos carbonados utilizando lechos de soporte refractario. Se necesita un sistema colector para cambiar la dirección del flujo de gas y limpiar el lecho.
- Los incineradores catalíticos, en los que la descomposición tiene lugar en una superficie con catalizador metálico a temperaturas más bajas, normalmente de 350 ºC a 400 ºC.
- Antorchas diseñadas para quemas gases residuales, es decir, el exceso de CO.

Los sistemas de postcombustión destruyen los compuestos orgánicos, incluidas las dioxinas, mediante oxidación térmica y producen polvo, dióxido de carbono, agua, óxidos de azufre y nitrógeno, y otros productos de combustión. Es necesaria una ulterior eliminación para suprimir estos productos.

Los sistemas de postcombustión son particularmente útiles en las operaciones de eliminación de aceite y de recubrimientos, que pueden producir una elevada concentración de componentes orgánicos. La presencia de estos componentes en un horno produce un elevado volumen de productos de combustión y tendría como consecuencia un tiempo de estancia muy corto en un horno y la emisión de gases parcialmente combustionados.

2.8.1.2 Sistemas de lavado de gases

Los gases como NH_3, SO_2, HF, HCl y NO_x se producen en varios procesos. Por ejemplo, el dióxido de azufre se produce durante la fundición, y el fluoruro de hidrógeno se genera durante la electrólisis. Existen técnicas de prevención y reducción disponibles para estos gases [tm 224, VDI 3927 1998]. La reducción de estos gases es a menudo posible mediante control de proceso o fijando el material en una escoria o mata. El uso de quemadores de bajo nivel de NO_x y de aire de combustión por etapas para los hornos y otras plantas de combustión puede evitar la formación de estos gases.

Los componentes orgánicos y dioxinas y algunos componentes metálicos pueden también ser emitidos desde algunos procesos y pueden ser adsorbidos mediante técnicas similares.

Las siguientes técnicas se utilizan para eliminar los componentes gaseosos. En los capítulos específicos se facilita más información.

2.8.1.2.1 Lavado húmedo

Los sistemas de lavado húmedo se utilizan en la industria para eliminar los componentes gaseosos a concentraciones bajas, para eliminar partículas y también para controlar la

temperatura (mediante enfriamiento adiabático). Aunque la tecnología básica para estas aplicaciones es similar, los criterios de diseño para la eliminación de partículas y componentes gaseosos son muy distintas. Los sistemas de lavado húmedo se utilizan frecuentemente para los tres procesos simultáneamente, por lo que su diseño es inevitablemente un compromiso y pueden producirse efectos considerables sobre otros medios como la producción de aguas residuales adicionales, según la aplicación. Algunos procesos utilizados en otras partes del mundo para la eliminación de SO_2 tienen un medio alcalino doble y cal apagada como segundo medio para regenerar el álcali y eliminar el sulfato como yeso, que se vende.

Se utilizan varios medios de lavado, que van desde agua de mar a soluciones alcalinas. La aplicación para la que se utiliza un lavador determina los factores que deberían medirse para controlar el comportamiento. Los parámetros que se utilizan son: caída de presión y caudal de solución de lavado, temperatura, turbidez, conductividad y pH [tm 12, HMIP Zn 1993; tm 14 HMIP Pb 1993]. Existe el potencial de efectos considerables sobre otros medios, que deben ser tenidos en consideración localmente.

2.8.1.1.2 Lavadores secos y semisecos

Las técnicas de adsorción como el lavado seco se utilizan para absorber los gases ácidos y adsorber los componentes metálicos u orgánicos. La cal, el hidróxido magnésico, la caliza, el óxido de zinc y la alúmina se utilizan frecuentemente para ambas aplicaciones, y los lavadores alcalinos dobles se utilizan en todas las partes del mundo. El carbón activado (o coque) se utiliza para eliminar metal (mercurio) y sustancias orgánicas, para lo cual es normalmente más eficaz.

La adsorción se consigue mediante columnas rellenas o inyectando el reactivo en la corriente de gas y utilizando una columna de reacción. Los filtros de bolsa se utilizan con mayor frecuencia al final de la corriente para recoger recoger el medio de lavado parcialmente reaccionado y proporcionar una nueva superficie para que se produzca una nueva adsorción. El medio de lavado puede reciclarse varias veces dentro de la red de lavado para permitir un uso pleno de la capacidad de absorción y de adsorción. En el caso de alúmina y óxido de zinc, se utilizan subsiguientemente en el proceso principal. Los fluoruros absorbidos por alúmina son recuperados por el proceso de electrólisis.

Una variante del lavado seco es el lavado semiseco. En este caso, se inyecta una lechada del reactante (normalmente cal) en el reactor junto con la corriente de gas. El agua se evapora, siempre que la temperatura del gas sea lo bastante alta y los componentes gaseosos reaccionen con las partículas. Las partículas del reactivo reaccionado se eliminan luego de la corriente de gas. El lavado seco es a menudo menos selectivo que el lavado húmedo o semiseco, particularmente con gases menos reactivos como el SO_2. La eficacia del reactante está frecuentemente relacionada con la "reactividad" del reactivo, y los proveedores de cal pueden a menudo producir material de una reactividad apropiada para determinadas aplicaciones.

Cuando estos procesos se utilizan para eliminar SO_2, se conocen como desulfurización del gas de combustión (DGC). Se utilizan para reducir el contenido de SO_2 de los gases de las superficies anódicas y otras fuentes de baja intensidad, así como para el lavado de los gases de salida de una planta de ácido sulfúrico. Se produce yeso, que puede venderse en algunas circunstancias.

2.8.1.3 Sistemas de recuperación de gases

Además del uso de sistemas de lavado húmedos, secos y semisecos para eliminar los componentes gaseosos arriba indicados, la industria hace extenso uso de sistemas de

recuperación para recuperar gases de la corrientes de gases de proceso. El HCl puede absorberse en agua, y el NO_x puede absorberse en agua o en agua oxigenada.

Los siguientes ejemplos se utilizan en la industria para cerrar los ciclos de materiales:

a) Recuperación de ácido clorhídrico: Para los procesos que comportan disolución se utiliza ácido clorhídrico, HCl, en combinación con un exceso de cloro. Utilizando la evaporación y la recogida en agua se obtiene un ácido azeotrópico (en concentraciones por encima del 20% p/p). Este se reutiliza en diversas partes del proceso.

b) Recuperación de ácido nítrico: La plata y el paladio se disuelven frecuentemente en ácido nítrico, HNO_3. Puede capturarse una cantidad considerable de gases de escape con óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) con oxígeno o peróxido de hidrógeno en lavadores especiales en cascada. Los problemas aparecen por el largo tiempo necesario para oxidar pequeñas cantidades de NO y la reducción de la absorción de gas mediante reacciones exotérmicas. Por consiguiente, es necesario un enfriamiento y varios lavadores combinados para alcanzar los valores límite evitando los vapores pardos de la chimenea. El ácido nítrico resultante del primer lavador tiene normalmente concentraciones de alrededor del 45% en peso y puede reutilizarse en diversos procesos.

c) Recuperación de cloro: El cloro se utiliza en procesos húmedos para disolver los metales, así como en etapas de cloración en seco a temperatura elevada para refinarlos. En ambos casos se utilizan sistemas cerrados, por ejemplo, usando tubos en U con agua y células electrolíticas herméticas. Puede recuperarse cloro gas o producir soluciones de hipoclorito. El hipoclorito se utiliza asimismo como agente oxidante en soluciones de lavado para distintos procesos de refinado.

d) Recuperación de amoníaco: La relatividad relativamente baja del cloruro amónico, NH4Cl, en soluciones evaporadas a temperatura ambiente posibilita la reutilización de los precipitados cristalinos de esta sal.

2.8.1.4 Captura de azufre

El azufre presente en las materias primas puede incorporarse en escorias o matas usando reactivos apropiados, y las matas pueden usarse en el proceso. El azufre que no es capturado en la mata o escoria de un proceso de fundición está normalmente presente en forma de SO_2 y puede recuperarse como azufre elemental, SO_2 líquido, yeso o ácido sulfúrico. La presencia de mercados para estos productos influye en la elección del producto final, pero la opción más segura desde el punto de vista medioambiental es producir yeso o azufre elemental en ausencia de salidas fiables para los otros productos. El dióxido de azufre se produce por la tostación y fundición de concentrados de sulfuros y los procesos de conversión asociados. Estos procesos se realizan de modo que se produzca la máxima concentración de dióxido de azufre para mejorar la eficacia de recuperación de azufre. La recuperación de azufre elimina aspectos de efectos sobre otros medios.

Para la recuperación de azufre se hallan disponibles las siguientes técnicas [tm 24, DFIU Sulphur 1996]:

a) Gases con hasta un 1% de dióxido de azufre

El proceso regenerable de Wellman-Lord comporta la reacción de gases diluidos con sulfito sódico y agua para producir bisulfito sódico. De esta solución puede desprenderse dióxido de azufre concentrado y producir dióxido de azufre líquido o fabricar otros productos como azufre.

El lavado con 2,3-dimetilanilina (DMA) (proceso Asarco) puede absorber el dióxido de azufre, que luego se elimina mediante reacción con agua para producir ácido sulfúrico o dióxido de azufre líquido.

Proceso Peracidox, oxidación con peróxido de hidrógeno para producir ácido sulfúrico.

Proceso Sulfácido, oxidación con un catalizador de carbón activo para producir ácido sulfúrico.

Desulfurización de gases de combustión (DGC) en un lavador seco o semiseco con cal para producir yeso. Este sistema se utiliza ampliamente en centrales de energía.

Lavado alcalino doble con absorción de sosa cáustica y precipitación de yeso.

Absorción de alúmina y precipitación de yeso (proceso Dowa).

Precipitación de sulfato magnésico.

b) Gases con concentraciones mayores de dióxido de azufre

i) Absorción de dióxido de azufre en agua fría (ej. agua de mar fría) seguida de desprendimiento al vacío y recuperación como dióxido de azufre líquido. Estos procesos se utilizan en conjunción con una planta de ácido sulfúrico para recuperar dióxido de azufre que no está disuelto. El potencial para la producción de dióxido de azufre líquido depende de la existencia de un mercado local.

ii) Producción de ácido sulfúrico. La producción de ácido sulfúrico quemando azufre para producir dióxido de azufre es un proceso químico bien establecido. Estas instalaciones se benefician de una elevada concentración constante del gas y por consiguiente tienes escasas limitaciones de proceso. Los gases de una instalación de tostación o de fundición no tienen estas características, son más difíciles de operar y es difícil que obtengan el mismo nivel de conversión.

Los gases de fundición del horno se limpian y enfrían, y a veces pueden secarse. El dióxido de azufre del gas es luego convertido a trióxido de azufre en un “proceso por contacto”, y luego los gases se pasan a través de un lecho con un catalizador de pentóxido de vanadio. En ocasiones al catalizador se le adiciona óxido de cesio, que puede mejorar el comportamiento, particularmente cuando la concentración de SO2 es baja y variable o cuando la temperatura es baja. Se utilizan catalizadores mejorados para aumentar la eficacia de conversión en plantas de contacto simple y doble.

En una **planta de contacto simple**, los gases pasan a través de una serie de cuatro o más lechos con catalizadores para obtener una elevada eficacia de conversión. La producción de trióxido de azufre es exotérmica, y si contenido de dióxido de azufre es bastante elevado para generar suficiente calor, los gases se enfrían después de cada pasada. El trióxido de azufre formado se absorbe luego en ácido sulfúrico al 98%, que luego se disuelve para dar ácido sulfúrico. El proceso WSA se deriva de la planta de contacto simple.

La presencia de trióxido de azufre inhibe la conversión de dióxido de azufre, por lo que el **proceso de contacto doble** es el que se utiliza más frecuentemente para conseguir una conversión más eficaz del dióxido de azufre cuando el contenido en dióxido de azufre del gas es suficientemente elevado. En este caso el trióxido de azufre es absorbido tras la tercera o cuarta pasada, permitiendo la conversión de más dióxido de azufre en las pasadas subsiguientes. Esto va seguido de una etapa ulterior de absorción de dióxido de azufre. El uso de una planta de doble contacto aumenta la eficacia de eliminación del dióxido de azufre desde < 98% a > 99,5%. También se ha informado de que el uso de un catalizador dopado con cesio puede aumentar este valor hasta el 99,9%, pero estos datos hacen referencia a un proceso con una elevada concentración uniforme de gas de alimentación con dióxido de azufre [tm 140, Finland Cu 1999].

La eliminación de polvo antes del proceso de contacto es esencial para proteger el catalizador y producir un ácido puro. Esto reduce la concentración de la mayoría de metales, por ejemplo zinc, a niveles aceptables en el ácido que se produce y evita el empobrecimiento del

catalizador. El pretratamiento de la corriente de gas comporta normalmente varias etapas según los contaminantes presentes en la corriente de gas. Las etapas pueden comportar enfriamiento con recuperación de calor, precipitador electrostático caliente, lavado para eliminar mercurio, etc. y un precipitador electrostático húmedo.

El ácido diluido generado en la sección de limpieza de gas contiene normalmente 1 - 50% H_2SO_4. Habrá halogenuros presentes en forma de HCl (10 - 1.000 ppm) y HF (10 - 1.000 ppm incluido H_2SiF_6). El ácido puede asimismo contener metales como cobre, zinc y hierro (individualmente hasta 2.500 ppm), mercurio (hasta 1.900 ppm) y plomo (hasta 50 ppm). El arsénico puede estar presente en niveles de hasta 10.000 ppm. Otros elementos, como aluminio, níquel, cromo, cadmio, bismuto, antimonio, etc. pueden también estar presentes, según los contaminantes presentes en el material de alimentación de la fundición. El ácido diluido estará asimismo saturado de SO_2 (normalmente entre 2.000 y 5.000 ppm según la concentración del SO_2). Este ácido puede descomponerse y pasarse los gases a la planta de ácido, para ser tratados y desechados o utilizados, por ejemplo si hay un proceso de lixiviación cerca.

Cualquier cantidad de NO_x presente en los gases tratados en la planta de ácido sulfúrico es absorbido en el ácido que se produce. Si las concentraciones son elevadas se produce un ácido parduzco que puede que no resulte aceptable para los posibles clientes. El problema es por consiguiente de posibles ventas.

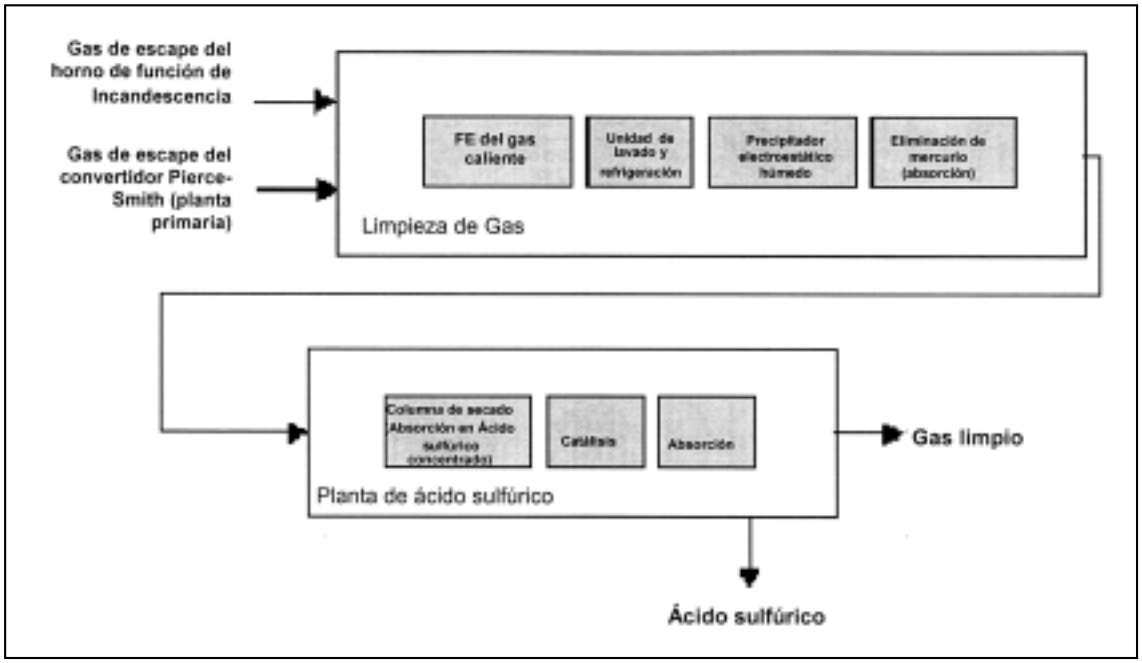


Figura 2.36: Tren típico de limpieza de gas para una planta de ácido sulfúrico.

El proceso de producción de ácido sulfúrico elimina los residuos de polvo y metales, que son transferidos al ácido que se produce. La eliminación del polvo y los metales antes del proceso de contacto significa que no son componentes significativos en los gases emitidos a la atmósfera. Pueden emitirse neblinas ácidas desde la chimenea y se utilizan filtros de bujía cuando es necesario para eliminar estas neblinas. Se reporta que niveles elevados de fluoruros en el gas aumentan la probabilidad de que se produzcan neblinas ácidas [tm 106, Farrell 1998].

Las plantas de ácido sulfúrico se utilizan para eliminar el dióxido de azufre producido durante la sinterización, la tostación y la fundición de una amplia gama de minerales y concentrados de sulfuros. Los metales producidos son cobre, níquel, plomo, zinc y varias corrientes de mezclas de metales.

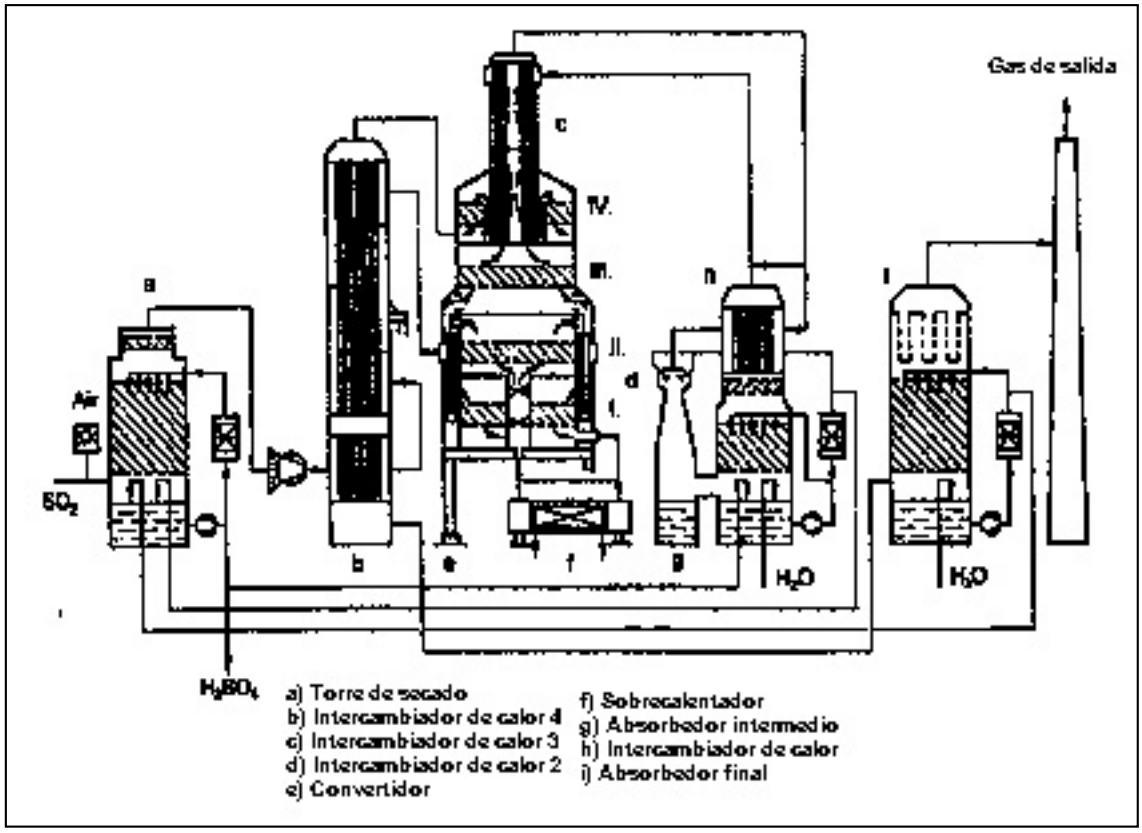


Figura 2.37: Planta típica de Acido Sulfúrico de Doble Absorción.

2.8.1.5 Carbono total y COVs

El carbono total y los COVs se producen por mala combustión y durante distintas operaciones como el desengrase de componentes, los procesos de extracción con disolventes y la "respiración" de los tanques utilizados para almacenar disolventes y combustible. Los disolventes pueden ser aromáticos, alifáticos, orgánicos clorados o a base de agua. La ecotoxicidad varía de un disolvente a otro, lo que se tiene en cuenta a la hora de utilizar el disolvente más benigno y determinar el sistema de eliminación a utilizar en cada centro de producción. La contención se lleva a cabo para evitar las emisiones de disolventes, pudiendo usarse sistemas de mezcla/sedimentación que minimizan el contacto con el aire. Los vapores de disolventes o combustibles deben extraerse y eliminarse de los gases de escape.

Las técnicas utilizadas para eliminar o destruir los COVs son los sistemas de postcombustión y lavadores detallados anteriormente, pudiendo alcanzarse concentraciones < 10mg/Nm^3. También se utilizan biofiltros y reactores[tm 159, VDI 1996]. Se emplean trampas de carbón activado y los sistemas de cristalizador/condensador, que permiten la recuperación del material para su reutilización. En un proceso de extracción con disolvente, el aire de ventilación se enfría y elimina el disolvente hasta un nivel de 0,2 kg por tonelada de cobalto producida. Los COVs también pueden emitirse durante el suministro de disolventes, etc. La devolución por ventilación de los gases desplazados se utiliza para minimizar la emisión de COVs.

2.8.1.6 Dioxinas

Las dioxinas son relevantes en la producción de metales [tm 225, VDI 3460 1997], particularmente en la producción a partir de materias primas secundarias o en procesos que

precisan cloración como la producción electrolítica de magnesio a partir de agua de mar y dolomita. Las dioxinas y sus precursores pueden estar presentes en algunas materias primas y existe la posibilidad de una síntesis de novo en hornos o sistemas de eliminación. Las dioxinas se adsorben fácilmente sobre materia sólida y pueden ser recogidas por todas las partes del medio ambiente en forma de polvo, sólidos de lavador y polvo de filtro.

Esta industria se basa en fuentes de materias primas secundarias procedentes del sector de la chatarra. Aunque hay calidades establecidas de chatarra, las impurezas presentes pueden conducir a la formación de dioxinas durante una combustión incompleta o en una síntesis de novo. La presencia de dioxinas en el polvo de EAF y la presencia de bifenilos policlorados en la chatarra de transformación son posibles fuentes directas de dioxinas.

La presencia de aceites y otras materias orgánicas en la chatarra u otras fuentes de carbono (combustibles parcialmente combustionados y reductores, como coque) puede producir partículas finas de carbón que reaccionan con cloruros inorgánicos o con cloruros de compuestos orgánicos en el rango de temperaturas de 250 a 500 ºC para producir dioxinas. Este proceso se conoce como síntesis de novo y es catalizada por la presencia de metales como cobre o hierro. La preselección o tratamiento del material de entrada para minimizar la cantidad de precursores o materia orgánica es por consiguiente una medida muy importante para evitar la formación de dioxinas.

Aunque las dioxinas se destruyen a alta temperatura (más de 850 ºC) en presencia de oxígeno, el proceso de síntesis de novo es todavía posible, ya que los gases se enfrían dentro de la "ventana de formación". Esta ventana puede estar presente en sistemas de eliminación y en partes más frías del horno, como por ejemplo la zona de alimentación. Se aplica gran cuidado en el diseño de los sistemas de enfriamiento para minimizar el tiempo de estancia en la ventana de formación, con el fin de evitar la síntesis de novo. Debe haber suficiente oxígeno en los gases calientes, pudiendo usarse inyección de oxígeno para asegurar una combustión completa.

Puede inyectarse carbón activado en la corriente de gas donde las dioxinas se adsorben a la superficie. Luego se aplica una filtración de polvo de gran eficacia para eliminar el polvo y las dioxinas. Las dioxinas también pueden adsorberse sobre otras materias con partículas y pueden eliminarse mediante filtración de polvo de alta eficacia. Los polvos recogidos pueden tener altas concentraciones de dioxinas y es posible que deban desecharse o tratarse con cuidado. También hay disponibles sistemas de oxidación catalítica para la destrucción de dioxinas, y se ha informado del uso de filtros de tejido que incorporan una capa catalítica.

Todas estas son técnicas a considerar según la aplicación, todas ellas pueden incorporarse en los procesos existentes. La técnica más eficaz y económicamente viable dependerá del centro específico, de los aspectos de seguridad y de la estabilidad operativa, así como de factores económicos. Pueden conseguirse niveles de emisión mejores de 0,5 ng por metro cúbico TEQ utilizando una o más de estas técnicas para limpiar el lado del gas del sistema. Pueden conseguirse valores inferiores mejores de 0,1 ng por metro cúbico TEQ con una de estas técnicas o una combinación de las mismas.

2.8.1.7 Eliminación de otras impurezas

Además de su interferencia con la recuperación de ácido sulfúrico y dióxido de azufre, otros metales no férreos presentes en los minerales y concentrados tienen un efecto adverso sobre el medio ambiente. Por ello deben eliminarse si no lo han sido previamente. Estos metales también tienen un valor, por lo que se recuperan separadamente del metal que suscita el interés principal. Por consiguiente, se utilizan etapas adicionales de purificación para su eliminación y recuperación, que se reportan en los capítulos de los metales específicos.

2.8.1.7.1 Metales no férreos

Los procesos pirometalúrgicos se utilizan para eliminar las impurezas del metal deseado, volatilizando o reduciendo a escoria otros metales. Por ejemplo, Zn, Bi, Pb, Sn, Cd, As y Ga puede volatilizarse en las condiciones operativas del horno y desprenderse de la fundición en forma de vapor. La elección de temperaturas operativas influencia esta etapa del proceso, y estos óxidos metálicos pueden recogerse utilizando una técnica apropiada de eliminación de polvo. Los metales son luego recogidos del polvo de combustión recogido en distintas formas. También se utilizan hornos de limpieza y de volatilización de escorias para eliminar los metales volátiles que se recogen en forma de polvo de combustión. Estos polvos de combustión y otros residuos constituyen por lo tanto la materia prima para la obtención de una serie de metales.

Los metales volátiles y sus óxidos se encuentran asimismo en polvos y residuos de otros procesos, por ejemplo el polvo de la fabricación de acero. Estos residuos proporcionan la materia prima para otros procesos para recuperar zinc y otros metales volátiles. En estos procesos se utiliza un horno roratorio (Waelz) o un horno de fundición ISA para volatilizar el metal y enriquecer el zinc y el plomo en un óxido mixto que puede recuperarse en otros procesos pirometalúrgicos.

Los tanques y otros equipos utilizados en plantas hidrometalúrgicas son ventilados en su mayoría a la atmósfera para asegurar que el área de trabajo sea segura. Este aire de ventilación puede contener una neblina ácida que contiene compuestos metálicos de la solución. Las técnicas de eliminación incluyen lavadores húmedos y eliminadores de nieblas. Los elementos de eliminación de nieblas se colocan en la corriente de gas en la chimenea de ventilación o en la parte superior de las columnas de refrigeración, y la solución separada revierte al depósito principal.

2.8.1.7.2 Mercurio

El mercurio es volátil a las temperaturas existentes en la mayoría de procesos de eliminación y pueden ser necesarias otras técnicas para su eliminación [tm 26, PARCOM 1996; tm 139, Finland Zn 1999; tm 225, VDI 3460 1997]. En el caso de eliminación de mercurio antes de una planta de ácido sulfúrico, el mercurio residual estará presente en el ácido que se produzca, la especificación del producto es normalmente < 0,1 ppm, lo que equivale a ~ 0,02 mg/Nm^3 en el gas limpio, valor que se obtiene con todos los procesos.

- Proceso Boliden/Norzink. Se basa en un lavador húmedo que utiliza una reacción entre el cloruro mercúrico y el mercurio para dar cloruro mercurioso (calomelano) que precipita de la solución. Este proceso se aplica tras el paso de lavado y enfriamiento en la planta de ácido, por lo que el gas está libre de polvo y SO_3, y la temperatura es de unos 30 ºC. El gas se lava en una columna con relleno con una solución que contiene $HgCl_2$. Este reacciona con el mercurio metálico del gas y lo hace precipitar en forma de calomelano, Hg_2Cl_2. El calomelano se elimina de la solución de lavado circulante y se regenera parcialmente mediante cloro gas a $HgCl_2$, que se recicla luego a la etapa de lavado. El sangrado con productos de mercurio se utiliza para la producción de mercurio o se almacena. El cloruro mercúrico es un compuesto muy tóxico del mercurio, por lo que este proceso se realiza con sumo cuidado.

- Proceso Bolchem. Este paso de proceso se ubica en la planta de ácido, al igual que el proceso Boliden-Norzink, pero la eliminación de efectúa mediante ácido sulfúrico al 99%. Este ácido procede de la parte de absorción de planta de ácido y oxida el mercurio a temperatura ambiente. El ácido resultante, que contiene mercurio, se diluye al 80%, y el mercurio se hace precipitar en forma de sulfuro con tiosulfato. Tras el filtrado del sulfuro

de mercurio, el ácido se devuelve a la absorción. Por consiguiente, en el proceso no se consume ácido.

- Proceso Outokumpu. En este proceso, el mercurio se elimina entes del paso de lavado en la planta de ácido. El gas, a unos 350 ºC, se pasa por una columna rellena en la que se lava a contracorriente con ácido sulfúrico de alrededor del 90% a unos 190 ºC. El ácido se forma in situ a partir del SO_3 del gas. El mercurio precipita en forma de un compuesto de selenio-cloruro. El lodo de mercurio se elimina del ácido enfriado, se filtra y lava y se envía a la producción de mercurio metálico. Parte del ácido es luego reciclado al paso de lavado.

- Proceso con Tiocianato Sódico. Este proceso se utiliza en la tostación del zinc. El SO_3 gas se lava con una solución de tiocianato sódico, y el Hg se elimina en forma de sulfuro. El tiocianato sódico se regenera.

$$3Hg + 8SCN^- + 4\ H + + SO_2 => 2[Hg(SCN)_4]^{2-} + HgS + 2H_2O$$

- Filtro de Carbón Activado. Se emplea un filtro de adsorción que utiliza carbón activado para eliminar vapor de mercurio de la corriente de gas.

Se hallan disponibles dos procesos para reducir el contenido de mercurio en el ácido sulfúrico producido durante la producción de metales no férreos.

- Proceso de Intercambio Iónico Superlig. Este proceso se sirve del intercambio iónico para eliminar el mercurio del ácido producido y consigue una concentración de mercurio < 0,5 ppm.

- Se agrega yoduro potásico al ácido, que debe tener una concentración mínima del 93%, a una temperatura de alrededor de 0 ºC. De este modo precipita yoduro de mercurio, HgI_2.

Los procesos Norzink y Outokumpu son los más comúnmente utilizados, pero se han señalado otros procesos [tm 26, PARCOM 1996]:

- Lavador de Selenio: Se basa asimismo en un lavador húmedo y utiliza la reacción entre el selenio amorfo en ácido sulfúrico y el mercurio para eliminar altas concentraciones de mercurio vapor.

- Filtro de Selenio: Proceso de lavado seco que utiliza selenio amorfo que reacciona con vapor de mercurio para formar seleniuro de mercurio.

- Proceso con Sulfuro de Plomo: Proceso de lavado seco con nódulos de sulfuro de plomo como medio de eliminación de mercurio de la corriente de gas.

2.8.1.8 Uso de enriquecimiento con oxígeno en procesos de combustión

Los sistemas de combustión/oxidación utilizados en la producción de metales no férreos incluyen a menudo el uso de oxígeno puro directamente o el enriquecimiento con oxígeno del aire del horno. Este enriquecimiento se utiliza para permitir la oxidación autotérmica de los minerales a base de sulfuros, para aumentar la capacidad o velocidad de fusión de hornos particulares y para crear zonas discretas ricas en oxígeno en un horno, con el fin de permitir una combustión completa separadamente de una zona reductora.

El oxígeno puede conseguir las siguientes mejoras [tm 125, ETSU 1994]:

- El aumento en el calor liberado en el cuerpo del horno, que permite un aumento en la capacidad o velocidad de fusión. La capacidad de operar algunos procesos

autotérmicamente y variar el grado de enriquecimiento con oxígeno "en línea" para controlar el proceso metalúrgico y prevenir emisiones.

- Una reducción considerable en el volumen de los gases de proceso producidos, ya que se reduce el contenido en nitrógeno. Esto permite una reducción significativa en el tamaño de los conductos y sistemas de eliminación posteriores, y evita la pérdida de energía que supone el calentamiento del nitrógeno.
- Un aumento en la concentración de dióxido de azufre (u otros productos) en los gases de proceso, lo que permite que los procesos de conversión y recuperación sean más eficaces sin el uso de catalizadores especiales.
- El uso de oxígeno puro en un quemador produce una reducción de la presión parcial de oxígeno en la llama y por consiguiente puede reducirse la formación térmica de NOx. Esto puede que no sea así con enriquecimiento de oxígeno en el quemador o en sus proximidades, ya que la mayor temperatura del gas puede favorecer la formación térmica de NOx. En el último caso, puede agregarse oxígeno después del quemador para reducir este efecto y mantener la mejora en la velocidad de fusión.
- La producción de oxígeno puro in situ está asociada con la producción de nitrógeno gas separado del aire [tm 127, ETSU 1994]. Este se usa ocasionalmente para requisitos de gas inerte in situ. Los gases inertes se utilizan para sistemas de eliminación cuando hay presentes materiales pirofóricos (ej. concentrados secos de Cu), para el desgasificado de metal fundido, para zonas de enfriamiento de escorias y para el control de vapores de las operaciones de sangrado y vertido.
- La inyección de oxígeno en puntos discretos del horno después del quemador principal permite controlar la temperatura y las condiciones de oxidación de forma aislada de las operaciones principales del horno. Esto permite aumentar la velocidad de fusión sin un aumento inaceptable de temperatura. Un ejemplo de esto es la disposición de una zona de postcombustión integral en un alto horno.

2.8.1.9 Técnicas de control de proceso para equipos de recogida y eliminación

Las operaciones y el control de procesos se utilizan ampliamente en este sector. Se emplean las siguientes técnicas:

- Los sistemas de medición de reactivos se utilizan ampliamente.
- También se utiliza el control por microprocesador de la alimentación de reactivos y de rendimiento de la planta. Para ello se emplea el control en línea de temperatura, caída de presión, partículas u otros contaminantes emitidos, intensidad y voltaje de los PEs y caudal y pH de las soluciones de lavado. También se dispone de alarmas para indicar los problemas operativos que puedan surgir.
- Los operarios reciben formación y son evaluados en el uso de las instrucciones de operación y el uso de las modernas técnicas de control descritas.
- Se optimizan los niveles de supervisión para aprovechar lo anterior y mantener la responsabilidad de los operarios.
- Se utilizan sistemas de gestión y calidad medioambiental.
- Se utilizan sistemas de mantenimiento sólidos. Cada vez más se dispone de personal de mantenimiento especializado que forma parte de equipos de operarios que complementan a los equipos especializados en mantenimiento.

2.8.2 Niveles actuales de emisión y consumo

Los principales datos de emisión y consumo para HF, HCl, COVs, dioxinas, NOx y CO se encuentran en los capítulos específicos de los metales, pero las emisiones obtenidas se indican en la tabla siguiente para una serie de sistemas de eliminación y tratamiento.

Tabla 2.10: Ejemplo de emisiones actuales de algunas aplicaciones de eliminación de polvo (mg de polvo/Nm³)

Técnica	Tamaño de partícula um.	Eficacia de recogida en % a 1_m.	Temperatura Operativa Máxima °C.	Rango de Emisiones Obtenible mg/Nm³	Comentarios
PE caliente	< 0,1	> 99 según el diseño	450	< 5-15 (Pre-eliminación > 50)	4 o 5 zonas. Su aplicación habitual es pre-eliminación.
PE húmedo	0,01	< 99	80	< 1 - 5 Opticamente limpio	PE con 2 zonas en serie. Principalmente precipitación de neblinas.
Ciclón	10	40	1100	100 - 300	Particulas gruesas. Se usa para asistir otros métodos.
Filtro de Tejido	0,01	> 99,5	220	< 1 - 5	Buen resultado con el tipo de polvo adecuado.
Filtro Cerámico	0,001	99,5	900	0,1 - 1	Muy buen resultado con el tipo de polvo adecuado.
Lavador Húmedo	1 - 3	> 80 - 99	Entrada 1000 Salida 80	< 4 - 50	Buen resultado con el tipo de polvo adecuado. Reducción de gases ácidos.

Tabla 2.11: Ejemplo de la concentración de los principales componentes del gas limpio de una planta de ácido sulfúrico [tm 124, DFIU Cu 1999]

Sustancia	Unidad	Valor medido
SO_x (comoSO_2)	mg/Nm³	100 – 1100
SO_3	mg/Nm³	20 – 40
NO_x (como NO_2)	mg/Nm³	20 – 45
Cl- (como HCl)	mg/Nm³	2 – 7
F- (como HF)	mg/Nm³	1 – 4
Cd	mg/Nm³	0,001 - 0,02
Hg	mg/Nm³	0,001 - 0,07
Tl	mg/Nm³	0,001 - 0,02
As	mg/Nm³	< 0,01 - 0,02
Se	mg/Nm³	< 0,01 - 0,02
Sb	mg/Nm³	< 0,01 - 0,5
Pb	mg/Nm³	< 0,01 - 0,5
Cu	mg/Nm³	< 0,01 - 0,5
PCDD/PCDF	ng TEQ/m³	0,001 - 0,01

Gases de horno flash y Convertidor Smith.
Entrada 290.000Nm³/h, SO_2 6 - 8.4%, conversión > 99.6 %, producción de 2.000 t/d ácido.

Tabla 2.12: Ejemplo del comportamiento de algunas plantas de ácido sulfúrico existentes

Método	% SO_2 Entrada	Salida de SO_2 mg/Nm^3	Notas
Doble Contacto – 4 Pasadas	> 5%	450	Conversión > 99,5%
Contacto Simple – Dopaje con Cs_2O en la pasada final	< 3%	750	Conversión > 99% Entrada con nivel de SO_2 bajo/variable
Contacto Simple – Dopaje con Cs_2O + Condensador WSA.	< 3%	850 (300 ppm)	Conversión > 99%
Doble Contacto – 5 Pasadas	15%	500 - 1000	Conversión 99,8% Entrada con nivel de SO_2 muy alto
Doble Contacto – 5 pasadas Dopaje del catalizador con Cs_2O, gas de alimentación con alto contenido en O_2	14%	< 285 (100 ppm)	Conversión 99,9%. Entrada con nivel de SO_2 muy alto y constante

2.8.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de las emisiones y residuos, así como técnicas para la reducción del consumo global de energía. Todas ellas están disponibles comercialmente. Se facilitan ejemplos para demostrar las técnicas, que ilustran un alto nivel de comportamiento medioambiental. Las técnicas que se dan en los ejemplos dependen de la información facilitada por la industria, los Estados Miembros Europeos y la Oficina Europea de PCIC.

2.8.3.1 Principios generales

La elección y diseño de una técnica de eliminación adecuada es particularmente importante. Existen varias técnicas y aunque pueda parecer que algunas ofrecen un rendimiento muy elevado, pueden surgir problemas a menos que se tenga plena consideración de características como la carga y la naturaleza de los gases, del polvo y de otros componentes. Por ejemplo, el filtro de tejido con materiales modernos se considera que ofrece un mejor comportamiento medioambiental que otras técnicas para la eliminación del polvo, aunque no puede considerarse aplicable universalmente debido a problemas de adherencia y abrasión con algunos tipo de polvo. Estos aspectos son específicos de cada centro y de cada material, y el operario debe tener estos factores en consideración en un proyecto de diseño profesional.

El volumen, presión, temperatura y contenido en humedad del gas son parámetros importantes y tienen gran importancia en las técnicas o combinación de técnicas utilizadas. En particular, el punto de rocío se verá afectado por todos estos parámetros, y sus variaciones a lo largo de un ciclo de producción deben tenerse en consideración.

La caracterización de la naturaleza del polvo o del vapor es muy importante para identificar cualquier propiedad inusual (higroscópico, pirofórico, adherente, abrasivo, etc.). El tamaño y la forma de las partículas, su capacidad de absorción de agua y la densidad del material son también factores para optimizar la elección de la técnica. La concentración del polvo y su variabilidad deben también ser tenidas en consideración a la hora de producir un diseño robusto y fiable. Estos aspectos se discuten junto con otros en las secciones sobre técnicas a considerar para los 10 grupos de metales si la variación en las características del polvo es relevante.

Muchos operarios han observado que el rendimiento puede deteriorarse con el tiempo, ya que el equipo se desgasta y se requiere mantenimiento. Deben usarse sistemas modernos para controlar continuamente el rendimiento mediante la medición directa de los gases emitidos (por ejemplo, polvo, CO, SO_2). Como alternativa pueden medirse los parámetros de control críticos. Deben incorporarse sistemas de alarma a estos sistemas.

2.8.3.2 Eliminación de partículas

2.8.3.2.1 Precipitadores electrostáticos

Los PEs correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar [tm 75, Theodore 1994; tm 78, IEA 1997; tm 79, Soud 1995: tm 222, VDI 3678 1998]. Los precipitadores electrostáticos en caliente se utilizan como etapa de limpieza previa antes de la eliminación del dióxido de azufre. Los precipitadores electrostáticos húmedos son particularmente aplicables para gases húmedos como los de los sistemas de granulación o como dispositivo de eliminación final. Por consiguiente, para estas aplicaciones se requieren distintas características, lo que afecta a los parámetros de diseño como la magnitud y el número de campos, así como el método de limpieza.

Las siguientes características se consideran importantes:

- El uso de un número adecuado de campos, el número depende del contenido de polvo residual, de la resistividad del polvo y de criterios de diseño como la velocidad del gas y la distribución y diseño de los electrodos. El uso de cuatro o más campos se considera generalmente como una etapa de eliminación final.
- El uso de materiales de construcción apropiados para el material manipulado.
- La precarga, la excitación con pulsos y el uso de fuentes de alimentación de polaridad alterna deben tenerse en consideración.
- Los PEs húmedos o los PEs de electrodos móviles pueden usarse para polvos difíciles o gases húmedos.

Estas características anteriores pueden aplicarse sólo a PEs nuevos.

- El acondicionamiento del gas, el uso de una buena distribución del caudal de gas y del polvo, el uso de agitación en la desconexión, el control automático (por microprocesador) del sistema de alimentación para cada campo son otras de las características que pueden incorporarse.

Estas características pueden aplicarse a la mayoría de instalaciones existentes.

2.8.3.2.2 Filtros de tejido o de bolsa

Los filtros que están correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar [tm 75, Theodore 1994; tm 79, Soud 1995; tm221, VDI 3677 1997]. Incorporan las siguientes características:

- Debe prestarse atención particular a la elección del material de filtro y a la fiabilidad del sistema de soporte y de cierre. Debe practicarse un buen mantenimiento. Los materiales de filtro modernos son generalmente más robustos y tienen una vida más larga. El coste adicional de los materiales modernos se ve sobradamente compensado por la vida adicional en la mayoría de los casos.

- La adición de cal u otros reactantes (ej. carbón activado) para capturar los componentes gaseosos como SO_x o para eliminar dioxinas.
- Una temperatura operativa por encima del punto de rocío del gas. A temperaturas operativas más elevadas se utilizan bolsas y soportes termorresistentes.
- El control continuo del polvo mediante dispositivos de sacudida del polvo, ópticos o triboeléctricos para detectar fallos en la bolsa del filtro. El dispositivo debe interaccionar si es posible con el sistema de limpieza del filtro, de modo que puedan detectarse las secciones individuales que contienen bolsas desgastadas o dañadas.
- El uso de enfriamiento de gases y arresta-chispas cuando se a necesario, los ciclones se consideran apropiados como arresta-chispas. La mayoría de filtros modernos están dispuestos en compartimentos múltiples, y los compartimentos dañados pueden aislarse en caso necesario.
- La medición de temperatura y la detección de chispas, pudiendo aplicarse sistemas de gas inerte o agregarse materiales inertes (ej. cal) al gas de escape cuando haya peligro de inflamación.
- Puede medirse la caída de presión para controlar el mecanismo de limpieza.

Todas estas técnicas son adecuadas para procesos nuevos. También pueden ser aplicables a los filtros de tejido existentes y pueden incorporarse a sistemas ya existentes. En particular, el sistema de cierre de las bolsas puede mejorarse durante los periodos de mantenimiento anual, y las bolsas de filtración pueden cambiarse por tejidos más modernos durante el programa normal de sustitución, pudiendo además reducir costes futuros.

2.8.3.2.3 Filtros cerámicos

Los filtros correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar [tm 79, Soud 1995]. Pueden incorporar las características siguientes:

- Debe prestarse particular atención a la elección y a la fiabilidad de los sistemas de carcasa, de soporte y de cierre.
- El uso de carcasas y soportes termorresistentes.
- El control continuo del polvo mediante dispositivos de sacudida del polvo, ópticos o triboeléctricos para detectar fallos en el filtro. El dispositivo debe interaccionar si es posible con el sistema de limpieza del filtro, de modo que puedan detectarse las secciones individuales que contienen elementos desgastados o dañados.
- Acondicionamiento del gas cuando sea necesario.
- Puede medirse la caída de presión para controlar el mecanismo de limpieza.

Todas estas técnicas son adecuadas para procesos nuevos. También pueden ser aplicables a los filtros cerámicos existentes y pueden incorporarse a sistemas ya existentes. En particular, el sistema de cierre puede mejorarse durante los periodos de mantenimiento normal.

2.8.3.2.4 Lavadores húmedos

Los lavadores correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar cuando la naturaleza del polvo o el gas impide el uso de otras técnicas [tm 79, Soud 1995] o cuando el polvo es particularmente apropiado para su eliminación en un lavador. Su uso puede también considerarse cuando deban eliminarse gases simultáneamente con

polvo o cuando formen parte de una cadena de técnicas de eliminación, por ejemplo en la eliminación de polvo previa a una planta de ácido sulfúrico. Debe aplicarse suficiente energía para asegurar la humidificación e intercepción de las partículas.

Los lavadores húmedos deben incorporar un sistema de control de caída de presión, del caudal de solución y (si se están eliminando gases ácidos) de pH. Los gases lavados deben salir del lavador para pasar a un eliminador de neblinas.

Estas características de control de los lavadores pueden aplicarse a la mayoría de instalaciones existentes.

2.8.3.2.5 Sistemas de postcombustión y antorchas

Las instalaciones correctamente diseñadas, construidas y dimensionadas para la aplicación son técnicas para considerar la eliminación de COVs, dioxinas, partículas orgánicas o de carbono o gases combustibles como CO o H_2. Siempre que sea posible debe utilizarse recuperación de calor. Los principales requisitos para una combustión eficaz en un sistema de postcombustión son:

- El tiempo de estancia en la cámara de postcombustión o sistema regenerativo debe ser suficientemente largo y con presencia de suficiente oxígeno para asegurar una combustión completa. Una eficacia de destrucción del 99% requiere normalmente un tiempo de estancia de 2 segundos a la temperatura correspondiente, dependiendo de la presencia de compuestos clorados. Menores temperaturas y tiempos de estancia pueden también producir la destrucción completa de los COVs y dioxinas, pero esto debe demostrarse a nivel local en condiciones operativas reales. Los gases deben ser enfriados rápidamente en el margen de temperaturas de reformación de dioxinas. Es necesario que haya turbulencia para que haya uns suficiente transferencia de calor y de masa en la zona de combustión, y para evitar los "puntos fríos". Esto se consigue normalmente utilizando quemadores que generan una llama de combustión vorticial, e incorporando deflectores en la cámara de combustión.

- Una temperatura operativa de 200 °C - 400 °C por encima de la temperatura de inflamación espontánea de la sustancia más estable, las temperaturas operativas mínimas son de 850 ºC. Si la corriente de gas contiene sustancias cloradas, las temperaturas deben aumentarse hasta 1.100 °C – 1.200 °C, y se requiere un rápido enfriamiento del gas de combustión para evitar la refomación de dioxinas.

- Las unidades catalíticas operan a temperaturas más bajas, y las antorchas requieren turbulencia, aire, y una fuente de ignición. Si es necesario, puede agregarse combustible adicional.

- Los quemadores deben tener control por microprocesador de la relación aire/combustible para optimizar la combustión.

- La combinación de equipo, temperatura operativa y tiempo de estancia debe demostrarse que produce una destrucción efectiva de los materiales presentes en el gas de alimentación.

Estas características pueden también aplicarse a la mayoría de instalaciones de postcombustión existentes. Las temperaturas operativas pueden optimizarse y es posible que el uso de aire enriquecido con oxígeno en lugar de aire normal aumente el tiempo de estancia del gas (menor volumen de gas) así como la temperatura operativa [tm 217, VDI 2442 1987; tm 218, VDI 2443 1995; tm 220, VDI 3476 1990].

Tabla 2.13: Resumen de técnicas de eliminación de polvo

Tipo de Eliminación	Posibles Usos	Posibles problemas	Emisión Asociada mg/Nm³	Motivo de su Elección
Filtros de Tejido	La mayoría con buena estanqueidad y tejidos modernos.	Obstrucciones, incendios, estanqueidad.	1 - 5	Eficacia para polvo adecuado si se controla. Posibilidad de reciclaje del polvo al proceso.
Precipitador Electrostático Húmedo	Mayor rendimiento para gases húmedos	Rotura y cortocircuito de cables	< 5 Opticamente limpio	Eficacia para polvo adecuado, baja caída de presión, pero se producen efluentes.
Precipitador Electrostático	La mayoría con buenos sistemas de control y distribución de gas.	Variación en partículas, Rotura y cortocircuito de cables	5 - 10 (< 50 como pre-eliminación)	Baja caída de presión, fiabilidad, bajo mantenimiento.
Lavadores Húmedos	Sólo algunos tipos de polvo son adecuados. Limpieza de gases de combustión o gases para planta ácida.	Bajo rendimiento y bloqueos	< 20 < 1	Limpieza previa de gases antes de otros métodos. Eliminación de gases y neblinas ácidas.
Filtros Cerámicos	Operación a temperatura más elevada.	Fragilidad, obstrucciones y estanqueidad.	< 50	El polvo debe ser adecuado. El material de la carcasa limita la temperatura superior.
Ciclones	Pre-eliminación	Mal rendimiento. Eficacia limitada para partículas finas.		Limpieza previa de gases antes de otros métodos.

Las emisiones se indican como medias diarias basadas en medición continua durante el periodo de funcionamiento.

Tabla 2.14: Rendimiento medido de los sistemas de eliminación de polvo cuando se utilizan diversas técnicas de eliminación de polvo con tipos de polvo adecuados

Tipo de Eliminación	Aplicación	Emisión de Polvo medida mg/Nm³	Comentarios
Filtro de Tejido (180000 – 250000 Nm³/hr)	Plomo secundario– baterías - Eliminación con PE	0,7 to 3,4 (media mensual).	horno rotatorio corto, Francia
Filtro de Tejido (26000 Nm³/hr)	Cadmio – reciclaje de pilas	< 1 (media mensual).	
Lavador en Cascada	Planta de sinterización de ferrocromo.	< 4	Polvo muy abrasivo, ha producido fallos en filtros de tejido.
Filtro de Tejido	Destilación de zinc New Jersey	3 – 10	
Ciclón + PE + PE Húmedo	Baterías de plomo en planta Ausmelt	1 – 2	
Filtro de Tejido	Producción de ferroaleaciones	1 – 5	
Postcombustión, Enfriador y Filtro de Tejido	Industria de cobre (secundaria)	1 – 5	

Los niveles medidos se indican como rangos. Varían con el tiempo según el estado del equipo, su mantenimiento y el control de proceso de la planta de eliminación. La operación del proceso que origina el polvo también influye en el rendimiento de eliminación de polvo, ya que es posible que haya variaciones en la temperatura, el volumen de gas e incluso las características del polvo a lo largo de un proceso o lote. Las emisiones alcanzables son por consiguiente sólo una base a partir de la cual puede juzgarse el comportamiento real de la planta, y las emisiones alcanzables y asociadas que se discuten en los capítulos de los metales específicos tienen en cuenta la adecuación de los polvos que se producen y lo costes/ventajas de la aplicación particular de la técnica. La dinámica del proceso y otros aspectos específicos de cada centro deben tenerse en cuenta a nivel local.

2.8.3.3 Sistemas de lavado de gas

El uso de técnicas de prevención y reducción debe considerarse en primer lugar. La reducción de estos gases es a menudo posible mediante un buen control de proceso, la selección de las materias primas (ej. excluyendo la contaminación orgánica), el uso de circuitos de recuperación o la fijación del material en una escoria o mata. El uso de quemadores de bajo nivel de NOx y de aire de combustión por etapas para hornos y otras plantas de combustión puede evitar la formación de estos gases. Se han reportado valores inferiores a 100 mg/Nm^3 NOx [tm 160, Winter Cu 1999].

2.8.3.3.1 Lavadores húmedos

Los lavadores correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar para eliminar las concentraciones bajas de dióxido de azufre (menos del 2%) y otros gases ácidos como HF y HCl que puedan producirse [tm 79, Soud 1995].

- Los lavadores húmedos deben incorporar un sistema de medición de caída de presión, caudal de solución y pH.
- Los gases lavados deben pasar del lavador a un eliminador de neblina.
- Las soluciones ácidas diluidas producidas por los lavadores deben reutilizarse a ser posible.

Estas caracteríticas pueden también aplicarse a la mayoría de instalaciones de lavado existentes.

2.8.3.3.2 Lavadores secos o semisecos

Los lavadores con un reactivo adecuado correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar para eliminar las concentraciones bajas de dióxido de azufre (menos del 2%) y otros gases ácidos como HF y HCl que puedan producirse [tm 79, Soud 1995; tm 224, VDI 3927 1998]. Los lavadores secos con carbón activado son técnicas a considerar para eliminar la materia orgánica como dioxinas, o para eliminar el mercurio.

- Los lavadores secos y semisecos deben incorporar cámaras de mezcla y reacción adecuadas.
- Las partículas generadas en la cámara de reacción pueden eliminarse en un filtro de tejido o PE.
- El medio de lavado parcialmente reaccionado puede reciclarse al reactor.
- El medio de lavado consumido debe usarse en el proceso principal a ser posible. Por

ejemplo, la alúmina y el óxido de zinc pueden usarse en sus respectivos procesos.
- Los lavadores semisecos deben incorporar un eliminador de neblinas si se producen nieblas.

Estas características pueden también aplicarse a la mayoría de instalaciones existentes.

2.8.3.4 Sistemas de recuperación de gases

Los sistemas correctamente diseñados, construidos y dimensionados para la aplicación son técnicas a considerar para la eliminación de concentraciones variables de componentes gaseosos.

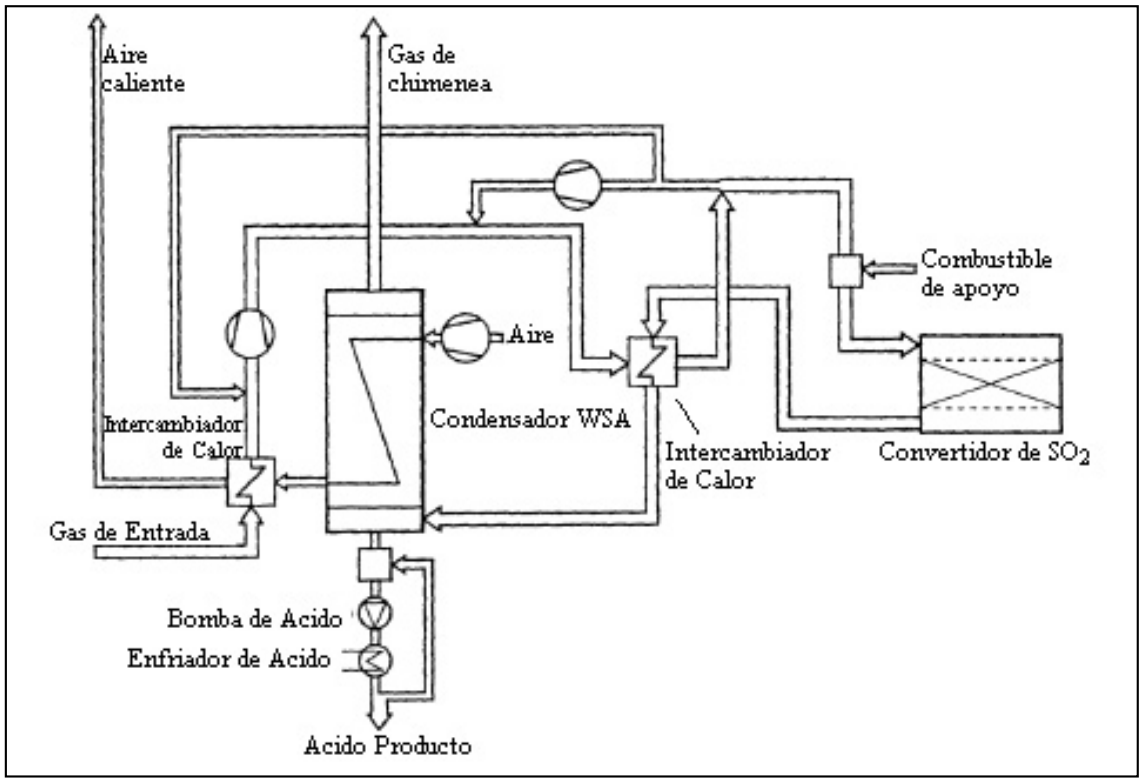
2.8.3.5 Captura de azufre

Las técnicas actualmente probadas son la producción de ácido sulfúrico y la absorción del dióxido de azufre en agua fresca o agua de mar fría, seguido de desprendimiento al vacío y recuperación como dióxido de azufre líquido. La recuperación como dióxido de azufre depende de la existencia de un mercado local para esta sustancia.

Las plantas de ácido sulfúrico de doble contacto operan con una mayor eficacia de conversión que las plantas de contacto simple. La conversión a doble contacto es compleja y cara, pero el uso de una planta de contacto simple con desulfurización del gas de salida para producir yeso para su venta puede permitir ahorros de energía y la producción de una menos cantidad de residuos.

Las siguientes instalaciones son ejemplos de una buena práctica actual:

EJEMPLO 2.01 PROCESO DE ACIDO SULFURICO DE GAS HUMEDO (WSA) PARA LA PRODUCCION DE ACIDO SULFURICO A PARTIR DE GASES CON BAJO CONTENIDO EN SO_2



Descripción: El proceso es especialmente adecuado para la producción de ácido sulfúrico a partir de gases de escape en los que el contenido de SO_2 es bajo. En el proceso, hasta un 99,3% del SO_2 se convierte catalíticamente en SO_3, que reacciona con el agua del gas, formando con ello ácido sulfúrico gaseoso. El ácido es condensado en un condensador WSA. Utilizando una cierta economía de calor y un poco de sensibilidad con el equilibrio de agua, no es necesario efectuar combustión adicional de azufre a cualquier concentración de SO_2. En la figura se muestra el esquema típico de una planta WSA para tostación de molibdeno.

El catalizador empleado en la tecnología WSA es un catalizador de vanadio activado con potasio y sodio en anillos extrusionados de 10 y 20 mm.

Principales beneficios medioambientales: La conversión de SO_2 en ácido sulfúrico reduce las emisiones de SO_2 y por consiguiente el efecto de la lluvia ácida.

Datos operativos: En la tabla siguiente se presentan datos típicos de una planta WSA.

	Sinterización de plomo
Caudal Nm^3/h	100.000
T entrada ºC	30 - 35
T salida ºC	105
Entrada H_2O , % vol.	5.5
Entrada O_2, % vol.	14.2
Contenido de SO_2, % vol.	2.0 - 3.5
Conversión en %	> 99
SO_3 en gas limpio, mg/Nm^3	< 28
H_2SO_4 producto, % peso	> 97.5
Temp. del producto ºC	21
Producción de ácido [t/d]	~290
Consumo de energía (electricidad y combustible), kW	850 (at 2.7% SO_2)
Consumo de agua de refrigeración Gcal/h/tonelada de ácido	0.25 (DT = 5 ºC)

Efectos sobre otros medios: - El proceso WSA no genera productos residuales (excepto el catalizador consumido) ni agua residual, y no utiliza absorbentes u otros agentes químicos. Si la planta de WSA se utiliza para convertir el SO_2 de un proceso de tostación de molibdeno en ácido sulfúrico, el gas de escape debe limpiarse primero. La limpieza puede realizarse usando un PE húmedo o lavador húmedo donde se genera polvo o lodo como residuo del proceso.

Economía: No disponible

Aplicabilidad: El proceso WSA es aplicable a todas las plantas nuevas y existentes, especialmente para plantas de tostación de molibdeno y plomo, en las que el contenido de SO_2 es inferior al 5 - 6%.

Bibliografía: [tm 165, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm 166, Bendixen, Haldor Topsøe, 1996], [tm 167, Bendixen, Haldor Topsøe, 1997], [tm 205, SADACI 1999]

EJEMPLO 2.02 PLANTA DE ACIDO SULFURICO QUE FUNCIONA EN DIVERSAS CONDICIONES DE GASES

Descripción: - Sección de limpieza y lavado de gases. Planta de ácido sulfúrico de doble contacto, 4 - 5 pasadas, catalizador moderno. Acido diluido para neutralización ~ 12 – 15 m^3/h de H_2SO_4 5%, así como descomposición térmica del sangrado ácido con mayor concentración de ácido (~50%).

Principales beneficios medioambientales: Alto índice de conversión para dióxido de azufre. Se consigue más de un 99,6% con una instalación reciente.

Componente	Valores Medidos	
Volumen de gas de escape	320.000	Nm^3/h
SO_x	100 – 1.100	mg/Nm^3
SO_3	20 – 40	mg/Nm^3
NO_x (as NO_2)	20 – 45	mg/Nm^3
Cl- (as HCl)	2 – 7	mg/Nm^3
F- (as HF)	1 – 4	mg/Nm^3
Media - Polvo residual:	< 2	mg/Nm^3
Rango – Polvo residual:	1 – 7	mg/Nm^3
Rango – Componentes:		
Cd	< 0,01 – 0,02	mg/Nm^3
Hg	< 0,01 – 0,07	mg/Nm^3
Tl	< 0,01 – 0,02	mg/Nm^3
As	< 0,01 – 0,1	mg/Nm^3
Se	< 0,01 – 0,02	mg/Nm^3
Sb	< 0,01 – 0,03	mg/Nm^3
Pb	< 0,01 – 0,15	mg/Nm^3
Cu	< 0,01 – 0,09	mg/Nm^3
PCDD/PCDF	0,001 – 0,01	ng ITE/Nm^3

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo – Reducción de las emisiones principales de dióxido de azufre mediante conversión a ácido sulfúrico, recuperación del calor de los gases desprendidos durante la conversión.

Economía: Ver apéndice sobre costes.

Aplicabilidad: Gases de escape de fundición primaria (Concentración de SO_x > 6%; es posible combinación con gases de escape de fundición secundaria). Estas características pueden también aplicarse a la mayoría de instalaciones existentes.

Plantas de referencia: - Alemania

Bibliografía: [tm 124, DFIU Cu 1999]

EJEMPLO 2.03 MODERNA PLANTA DE ACIDO SULFURICO FUNCIONANDO EN CONDICIONES IDEALES

Descripción: Planta de ácido sulfúrico de doble contacto, 4 pasadas con absorción intermedia tras la 3ª pasada, catalizador moderno diseñado por Monsanto, sistema de recuperación de calor (vapor) tras la 1ª pasada mediante tratamiento del gas de escape de un horno de fundición flash Outokumpu y un horno de conversión flash con un 30 - 40% de SO_2.

Principales beneficios medioambientales: Máxima conversión de dióxido de azufre.

Datos operativos: Dilución al 14% de SO_2 en la entrada de la columna de secado, caudal medio de entrada 171.300 Nm^3/h. Se alcanza una conversión de hasta el 99,9% con una instalación reciente. ~150mg/Nm^3 de SO_2 en el gas de escape como media anual. La planta se basa en una alimentación de dióxido de azufre alta y constante, y utiliza un catalizador dopado con Cs.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo. Reducción de las emisiones principales de dióxido de azufre.

Economía: No evaluada.

Aplicabilidad: Caso específico para condiciones ideales de alimentación de gas.

Plantas de referencia: EE.UU.

Bibliografía: [tm 140, Finland Cu 1998]

La emisión de dióxido de azufre de las plantas de ácido sulfúrico es proporcional al contenido en dióxido de azufre del gas de alimentación y el índice de conversión. Una conversión de 99,8% de un gas que contiene un 15% de SO_2 produce una emisión de aproximadamente 900 mg/Nm^3 de SO_2. Estos procesos utilizan por lo tanto chimeneas altas para facilitar la dispersión de los gases, la altura de la chimenea tiene también en cuenta las posibles emisiones durante la fase de puesta en marcha y de parada de la planta, en las que no se consigue una plena eficacia. En estos aspectos influyen factores locales específicos de cada centro. El uso de filtros de bujía antes de la chimenea final es una técnica a considerar si se produce una neblina ácida.

Debe considerarse una ulterior eliminación de dioxinas de azufre mediante un lavador húmedo o semiseco si se quieren cumplir requisitos medioambientales específicos.

2.8.3.6 Dioxinas

Este aspecto se cubre en el apartado correspondiente de la sección anterior sobre técnicas aplicadas. Las técnicas discutidas en esa sección son todas técnicas a considerar en la determinación de las MTD según el origen del material y el potencial de síntesis de novo.

2.8.3.7 Eliminación de otras impurezas

Este aspecto se cubre en el apartado correspondiente de la sección anterior sobre técnicas aplicadas. Las técnicas discutidas son aplicables en áreas específicas. Se tratará con más detalle en los capítulos de los metales específicos.

2.8.3.8 Uso de oxígeno en sistemas de combustión

Esta es una técnica a considerar y puede aplicarse a la mayoría de procesos de combustión y procesos pirometalúrgicos en uso [tm 125, ETSU 1994]. El uso de oxígeno puede proporcionar beneficios tanto económicos como medioambientales siempre que la planta pueda absorber el calor adicional liberado. Existe la posibilidad de que con el enriquecimiento con oxígeno puedan producirse mayores concentraciones de óxidos de nitrógeno, pero la reducción asociada en el volumen de gases normalmente significa que la masa se reduce. Se tratará con más detalle en los capítulos de los metales específicos.

2.8.3.9 Técnicas de control de proceso para plantas de recogida y eliminación

Las técnicas cubiertas en los apartados anteriores pueden aplicarse fácilmente a los procesos existentes. Existe una serie de casos (ej. altos hornos) que requieren el desarrollo y el uso de sistemas modernos de control de procesos. Es necesario más trabajo para identificar los parámetros y sistemas de control correspondientes.

2.9 Tratamiento de Efluentes y Reutilización del Agua

2.9.1 Principales fuentes de generación de efluentes líquidos

Esta sección ofrece una vista general acerca de la generación de efluentes líquidos en un proceso común. Se discuten las formas de reducir el volumen de agua residual, la práctica de reciclar el agua y el tratamiento de efluentes en una planta de tratamiento de aguas local o central, con el fin de dar una comprensión de algunos de los conceptos que pueden aplicarse a los distintos grupos de metales [tm 28, WRC 1993].

La producción de metales no férreos por métodos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos está asociada con la generación de distintas cantidades de diversos efluentes líquidos. Las fuentes principales de las corrientes de efluentes más importantes pueden clasificarse como se muestra en la tabla siguiente.

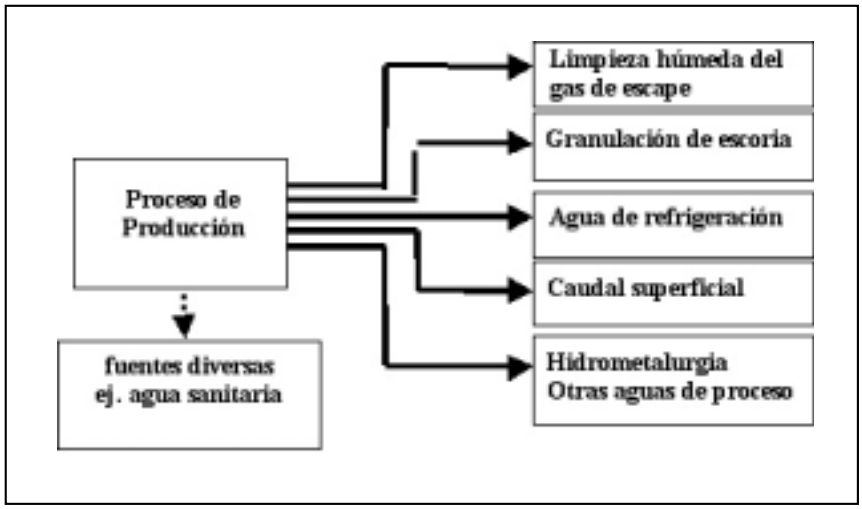


Figura 2.38: Clasificación de Efluentes.

Las corrientes de aguas residuales arriba indicadas pueden estar contaminadas por compuestos metálicos de los procesos de producción y pueden tener un elevado impacto medioambiental. Incluso a concentraciones bajas, algunos metales como el mercurio y el cadmio son muy tóxicos. Esto puede ilustrarse con el hecho de que el mercurio y el cadmio encabezan la lista de sustancias peligrosas prioritarias elaborada por la Conferencia del Mar del Norte en 1984, que propugna una reducción de del 50% de las emisiones en el Mar del Norte. El efecto tóxico de algunos compuestos metálicos es también debido al hecho de que en las condiciones químicas adecuadas, los metales pueden entrar en los cursos de agua naturales como especies solubles y ser asimilados de forma rápida e irreversible en la cadena alimenticia [tm 169, J.H. Clark 1995].

Esta sección presenta primero una visión general de las distintas fuentes de efluentes que pueden encontrarse en una planta de producción de metales no férreos. La segunda parte de la sección refleja las técnicas que se utilizan normalmente para tratar las corrientes de aguas residuales contaminadas.

2.9.1.1 Efluentes de la limpieza de gases de escape

Los equipos de control húmedo de la contaminación del aire se van sustituyendo gradualmente por técnicas de control seco. Las técnicas de eliminación en seco como los

filtros de bolsa presentan la ventaja de que no deben tratarse lodos ni aguas residuales, y que el polvo recogido puede muchas veces reciclarse directamente al proceso principal, por lo que los aspectos de efectos sobre otros medios se ven reducidos en comparación con los sistemas húmedos.

Existen ciertos casos en los que deben aplicarse técnicas húmedas de limpieza de aire, como lavadores húmedos o precipitadores electrostáticos húmedos. Estos se utilizan especialmente cuando no son adecuados otros sistemas de eliminación, si existe riesgo de explosión o combustión de partículas inflamables y si deben eliminarse sustancias gaseosas (por ejemplo, dióxido o trióxido de azufre) además de partículas del caudal de gas. Los precipitadores electrostáticos húmedos son necesarios cuando deben limpiarse gases húmedos y saturados con un alto contenido en partículas. Por ejemplo, durante la producción de zinc y cobre primario, el gas de escape del proceso, que contiene polvo y dióxido de azufre, se limpia usando un lavador y un precipitador electrostático húmedo. Los precipitadores húmedos también se emplean para recoger la neblina de alquitrán de los gases residuales de un horno de cocción de electrodos. En los lavadores húmedos, la aceleración y deceleración de la corriente de gas y del líquido de lavado atomizado produce grandes turbulencias entre los gases, el polvo y las gotas del líquido. Las partículas de polvo se humedecen muy rápidamente, y las reacciones químicas se aceleran. Un colector subsiguiente extrae las gotas de líquido y el polvo humedecido de la corriente de gas. El efluente contaminado puede luego extraerse para su ulterior tratamiento. Si no hay enriquecimiento de componentes solubles en la solución de lavado, la eliminación de los sólidos suspendidos mediante un espesante posibilita la reutilización del agua de lavado. No obstante, en algunos casos debe realizarse la precipitación de componentes solubles con el fin de reutilizar el líquido de lavado.

El efluente líquido requiere por lo general tratamiento ulterior, por ejemplo mediante neutralización y/o sedimentación para separación de las fases sólida y líquida. En ocasiones se utilizan medidas de tratamiento específicas como el intercambio iónico para eliminar compuestos metálicos muy nocivos o valiosos. Por ejemplo, el intercambio iónico se utiliza para recuperar renio del efluente de lavador que se genera en la limpieza del gas de escape de un horno de tostación de molibdeno. Este proceso se utiliza para al eliminación de un compuesto metálico del agua residual y sirve como la fuente más importante para la producción de renio metal.

El líquido tratado puede normalmente ser devuelto al sistema de limpieza húmeda, pero se requiere un sangrado para controlar la composición de la solución. El ácido diluido de estos procesos puede también reutilizarse en otros procesos si los hay.

Se ha informado de que en muchos casos el agua de proceso del sistema de lavado húmedo de un horno de fusión contiene cianuros formados por la reacción de carbono con nitrógeno atmosférico. El nivel de cianuros puede reducirse utilizando el agua de lavado para la granulación de escorias, que conduce a la evaporación y oxidación de la mayoría de los cianuros.

Otra corriente principal de efluentes se deriva de la eliminación de mercurio de algunos gases de escape de hornos de tostación. El paso de eliminación de mercurio comporta un tanque de contacto gas-líquido con una solución de cloruro de mercurio ($HgCl_2$). Este cloruro de mercurio reacciona con el mercurio metálico del gas para formar un precipitado sólido de Hg_2Cl_2 ("calomelano"). El lodo precipitado se extrae y se oxida con Cl_2 para formar la solución de lavado de Hg_2Cl_2. Parte del lodo es deshidratado con una prensa filtrante y se vende como Hg_2Cl_2 para recuperación de mercurio, o se desecha como residuo especial.

Los efluentes del proceso se pretratan localmente para la eliminación del mercurio mediante reacción con polvo de zinc o mediante precipitación com HgS antes de su proceso en una planta final de tratamiento de efluentes.

2.9.1.2 *Efluentes de la granulación de escorias y la producción de granalla metálica y separación por densidades*

Durante la producción de metales no férreos, la escoria y el metal producido son sangrados de los hornos. El metal fundido y la escoria pueden granularse separadamente mediante su vertido en agua, usando un chorro de agua a alta presión u otros sistemas de enfriamiento por inmersión, para formar partículas de tamaño uniforme. El metal granulado puede venderse luego como granalla metálica. La escoria granulada puede utilizarse para otros fines. En la figura siguiente se muestra una etapa de granulación típica.

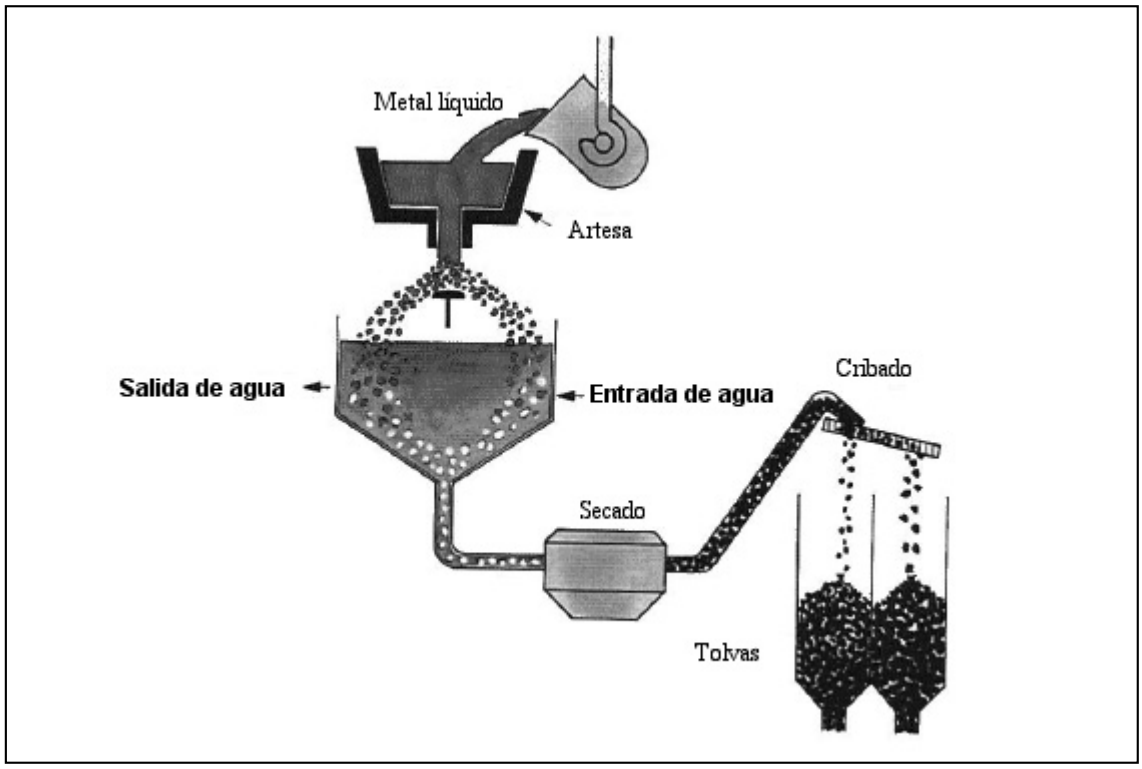


Figura 2.39: Granulación de metal fundido [tm 152, Schei, Tuset,Tveit, 1998].

El efluente líquido que se deriva del paso de granulación se recicla normalmente en un circuito cerrado. Para evitar la acumulación de sólidos en suspensión y compuestos metálicos, debe hacerse una extracción de fondo de la circulación de agua continuamente. El efluente purgado puede enviarse a una planta central de tratamiento de aguas residuales o tratarse por separado.

La separación por densidades (hundimiento y flotación) se utiliza asimismo para separar los metales y componentes de contaminantes ligeros, por ejemplo, en la separación de componentes de plástico tras la trituración. El efluente líquido generado se recicla normalmente, eliminándose el material que flota. Para evitar una acumulación de sólidos en suspensión y metales, debe hacerse una extracción de fondo de la circulación de agua continuamente. El efluente purgado puede enviarse a una planta central de tratamiento de aguas residuales o tratarse por separado.

2.9.1.3 *Agua de refrigeración*

El agua de refrigeración se utiliza a gran escala para los distintos requisitos de refrigeración de las industrias metalúrgicas. Puede dividirse en agua de refrigeración (sin contacto) y agua de enfriamiento (con contacto).

- El agua de refrigeración sin contacto se utiliza para refrigerar hornos, campanas, máquinas de moldeo, etc. Según la localización de la planta, la refrigeración puede conseguirse mediante un sistema de paso directo o mediante un sistema de recirculación con torres de refrigeración por evaporación. El agua de un sistema de refrigeración de paso directo se devuelve normalmente a la fuente natural, por ejemplo un río o un estanque de enfriamiento. En este caso, el aumento de temperatura debe considerarse antes de evacuar el agua al punto de agua natural. El agua de refrigeración sin contacto puede reciclarse asimismo a través de torres de refrigeración.

- El agua de enfriamiento con contacto directo se utiliza durante algunas operaciones de moldeo. Esta agua de enfriamiento está contaminada con metales y sólidos en suspensión y a menudo se produce en grandes cantidades. Debido a la matriz específica y con el fin de evitar efectos de dilución, el agua de enfriamiento con contacto directo debe tratarse principalmente por separado de otras aguas residuales.

Con objeto de minimizar el impacto de la refrigeración en el medio ambiente en su conjunto, debe usarse el documento de referencia de mejores técnicas disponibles para sistemas de refrigeración.

2.9.1.4 Agua de circulación superficial

El agua de circulación superficial se deriva de la contaminación del agua de lluvia recogida por los tejados de los edificios y áreas pavimentadas en el centro de producción. La contaminación del agua de lluvia se produce cuando materiales como polvo que contiene metales del almacenamiento, deposiciones superficiales, etc. o aceites, es arrastrado por el agua al sistema de desagüe. La contaminación del agua superficial puede evitarse o minimizarse mediante el uso de una buena práctica para el almacenamiento de materias primas, así como mediante un buen mantenimiento y limpieza de toda la planta de producción.

El agua de circulación superficial puede recogerse separadamente. Tras un paso de sedimentación o tratamiento químico, puede reutilizarse para otras aplicaciones en el proceso de producción, por ejemplo como agua de refrigeración o para pulverizadores de agua que eviten la formación de polvo.

2.9.1.5 Efluentes del proceso hidrometalúrgico

Los principales efluentes líquidos derivados de la producción hidrometalúrgica de metales no férreos se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 2.15: Posibles fuentes de efluentes líquidos de la producción electrolítica de metales no férreos

Proceso	Operación/fuente	Opciones de uso
Limpieza de gases de tostación	Limpieza húmeda de gases de tostación.	Planta de tratamiento de aguas residuales, con una serie de pasos de precipitación, a veces con eliminación de metales pesados con intercambiadores de calor.
Lixiviación	Operaciones generales, incluida la limpieza húmeda de gases.	Retorno a lixiviación.
Purificación	Operaciones generales.	Retorno a lixiviación o al siguiente paso de proceso.
Electrólisis	Limpieza de células, ánodos y cátodos. Electrolito consumido. Sangrado de electrolito.	Retorno a lixiviación. Retorno a electrólisis tras su tratamiento.

El proceso de producción hidrometalúrgica se inicia normalmente con una operación de lixiviación. Durante la lixiviación, el metal deseado y otros elementos se liberan del mineral y pasan a la solución.

Los reactivos y reacciones típicos de la lixiviación se indican a continuación [tm 107, Ullmans 1996].

- agua para compuestos solubles en agua (sulfato de cobre);
- ácidos sulfúrico, nítrico y clorhídrico o hidróxido sódico para óxidos metálicos;
- agentes complejantes, como cianuro (oro, plata) o amoníaco (minerales de cobre y níquel);
- reducción de un mineral mediante un gas adecuado u oxidación, por ejemplo, dióxido de manganeso con dióxido de azufre, y mata de níquel con cloro;
- reacciones ácido-base, ej. recuperación de complejo de tungsteno a partir de tungsteno a pH elevado.

Para aumentar la cantidad del metal deseado en la solución de lixiviación pueden usarse gran número de técnicas hidrometalúrgicas, de purificación y enriquecimiento. El metal deseado puede recuperarse desde la solución purificada utilizando distintas técnicas como cementación, reacciones gaseosas, precipitación selectiva, intercambio iónico, extracción con disolventes, cristalización, concentración evaporativa o electrólisis. Para asegurar un correcto equilibrio en algunos de estos procesos, normalmente es necesario extraer constantemente una parte de la solución.

Durante la producción de zinc, por ejemplo, puede sangrarse electrolito para controlar la acumulación de magnesio que puede tener un impacto negativo en el funcionamiento de las células electrolíticas. Los flujos de las células electrolíticas pertenecen al mismo circuito (cerrado) de agua que las etapas de lixiviación y purificación: el ácido sulfúrico formado durante la electrólisis se alimenta al proceso de lixiviación, y el líquido restante es purificado y alimentado a la electrólisis.

El efluente sangrado del circuito de electrólisis-lixiviación-purificación es fuertemente ácido y contiene elevadas concentraciones de zinc y sólidos suspendidos. El volumen de sangrado depende fuertemente de la composición de los concentrados de zinc que se utilizan en la tostación. Los componentes que tienden a acumularse (ej. no son suficientemente eliminados de la solución) en el circuito, especialmente el magnesio, determinan el caudal de sangrado.

En muchas instalaciones se ha demostrado que los efluentes generados como sangrado de electrolitos pueden reciclarse a la operación de lixiviación según los contaminantes presentes. El sangrado de electrolito puede también reciclarse a electrólisis tras a eliminación de contaminantes o de elementos de escaso valor.

2.9.1.6 Aguas de otros procesos

En la producción de metales no férreos, hay pocos efluentes directos de procesos que no estén cubiertos por lo apartados anteriores. Los más importantes son las soluciones producidas durante el proceso Bayer para producir alúmina y las aguas residuales ácidas producidas durante el proceso de baterías ácidas de plomo o el proceso de metales preciosos, el ácido sulfúrico diluido de las plantas de ácido sulfúrico y las aguas residuales del refinado de germanio, galio, etc.. Esta agua residuales se tratan con mayor detalle en los capítulos de los metales específicos, pero los procesos utilizados pueden en ocasiones reciclar las soluciones devolviéndolas al proceso o utilizando el ácido en otros procesos.

Las operaciones de decapado son también fuentes de aguas de proceso, y los siguientes ejemplos muestran cómo puede usarse un decapado no ácido y cómo puede minimizarse el impacto del decapado ácido.

a) Decapado no ácido

Este proceso opera en un circuito cerrado. Puede decaparse barra de metal en un sistema en línea consistente en un tubo de acero horizontal con compartimentos. Se utiliza una solución al 2,5% – 3,5% de alcohol isopropílico (AIP) en agua. En el cobre, el proceso de conversión de cascarilla de óxido cuproso en fase vapor para formar cobre (que queda en la barra) se conoce como el proceso Burns [tm 92, Copper Expert Group 1998]. El AIP se recupera de las soluciones consumidas para su reutilización, y se recuperan lodos que contienen metales. El agua de la etapa de recuperación con AIP se envía normalmente al tratamiento de aguas residuales.

b) Decapado ácido

El decapado ácido utiliza un sistema horizontal con compartimentos [tm 92, Copper Expert Group 1998]. En una primera etapa, el material se decapa con ácido sulfúrico diluido; luego, el ácido residual se lava en varias etapas de la superficie del metal mediante pulverizadores de agua, seguido de un secado con aire comprimido. El decapado superficial se realiza normalmente con ácido sulfúrico, pero para algunas aleaciones y para metales como titanio, se utiliza ácido nítrico, en ocasiones mezclado con sulfúrico, en líneas continuas o automáticas. Los gases se limpian para la recuperación de los vapores de ácido nítrico, y el ácido se cambia de vez en cuando. El ácido consumido es enviado para tratamiento y recuperación del metal. Los sistemas de decapado están ventilados para protección de los operarios.

Los productos se enjuagan, y el agua de enjuague se envía para tratamiento, y los lodos se reciclan si es posible. Para el desengrase de la superficie de productos laminados se utilizan detergentes que contienen agua. El agua consumida se limpia por ultrafiltración. Si se emplean disolventes orgánicos para el desengrase de superficies, se utiliza un sistema de desengrase al vapor. En este caso, puede haber presencia de hidrocarburos clorados en el lodo de tratamiento de aguas residuales que se produce.

Se utiliza un proceso alternativo para la producción de barra de cobre. Tras el enfriamiento parcial en en un tubo largo relleno de agua, la barra se forma en espirales que corresponden al diámetro de la bobina. Estas espirales se extienden en una mesa de rodillos en la que la temperatura se reduce a 20ºC mediante rociadores de agua. Un transportador de aleación resistente al ácido conduce estas espirales a los tanques de decapado, donde se decapa la barra con una solución de ácido sulfúrico al 20%. El sistema de decapado ácido asegura una perfecta eliminación de todos los óxidos de la superficie de la barra. Las bobinas se lavan luego con agua de enjuague y por último se protegen con una solución de cera.

Puede utilizarse electro-recuperación para recuperar el metal disuelto en el ácido de decapado. La solución de lavado puede asimismo tratarse mediante intercambio iónico.

2.9.1.7 Fuentes diversas

En una planta industrial para producción de metales no férreos, hay una gran cantidad de otras fuentes. Ejemplos son los efluentes líquidos de las estaciones de limpieza de los camiones que suministran materias primas; el agua de estanqueidad de las bombas; operaciones generales, como la limpieza de equipo, suelos, etc. Estos efluentes líquidos normalmente se recogen y se tratan. El agua del sistema sanitario se evacua normalmente al sistema de alcantarillado público.

2.9.2 Técnicas de tratamiento aplicadas

Los métodos de tratamiento aplicados, que se discutirán en esta parte del documento, son también técnicas a considerar en la determinación de las MTD. En el caso de medidas de tratamiento de aguas residuales y plantas de tratamiento, es muy difícil en esta parte del documento definir un nivel de MTD. Los métodos de tratamiento, y en consecuencia los niveles de emisiones alcanzables, dependen en gran medida del proceso específico y de los metales involucrados [tm 211, Noyes 1993]. Debido a este problema, las técnicas de esta parte sólo se describirán de forma general señalando sus ventajas y desventajas. Para información más detallada, especialmente los niveles de emisiones alcanzables, consultar los capítulos específicos para los distintos metales no férreos.

2.9.2.1 Medidas integradas en el proceso

Las técnicas y métodos para la reutilización de del agua ya se utilizan con éxito en la industria de metales no férreos para minimizar la cantidad de efluentes líquidos que deben evacuarse como aguas residuales. La reducción de las aguas residuales es también económicamente viable en ocasiones, ya que al reducirse la cantidad de agua residual evacuada, también se reduce la cantidad de agua fresca que debe tomarse del entorno acuático. Esto tiene asimismo una acción beneficiosa en los efectos sobre otros medios.

La siguiente tabla muestra un ejemplo para algunos metales no férreos, los pasos de proceso a partir de los que los efluentes líquidos son ampliamente reciclados y reutilizados.

Tabla 2.16: Resumen de Reciclaje y Reutilización

Reciclaje y/o reutilización de efluentes en la industria de metales no férreos						
Fuente	**Proceso de Producción**					
	Cobre primario	**Cobre secundario**	**Plomo primario**	**Plomo secundario**	**Zinc primario**	**Ferro-aleaciones**
Granulación de escorias	■	■	■	■	■	■
Control húmedo de polución atmosférica	■	■	■	■	■	■
Efluente de lavado de gas de tostación	■		■		■	
Agua de refrigeración	■	■	■	■	■	■
Agua de enjuague d ánodos y cátodos	■	■			■	n.r
Electrolito consumido Rotura de baterías	■	■		 ■	■	n.r.
Clasificación de baterías Desulfurización de la pasta de plomo				■ ■		

La técnicas de recliclaje y reutilización son medidas integradas en el proceso. El reciclaje comporta la recirculación del líquido al proceso en el que se ha generado. La reutilización de un efluente significa la recirculación de una fuente de agua para otro fin, es decir, el agua de circulación superficial puede reutilizarse como agua de refrigeración.

Normalmente, un sistema de reciclaje requiere una técnica de tratamiento básico o una extracción de fondo de aproximadamente el 10% del líquido circulante, para evitar la acumulación de sólidos en suspensión, metales y sales en el sistema de recirculación. Por ejemplo, el agua de refrigeración se recicla normalmente y se pasa al sistema de recirculación como se muestra en la figura inferior. Debe aplicarse un biocida.

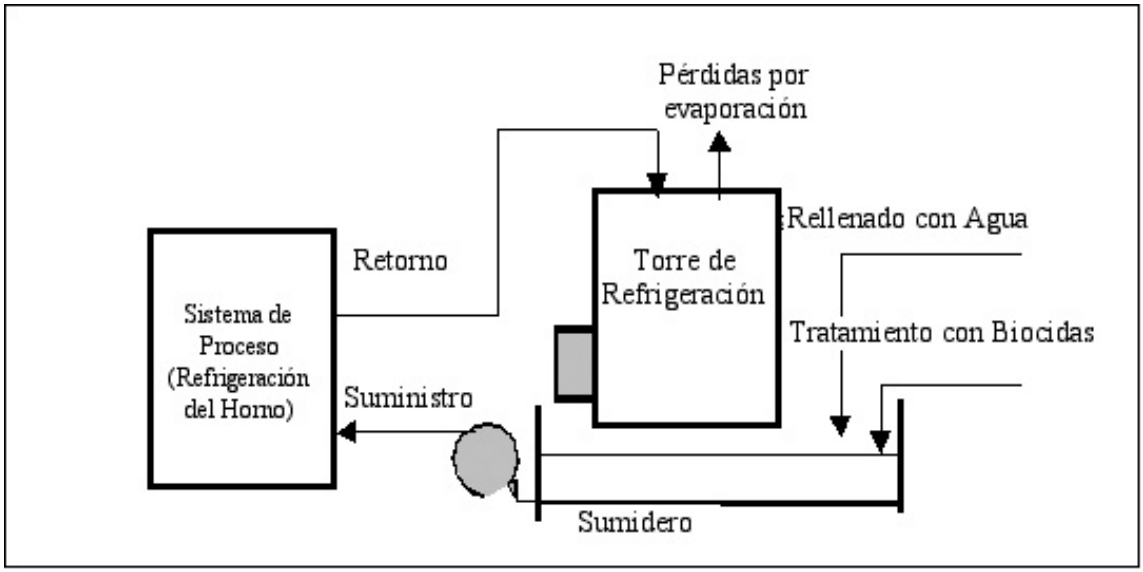


Figura 2.40: Ejemplo de un Sistema de Recirculación de Agua de Refrigeración.

Si hay disponibles grandes cantidades de agua, por ejemplo en un lugar costero, puede usarse un sistema de circulación de agua de refrigeración siempre que el impacto medioambiental sea despreciable. No obstante, deben tenerse en cuenta los efectos sobre el entorno marino en la zona de aspiración del sistema de circulación de agua de refrigeración. Este enfoque debe evaluarse individualmente en cada centro, ya que los costes energéticos de los sistemas de bombeo y refrigeración deben ser equilibrados.

La minimización del agua residual puede también apoyarse con una buena gestión, que puede basarse de forma ventajosa en un plan de gestión de aguas.

2.9.2.2 Técnicas de final de proceso

Todas las cantidades de aguas no reciclables o no reutilizables deben ser tratadas con el fin de minimizar la concentración de contaminantes como metales pesados, sustancias ácidas y partículas sólidas en los efluentes finales evacuados al medio acuático. Para reducir la concentración de contaminantes del agua, deben aplicarse técnicas de final de proceso, como precipitación química, sedimentación o flotación, y filtración. Estas técnicas se utilizan normalmente juntas en una planta de tratamiento de aguas residuales final o central, pero también puede aprovecharse para precipitar los metales antes de que la corriente de proceso se mezcle con otros efluentes.

2.9.2.2.1 Precipitación química

La precipitación química se utiliza principalmente para eliminar los iones metálicos solubles de los efluentes líquidos. Los metales solubles pueden precipitarse desde el agua

residual mediante el ajuste del valor del pH. Se agrega al efluente un reactivo, como cal, hidróxido sódico, sulfuro sódico, o una combinación de reactivos, formando un compuesto insoluble con el metal que forma un precipitado. Estos compuestos insolubles pueden entonces separarse del agua por sedimentación y filtración. La adición de un coagulante o floculante que ayuda a formar flóculos más grandes que pueden separarse más fácilmente se utiliza a menudo para mejorar el rendimiento del sistema.

La precipitación se utiliza normalmente para eliminar los metales pesados de un caudal de agua residual, eliminando por ejemplo hierro, plomo, zinc, cromo, manganeso, molibdeno, etc.. Los hidróxidos de metales pesados son normalmente insolubles, por lo que normalmente se utiliza cal para su precipitación. De forma similar, los sulfuros metálicos son también insolubles, y en condiciones alcalinas se utilizan reactivos como sulfuro sódico, sulfuro ácido de sodio y trimercaptosulfotiazina (TMS). Tras la precipitación puede agregarse sulfato férrico para eliminar el exceso de sulfuro. La precipitación con sulfuro puede producir conentraciones mucho más bajas en el efluente limpio para determinados metales, según el pH y la temperatura. En algunos casos, la precipitación de una mezcla de metales puede llevarse a cabo en dos etapas; primero con hidróxido, seguido de una precipitación con sulfuro [tm 171, Steil&Hahre 1999].

Para potenciar al máximo la eficacia de la eliminación de metales, el proceso debe tratarse a distintos valores de pH con distintos reactantes. La elección del reactante y del valor del pH es la consideración principal para la precipitación de metales pesados. La solubilidad también se ve afectada por la temperatura, lo que debe tenerse en consideración.

Otro factor importante es el estado de valencia del metal en el agua. Por ejemplo, el cromo, cuya forma hexavalente, el cromato, se considera normalmente más soluble que la forma trivalente. En este caso, el cromato debe ser reducido, normalmente con SO_2 a un pH bajo, para la eliminación de cromo mediante un proceso de precipitación.

El aspecto final es la posible formación de iones complejos, que generalmente son más solubles. Esto es frecuente cuando se trata con aguas residuales que contienen amonio, cloruro, fluoruros o cianuros junto con los metales pesados [tm 149, Kemmer 1987].

En muchas plantas en las que se eliminan metales pesados, uno de los principales problemas para alcanzar los límites de efluentes deseados es el estado coloidal de los materiales precipitados. Esto puede derivarse de una neutralización y floculación inapropiada. Pueden usarse diversos floculantes o coagulantes para mejorar el estado del material precipitado, y los proveedores de dichos materiales pueden ensayar los precipitados y especificar el coagulante correcto.

La eficacia de la limpieza de aguas residuales mediante precipitación química está influenciada principalmente por los siguientes factores:

- la elección del precipitante químico;
- la cantidad de precipitante agregada;
- la eficacia con la que el metal precipitado se extrae de la solución;
- el mantenimiento del pH correcto a lo largo del proceso de tratamiento;
- el uso de sales de hierro para eliminar metales específicos;
- el uso de agentes floculantes o coagulantes.

Tabla 2.17: Concentración de algunos metales tras el tratamiento de agua residual con cal o con NaHS

Componente	Agua de proceso de cobre primario y secundario tras el tratamiento con cal y sulfato de hierro y sedimentación	Proceso de cobre secundario y augua superficial tras tratamiento con NaHS, sedimentación y filtración con arena
pH	9,5	
Cu mg/l	0,2 – 0,5	0,04
Pb mg/l	0,2	0,04
Ni mg/l	0,5	0,07
Zn mg/l		0,13
As mg/l	0,1	< 0,01
Cd mg/l	0,1	0,004
Hg mg/l	0,05	
Se tienen en cuenta las variaciones en la composición de los efluentes.		

Para garantizar la máxima eficacia de eliminación de metales pesados, el factor más importante es el mantenimiento de la elección del precipitante, la tabla superior muestra que el uso de reactivos a base de sulfuros puede alcanzar concentraciones más bajas de algunos metales. Un pH correcto a lo largo del proceso de tratamiento de efluentes es también de importancia capital, dado que algunas de las sales metálicas son insolubles sólo en un rango muy estrecho de valores de pH. Fuera de estos rangos, la eficacia de la eliminación de metales disminuye rápidamente, por ejemplo el zinc forma un anion soluble, zincato, a valores de pH elevados [tm 12, HMIP Zn 1993].

2.9.2.2.2 Sedimentación

La sedimentación es una técnica de separación sólido-líquido que utliza la gravedad para separar los complejos metálicos insolubles y las partículas sólidas del efluente líquido. La sedimentación puede producirse en una serie de distintos recipientes de sedimentación, como estanques, balsas o tanques de sedimentación especializados (espesadores, clarificadores) con un dispositivo de eliminación de lodos en el fondo del tanque. Los estanques de sedimentación, que son comúnmente utilizados, tienen forma rectangular, cuadrada o circular en planta. Los lodos que se extraen del paso de sedimentación pueden deshidratarse, por ejemplo utilizando una prensa filtrante al vacío. El filtrado que se genera puede ser reenviado al inicio del proceso de tratamiento de efluentes, o al paso de proceso donde se ha generado, según el proceso de tratamiento. La sedimentación puede usarse para separar partículas sólidas del agua residual empleada para la granulación de escoria o la producción de granalla metálica.

Una alternativa a la sedimentación puede ser la flotación. Las técnicas de flotación se emplean para separar grandes flóculos o partículas flotantes como partes de plástico del efluente, llevándolas a la superficie de la suspensión. La flotación puede conseguirse mediante flotación por aire disuelto (FAD). Se disuelve aire a presión en el método de suspensión, que sale de la solución cuando se libera la presión en forma de diminutas burbujas de aire fijadas a las partículas suspendidas. Esto hace que las partículas floten a la superficie, pudiendo separarse fácilmente los flóculos de la superficie del líquido.

2.9.9.2.3 Filtración

Las técnicas de filtración se emplean normalmente para separación sólido/líquido y como paso de clarificación final en un proceso de tratamiento de aguas residuales. La unidad de

filtración se encuentra normalmente entre el paso de sedimentación y el control final para eliminar los sólidos arrastrados del anterior paso de limpieza. La filtración puede tener lugar en una serie de distintos sistemas de filtro según las partículas sólidas que deban eliminarse.

La unidad de filtro normal consiste en un lecho de material o materiales a través del cual fluye el efluente líquido. Las partículas finas que no pasan a través del medio del filtro forman una aglomerado de filtración que debe eliminarse continua o periódicamente, por ejemplo mediante lavado a contracorriente, con el fin de mantener la pérdida de presión baja. Si la pérdida de presión es baja, el sistema de filtración puede recibir un caudal de agua residual por flujo gravitatorio.

Los filtros de arena están diseñados para la eliminación mecánica de sólidos en suspensión o materiales semisólidos como sedimentos o hidróxidos metálicos. La purificación del agua residual mediante filtración con arena se debe a los efectos combinados de la filtración, la absorción química y la asimilación. Los filtros de arena se utilizan en ocasiones como vasos a presión rellenos de capas de arena que va aumentando en grado con la profundidad. Inicialmente el aglomerado de filtración puede producir una potenciación de la eficacia de producción, particularmente para partículas pequeñas. Tras un periodo de tiempo, el lecho de arena debe lavarse a contracorriente. Los filtros de arena se utilizan a menudo para limpiar el sangrado de un ciclo cerrado de agua o para permitir el uso del efluente como agua de proceso.

La hiperfiltración u ósmosis inversa se utiliza para obtener el resultado deseado con partículas muy finas. La hiperfiltración permite el paso de partículas con un peso molecular entre 100 y 500, mientras que la ultrafiltración se utiliza en el rango entre 500 y 100.000.

La ultrafiltración es un método simple y efectivo de tratamiento de aguas residuales, pero tiene un alto requisito energético. El efluente se coloca en contacto con una membrana de ultrafiltración. Esta membrana, que contiene pequeños poros, permite el paso de partículas moleculares como el agua y retiene las partículas moleculares de mayor tamaño. Con una membrana muy fina es incluso posible filtrar solutos tan pequeños como los metales. Los procesos de filtración basados en membranas producen un permeado limpio y un concentrado que puede requerir tratamiento ulterior.

2.9.2.2.4 Electrólisis

Las técnicas electrolíticas se utilizan para eliminar metales como cobre, metales preciosos, cromo, manganeso, cadmio, etc. de los caudales de aguas de proceso. Dado que las concentraciones de metales son normalmente bajas, la electrólisis es más eficaz para caudales residuales antes de que sean diluidos con otros efluentes. Pueden usarse electrodos especiales, como electrodos de lecho fluidizado o electrodos tridimensionales, con el fin de mejorar la eficacia [tm 148, EA Technology 1998]. La eficacia máxima de la célula se consigue cuando la densidad de corriente varía con la concentración y la transferencia de materia se produce cerca de la densidad de corriente limitante. En otras palabras, el cátodo debe tener siempre un suministro fresco de iones para reducir.

Un uso alternativo, de mucho éxito, de los métodos electroquímicos para la limpieza de metales es oxidar los metales en efluentes de modo que puedan reciclarse. Un ejemplo es el tratamiento de efluentes que contienen cromo (III). El mayor uso del cromo es como agente oxidante, en el que el cromo está en su estado de oxidación (VI). El subproducto de la oxidación es cromo (III), que normalmente se emite con el residuo. La oxidación anódica del efluente de cromo (III) se ha utilizado para regenerar el cromo (VI), que puede reutilizarse [tm 169, J.H. Clark 1995].

La diferencia en la posición relativa en la serie electroquímica del potencial redox de de los

elementos puede también explotarse controlando la intensidad y el voltaje de una célula electrolítica para recuperar los metales más nobles. Estas propiedades pueden también explotarse mediante cementación donde, por ejemplo, el cobre puede precipitarse agregando hierro.

Otro método de tratamiento electroquímico es la electrodiálisis. La célula de electrodiálisis consiste en dos electrodos separados por una membrana de intercambio iónico. La teoría es bastante simple. Los cationes, bajo la influencia de un potencial en los electrodos, migran a través de una membrana de intercambio catiónico en la que son intercambiados por cationes menos tóxicos (por ejemplo, intercambio de cadmio por sodio). Este método pretende combinar las ventajas del intercambio iónico con las ventajas del tratamiento electroquímico [tm 169, J.H. Clark 1995].

2.9.2.2.5 Osmosis inversa

La ósmosis inversa se utiliza extensamente para la eliminación de metales disueltos, especialmente en la industria de la galvanoplastia. La ósmosis es una difusión natural de un disolvente como el agua causada por una diferencia en la concentración de dos soluciones separadas por una membrana. El disolvente fluye en la dirección que reduce la concentración de la solución más concentrada. En la ósmosis inversa se aplica una fuerza motriz para invertir el flujo de disolvente. Una diferencia de presión aplicada entre los compartimentos separados por la membrana hace que el agua fluya desde la solución más concentrada a la menos concentrada. La presión requerida debe ser superior a la presión osmótica. Los datos típicos del paso de iones a través de la membrana de ósmosis inversa se presentan en la tabla siguiente. La ósmosis inversa se utiliza en ocasiones en la recuperación de metales preciosos en la industria electroplástica.

Tabla 2.18: Paso típico de iones a través de la membrana de ósmosis inversa [tm 149, Kemmer 1987]

Iones	% paso	% rechazo
Amonio	8	92
Sodio	5	95
Potasio	5	95
Magnesio	3	97
Estroncio	3	97
Calcio	2	98
Nitrato	15	85
Bisilicato	10	90
Cloruro	5	95
Fluoruro	5	95
Bicarbonato	5	95
Sulfato	3	97
Fosfato	1	99

2.9.2.2.6 Intercambio iónico

El intercambio iónico se utiliza en ocasiones como el paso de limpieza final en la eliminación de metales pesados del agua residual de un proceso. Utilizando el intercambio iónico es posible eliminar los iones metálicos no deseados de una corriente de agua residual, transfiriéndolos a una matriz sólida mientras se devuelve un número equivalente de otros iones almacenados en el esqueleto del intercambiador iónico. El proceso de intercambio iónico se utiliza normalmente si la concentración del metal está por debajo de los 500 mg/l.

El proceso de intercambio iónico tienen lugar normalmente en una columna rellena de perlas de la resina de intercambio iónico. El intercambio se inicia por la parte superior de la columna y luego pasa a través de la columna con el fin de mantener las condiciones de intercambio de equilibrio. La capacidad del intercambiador iónica es limitada, y depende de la cantidad de iones almacenados en su esqueleto. Por consiguiente, el intercambiador iónico debe regenerarse periódicamente con ácido clorhídrico o sosa cáustica. En algunos casos, como en la eliminación selenio y renio del gas de escape de un horno de tostación de molibdenita, lo intercambiadores iónicos se sustituyen periódicamente para poder recuperar el metal en la misma planta o a través de plantas especializadas.

Algunos intercambiadores iónicos especializados son capaces de eliminar metales específicos del agua residual. Este proceso de intercambio iónico selectivo es mucho más eficaz en la eliminación de metales tóxicos del efluente. Además, la columna es capaz de un nivel muy elevado de limpieza, lo que permite su operación eficaz con efluentes de contenido mixto.

2.9.2.2.7 Carbón activado

El carbón activado, una sustancia carbonácea altamente porosa, se utiliza normalmente para eliminar los compuestos orgánicos del agua residual, aunque también tiene aplicaciones en la eliminación de mercurio y de metales preciosos. Estos filtros se utilizan normalmente en forma de lechos o cartuchos dispuestos en forma múltiple, de modo que el caudal de salida de un filtro sea tratado por el siguiente. Los filtros consumidos se sustituyen y pasan a la última posición. Esta operación depende de un método adecuado para detectar la composición de salida de los filtros.

2.9.2.3 Técnicas de control de proceso para el tratamiento de efluentes

La operación y el control de proceso han sido objeto de desarrollos recientes en este sector. Se utilizan las siguientes técnicas [tm 106, Farrell F 1998]: -

- Los sistemas de medición de reactivos se utilizan ampliamente.
- Se utiliza el control por microprocesador de la alimentación de reactivos y del rendimiento de la planta. Se realiza la medición en línea de temperatura, turbidez, pH, conductividad, REDOX, COT, metales individuales y caudal.
- Los operarios reciben formación y son evaluados en la aplicación de las instrucciones de uso de las modernas técnicas de control descritas.
- Los niveles de supervisión se optimizan para aprovechar lo anterior y mantener la responsabilidad de los operarios.
- Se utiliza una adecuada gestión medioambiental y sistemas de calidad.
- Se utilizan sistemas sólidos de mantenimiento. Cada vez más se dispone de personal de mantenimiento especializado integrado en los equipos de operarios.

2.9.3 Niveles actuales de emisiones y consumos

La composición de los efluentes líquidos de los métodos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos depende en gran medida del metal producido, de proceso de producción y de la materia prima empleada. No obstante, los efluentes líquidos de una planta de producción de

metales no férreos contiene normalmente metales pesados, como cobre, plomo, zinc, estaño, níquel, cadmio, arsénico, molibdeno y mercurio, así como sólidos en suspensión.

Las siguientes tablas dan algunos ejemplos de los índices de limpieza para distintas corrientes de aguas residuales y procesos de producción. El consumo de agua, la cantidad y composición del efluente líquido y los valores de emisión alcanzables se tratan con mayor detalle en los capítulos individuales de los metales no férreos.

Tabla 2.19: Ejemplo del contenido de metales en aguas residuales antes y después del tratamiento, relativo a un complejo de fundición/refinería de cobre [tm/24, DFIU cu 1999]

Fuente	Componente Principal [mg/l]					
	Cu	**Pb**	**As**	**Ni**	**Cd**	**Zn**
Agua de proceso (100.000 m^3/a)						
Antes del tratamiento	2.000	500	10.000	1.000	500	1.000
Después del tratamiento	0,01-0,2	0,001-0,04	001-0,1	0,004-0,15	0,0001-0,1	0,01-0,2
Agua de precipitación						
Antes del tratamiento	15 – 30	< 5	< 2	< 2	< 0,5	< 2
Después del tratamiento	0,01-0,4	0,005-0,2	0,003-0,007	0,002-0,4	0,0002-0,1	0,03-0,4
Agua de enfriamiento directo (16.000.000 m^3/a)						
Antes del tratamiento	< 3	< 0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,5
Después del tratamiento	0,01-0,25	0,001-0,1	0,001-0,1	0,002-0,6	0,0001-0,003	0,02–0,5
Indice general de contaminantes (g/t de Cu producido)	2,3	0,3	0,23	0,1	0,05	0,8

Tabla 2.20: Tratamiento de algunos caudales residuales de cobre

Componente	Fuente y método de tratamiento						
	Agua de proceso de cobre primario y secundario. Tratamiento con cal y sulfato de hierro, sedimentación	**Proceso de cobre secundario y agua superficial tras tratamiento con NaHS, sedimentación y filtración**	**Agua de enfriamiento directo tras ajuste del pH y sedimentación**	**Agua de circulación superficial tras ajuste del pH y sedimentación**	**Agua de proceso de alambrón de cobre tras tratamiento**	**Agua de proceso de semis de cobre tras tratamiento**	**Agua de proceso de semis de aleación de cobre tras tratamiento**
pH	9,5		8,5 – 9,5	6,5 – 8,5	6,5 – 95	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5
Cu mg/l	0,2 – 0,5	0,04	0,01 – 0,25	0,01 – 0,4	0,2 – 0,3	0,3 - 0,4	0,2 - 0,4
Pb mg/l	0,2	0,04	0,001 – 0,1	0,005 – 0,2		0,02 – 0,03	0,2 - 0,3
Ni mg/l	0,5	0,07	0,002 – 0,06	0,002 – 0,4		0,09 – 0,1	0,3 - 0,4
Zn mg/l	0,13	0,02 – 0,5	0,03 – 0,4		0,7 – 0,8	0,8 - 1,0	
As mg/l	0,1	< 0,01	0,001 – 0,1	0,003 – 0,07		0,01 - 0,03	< 0,1
Cd mg/l	0,1	0,004	0,0001 – 0,003	0,0002 – 0,1		0,001	< 0,2
Hg mg/l	0,05						< 0,05
Aceite o hidrocarburos mg/l				< 10	< 10	< 10	
Sólidos en suspensión mg/l					< 5	< 100	< 100
Las indicaciones tienen en cuenta las variaciones en la composición de los efluentes.							

A continuación se ofrece un resumen de algunas fuentes de aguas residuales y de los métodos de minimización y tratamiento

Tabla 2.21: Resumen de corrientes de aguas residuales

Fuente del agua residual	Metales asociados producidos	Métodos de minimización	Métodos de tratamiento
Agua de proceso	• Producción de alúmina • Rotura de baterías ácidas de plomo. • Decapado.	• Retorno al proceso en la medida de lo posible.	• Neutralización y precipitación. • Electrólisis.
Agua de refrigeración indirecta	• Refrigeración de hornos para la mayoría de metales. • Enfriamiento de electrolitos para Zn	• Uso de un sistema de refrigeración cerrado. • Control del sistema para detectar fugas.	• Sedimentación.
Agua de enfriamiento directo	• Moldeo de Cu y Al . • Electrodos de carbono • Ferroaleaciones • Cromo metal	• Sedimentación u otro tratamiento. • Sistema de refrigeración cerrado.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Granulación de escoria	• Cu, Ni, Pb, Metales preciosos, ferroaleaciones	• Reutilización en un sistema cerrado.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Electrólisis	• Cu, Ni, Zn Mg	• Sistema cerrado. • Electro-recuperación del sangrado de electrolito.	• Neutralización y precipitación.
Hidrometalurgia (extracción de fondo)	• Zn, Cd	• Sistema cerrado. • Tratamiento de extracción de fondo.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Sistema de eliminación (extracción de fondo)	• Lavadores húmedos. • PEs y lavadores húmedos para plantas de ácido.	• Tratamiento de extracción de fondo. Reutilización de las corrientes de ácido diluido si es posible.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Agua superficial	• Todos	• Buen almacenamiento de materias primas.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario. • Filtración.

2.9.4 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Como ya se ha explicado, todos los métodos de tratamiento de aguas son también técnicas a considerar en la determinación de las MTD. La mejor técnica de tratamiento disponible o una combinación de los distintos métodos de tratamiento sólo pueden escogerse en cada centro individual de producción, teniendo en cuenta los factores específicos de cada centro. Los factores más importantes a decidir, que en determinados casos específicos serían la mejor solución para minimizar la cantidad de aguas residuales y la concentración de los contaminantes son:

- El proceso en el que se genera el agua residual,
- La cantidad de agua,
- Los contaminantes y sus concentraciones,
- El nivel de limpieza requerido, es decir, las normativas locales regionales de calidad de agua,
- La disponibilidad de recursos hídricos.

La siguiente tabla presenta las ventajas y desventajas de las técnicas de tratamiento más

Tabla 2.22: a) Resumen de ventajas y desventajas de las técnicas comunes de tratamiento de aguas residuales

Técnica de Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Precipitación	• Técnica económica y simple. • Largo historial de uso con éxito. • No requiere grandes gastos en una planta nueva. • Puede tratar una amplia gama de contaminantes metálicos, particularmente si se usa precipitación en dos etapas con hidróxido y luego reactivos con sulfuro. • En las condiciones correctas, puede ofrecer una excelente eliminación de metales. • Los precipitantes especificados se hallan disponibles comercialmente. • Permite precipitación por absorción. • Los precipitados pueden muchas veces devolverse a la alimentación.	• Los efluentes ácidos pueden ser difíciles de tratar. • No selectiva: produce un lodo con elevado contenido en agua que contiene un cóctel de metales tóxicos y no tóxicos. • El lodo puede tener que desecharse en vertedero, con un coste a veces muy grande. • La presencia de otras sales, agentes complejantes y disolventes orgánicos puede comprometer gravemente la eficacia de la precipitación. • No puede usarse siempre para tratar concentraciones bajas de metales. • Algunos hidróxidos precipitan ineficazmente.
Sedimentación	• Técnica económica y simple. • Largo historial de uso con éxito.	• Sólo puede eliminar partículas sólidas. • Para partículas con una pequeña diferencia de densidad con respecto al agua, la sedimentación tarda mucho y se requieren grandes estanques.
Filtración	• Técnica económica y simple. • Largo historial de uso con éxito. • La filtración (ej. filtros de arena) se emplea mejor para una materia con partículas conocidas.	• Sólo puede eliminar partículas sólidas. • La eficacia de filtración disminuye si las partículas son muy pequeñas. • La eficacia de filtración disminuye al aumentar la velocidad.
Flotación	• Técnica económica y simple. • Largo historial de uso con éxito	• Sólo puede eliminar complejos de partículas sólidas que sean flotables. • El aire debe disolverse primero en agua a presión para dispersarse en el agua.
Ultrafiltración	• Técnica simple • Permite eliminar partículas muy finas, incluso moléculas del agua residual. • Las membranas muy finas filtran asimismo solutos pequeños como metales. • Emisión de partículas prácticamente cero. • Puede usarse para reciclar y recuperar metales	• Caudal y velocidad de filtración limitados. • Las membranas pueden descomponerse rápidamente en efluentes corrosivos. • No hay separación de metales. • Las membranas antiguas pueden tener fugas. • Las membranas pueden obturarse fácilmente.
Electrólisis	• Puede usarse para tratar efluentes con elevada concentración de metales (unos 2 g/l) en un solo paso. • Tecnología fácilmente disponible. • Téncica probada con buen historial en las industrias de galvanoplastia. • Puede usarse para limpiar contaminantes orgánicos simultáneamente. • Puede usarse en modos de flujo continuo y discontinuo.	• Un nivel de limpieza por debajo del nivel de ppm es difícil. • Las células ineficaces son caras de mantener y de operar. • Elevados portenciales eléctricos y riesgos para la seguridad. • La electrólisis no es selectiva. • Requiere un control constante. • Mala para el tratamiento de efluentes de gran volumen con contenido variable.

Tabla 2.23: b) Resumen de ventajas y desventajas de las técnicas comunes de tratamiento de aguas residuales

Técnica de Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Electrodiálisis	• Puede usarse para reciclar y recuperar metales • La electrodiálisis puede ser selectiva. • Ya se utiliza en industrias de desalinización y galvanoplastia. • Puede alcanzar un nivel de limpieza sub-ppm.	• La electrodiálisis adolece de las mismas desventajas que los métodos de intercambio iónico (ej. construcción de la membrana). • Requiere control constante. • Mala para el tratamiento de efluentes de gran volumen con contenido variable.
Osmosis inversa	• Emisión prácticamente cero. • La tecnología existe y se halla disponible comercialmente. • Puede usarse para reciclar metales • Puede usarse en modo continuo o discontinuo. • Puede tratar un rango muy amplio de concentraciones de metales. • Puede usarse para eliminar los compuestos orgánicos del efluente. • Su eficacia no depende fuertemente de la concentración de contaminantes no corrosivos en el efluente.	• Caudal y velocidad de filtración limitados. • Las membranas pueden descomponerse rápidamente en efluente corrosivos. • No hay separación de metales. • Las membranas antiguas pueden tener fugas. • Las membranas pueden obturarse fácilmente. • Las membranas requiere supervisión y sustitución frecuente. • El equipo es especializado y caro. • La ósmosis inversa utiliza presiones elevadas. • Restricción de caudal mínimo de unos 200 l/min
Intercambio iónico	• Relativamente económico • Productos disponibles comercialmente • Eficacia probada en aplicaciones industriales (ej. eliminación y recuperación de de renio y selenio). • Capaz de limpiar hasta el nivel de ppb (intercambio iónico selectivo capaz de alcanzar el nivel de ppb). • Puede usarse fácilmente en conjunción con otras técnicas (por ejemplo, precipitación) como parte de un tratamiento integral de aguas residuales. • Puede ser selectivo para metales pesados. • Puede aplicarse a muchos tipos de flujos: intermitente, continuo, volumen relativamente grande. • El intercambio iónico selectivo se ha usado en casos aislados, como el tratamiento de efluentes de la industria nuclear.	• No puede tratar grandes cantidades de metal. • La matriz se obstruye fácilmente con sólidos y algunos compuestos orgánicos. • El intercambio iónico convencional no es selectivo. • Los intercambiadores consumidos deben desecharse normalmente como residuo tóxico. • Las matrices pueden descomponerse con el tiempo. • El rendimiento es sensible al pH del efluente. • Los efluentes de gran volumen requieren columnas de intercambio iónico muy grandes. • El intercambio iónico selectivo no tiene un gran uso industrial hasta la fecha. • La regeneración de la columnas de intercambio iónico selectivo es lenta. • Pueden ser necesarios tiempos de contacto prolongados con el efluente.
Carbón activado	• Puede usarse en una amplia gama de aplicaciones (ej. eliminación de mercurio o dioxinas del efluente). • Puede agregarse tras la coagulación y sedimentación como una capa en filtros de arena. • La tecnología existe y se halla disponible comercialmente.	• El carbón activado es caro. • El carbón activado puede convertirse en un substrato de reproducción de microorganismos. • Elevadas emisiones de SO_2 generadas en el proceso de calentamiento de la fabricación del carbón a partir de hulla.

2.10 Minimización y Manipulación de Residuos

2.10.1 Residuos y desechos de la producción de metales no férreos

La producción de metales no férreos a partir de materias primas primarias y secundarias está relacionada con la generación de una amplia gama de subproductos, productos intermedios y residuos. Estos residuos se derivan de distintas etapas del proceso de producción , así como de las operaciones metalúrgicas, del proceso de fundición así como del tratamiento de los gases de escape y de las aguas residuales [tm 85, MURL Düsseldorf 1997]. El contenido y el valor de los elementos contenidos en el residuo influye en su potencial de reutilización, por ejemplo, el limo anódico es una materia prima viable para la recuperación de metales preciosos. Cualquier designación de un residuo como desecho tiene esta circunstancia en consideración. Asimismo, algunos polvos de filtro, como el vapor de sílice derivado del proceso de fundición de ferrosilicio y de silicio metal se recomienda actualmente como subproducto.

Según la legislación actual de la UE, muchos de estos residuos se consideran como desechos. No obstante, la industria de metales no férreos ha utilizado durante muchas décadas muchos residuos como materias primas para otros procesos, y se ha establecido una amplia red de empresas metalúrgicas desde hace muchos años para aumentar la recuperación de metales y reducir las cantidades de desechos en vertedero. Se ha informado de que algunas medidas legislativas para controlar los movimientos de residuos para desecho inhiben el reciclaje de las operaciones metalúrgicas [tm 99, Bontoux 1997]. También es bien sabido que las industrias de producción de metales obtienen uno de los mayores índices de reciclaje de todas las secciones industriales. Esto ayuda a reducir los Efectos sobre Otros Medios al mínimo. No obstante, el problema de los residuos de las instalaciones de producción y la designación de algunos de estos materiales desempeñan también un papel importante en los permisos futuros, y las técnicas tienden a concentrarse en este aspecto.

La tabla siguiente ofrece ejemplos de los posibles residuos del Catálogo Europeo de Residuos (CER) (Resolución del Consejo 94/3/CEE)[1] y de la Lista de Residuos Peligrosos (Resolución del Consejo 94/904/CEE). Los residuos en términos generales se definen mediante la directiva marco sobre residuos (Directiva 75/442/CEE enmendada por la Directiva 91/156/CEE) como “toda sustancia u objeto de las categorías indicadas en el Anexo I cuyo poseedor deseche, pretenda desechar o deba desechar”. Una segunda definición de residuo coexiste con la definición arriba presentada. Se trata de la de la Convención de Basilea, adoptada por la Unión Europea en 1993: “Los desechos son sustancias u objetos que se desechan, se pretende desechar o se debe desechar de acuerdo con las disposiciones de las leyes nacionales” [tm 99, Bontoux 1997].

Tabla 2.24: Materiales de la producción de metales no férreos

Residuos de la producción de metales no férreos			
Código CED	**Descripción**	**Residuo Peligroso**	**Origen**
01 03 03	Lodo rojo de la producción de alúmina		Proceso de bauxita
10 03 00	Desechos de la metalurgia térmica de aluminio		
10 03 01	Alquitranes y otros residuos con carbono de la fabricación de ánodos	•	Planta de cocción de ánodos
10 03 02	Chatarras anódicas		Sala de crisoles
10 03 03	Escorias superficiales	•	Fundición

[1] El CER es una lista estandarizada no exhaustiva de desechos, es decir, una lista que se revisa periódicamente y se modifica si es necesario de acuerdo con el procedimiento del comité. No obstante, la inclusión de un material en el CER no significa que el material deba ser desechado en todas las circunstancias. La inclusión sólo es relevante si se satisface la definición de desecho [tm 99, Definition of Waste 1997].

Residuos de la producción de metales no férreos			
Código CED	**Descripción**	**Residuo Peligroso**	**Origen**
10 03 04	Escoria de fundición primaria/escorias blancas	•	Fundición
10 03 05	Polvo de alúmina		Fundición
10 03 06	Bandas de carbono usadas y materiales ignífugos de la fabricación de ánodos		Planta de cocción de ánodos
10 03 07	Revestimientos de crisol consumidos	•	Sala de crisoles
10 03 08	Escoria salina de fundición secundaria	•	Fundición
10.03 09	Escorias negras de fundición secundaria	•	Fundición
10 03 10	Residuo del tratamiento de escoria salina y escorias negras	•	Planta de recuperación de escoria salina
10 03 11	Polvo de gas de combustión		Sistema de eliminación
10 03 12	Otras partículas y polvo (incluido polvo de molino de bolas)		Molturación, almacenamiento
10 03 13	Residuos sólidos del tratamiento de gases		Sistema de eliminación
10 03 14	Lodos del tratamiento de gases		Sistema de eliminación
10 03 99	Residuos sin especificar		
10 04 00	Residuos de la metalurgia térmica del plomo		
10 04 01	Escorias (primera y segunda fundición)	•	Fundición
10 04 02	Escorias superficiales (primera y segunda fundición)	•	Fundición
10 04 03	Arsenato cálcico	•	Sistema de eliminación
10 04 04	Polvo de gas de combustión	•	Sistema de eliminación
10 04 05	Otras partículas y polvo	•	Almac., manipulación
10 04 06	Residuos sólidos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 04 07	Lodos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 04 08	Revestimientos y refractarios consumidos		Horno
10 04 99	Residuos sin especificar		
10 05 00	Residuos de la metalurgia térmica del zinc		
10 05 01	Escorias (primera y segunda fundición)	•	Fundición
10 05 02	Escorias superficiales (primera y segunda fundición)	•	Fundición
10 05 03	Polvo de gas de combustión	•	Sistema de eliminación
10 05 04	Otras partículas y polvo		Almac., manipulación
10 05 05	Residuos sólidos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 05 06	Lodos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 05 07	Revestimientos y refractarios consumidos		Horno
10 05 99	Residuos sin especificar		
10 06 00	Residuos de la metalurgia térmica del cobre		
10 06 01	Escorias (primera y segunda fundición)		Fundición
10 06 02	Escorias superficiales (primera y segunda fundición)		Fundición
10 06 03	Polvo de gas de combustión	•	Sistema de eliminación
10 06 04	Otras partículas y polvo		Almac., manipulación
10 06 05	Residuos del refinado electrolítico	•	Recinto de tanques
10 06 06	Residuos sólidos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 06 07	Lodos del tratamiento de gases	•	Sistema de eliminación
10 06 08	Revestimientos y refractarios consumidos		Horno
10 06 99	Residuos sin especificar		
10 07 00	Residuos de la metalurgia térmica de la plata, el oro y el platino		
10 07 01	Escorias (primera y segunda fundición)		Fundición
10 07 02	Escorias superficiales (primera y segunda fundición)		Fundición
10 07 03	Polvo de gas de combustión		Sistema de eliminación
10 07 04	Otras partículas y polvo		Almac., manipulación
10 07 05	Lodos del tratamiento de gases		Sistema de eliminación
10 07 06	Revestimientos y refractarios consumidos		Horno
10 07 99	Residuos sin especificar		
10 08 00	Residuos de la metalurgia térmica de otros metales no férreos		
10 08 01	Escorias (primera y segunda fundición)		Fundición

Residuos de la producción de metales no férreos			
Código CED	**Descripción**	**Residuo Peligroso**	**Origen**
10 08 02	Escorias superficiales (primera y segunda fundición)		Fundición
10 08 03	Residuos sólidos del tratamiento de gases		Sistema de eliminación
10 08 04	Otras partículas y polvo		Almac., manipulación, proceso de metales en polvo
10 08 05	Lodos del tratamiento de gases		Sistema de eliminación
10 08 06	Revestimientos y refractarios consumidos		Horno
10 08 99	Residuos sin especificar		
11 02 00	Residuos y lodos se procesos hidrometalúrgicos no férreos		
06 05 01	Lodos del tratamiento de aguas residuales in situ		Tratamiento de aguas residuales
11 02 01	Lodos de hidrometalurgia del cobre		Proceso de lixiviación
11 02 02	Lodos de hidrometalurgia del zinc (incluida jarosita, goethita)	•	Proceso de lixiviación
11 02 03	Residuos de la producción de ánodos para procesos electrolíticos acuosos		Planta producción de ánodos
11 02 04	Lodos sin especificar		
13 01 00	Aceites hidráulicos residuales y líquidos de freno		
13 01 01	Aceites hidráulicos residuales, con PCPs o PCTs	•	Transformador
13 01 02	Otros aceites hidráulicos clorados (no emulsiones)	•	Transformador
13 01 03	Aceites hidráulicos no clorados (no emulsiones)	•	Transformador
13 01 06	Aceites hidráulicos que contienen sólo aceite mineral	•	Transformador
13 03 00	Residuos de aceites y otros líquidos aislantes o de transmisión de calor		
13 03 01	Aceites y otros líquidos aislantes o de transmisión de calor	•	Transformador
13 03 02	Otros aceites y otros líquidos aislantes o de transmisión de calor clorados con PCBs o PCTs		Transformador
13 03 03	Aceites y otros líquidos aislantes o de transmisión de calor no clorados	•	Transformador
13 03 04	Aceites y otros líquidos aislantes o de transmisión de calor sintéticos	•	Transformador
13 03 05	Aceites aislantes o de transmisión de calor minerales	•	Transformador
15 02 00	Absorbentes, materiales de filtro, tejidos de limpieza e indumentaria de protección		
15 02 01	Absorbentes, materiales de filtro, tejidos de limpieza, indumentaria de protección		Sistema de eliminación (eliminación de polvo en seco)

La mayoría de los materiales arriba detallados son reciclados o reutilizados dentro de la misma industria de metales no férreos, así como en otras industrias, por ejemplo en las industrias de cemento, fabricación de abrasivos y construcción. La intención no es desecharlos o entregarlos para su desecho. Son resultado de una separación de metales que es necesaria para su recuperación y la producción de metales a partir de fuentes complejas. A continuación se dan algunos ejemplos.

2.10.2 Técnicas y procesos aplicados

2.10.2.1 Residuos del proceso de fundición

Los principales residuos derivados de la fundición de metales no férreos son las escorias y escorias superficiales eliminadas durante el proceso pirometalúrgico. La escoria se genera por la reacción de elementos adjuntos formadores de escoria (ej. Fe) con los fundentes agregados. En el proceso de fundición, la escoria es líquida y tiene una densidad distinta a la del metal fundido, por lo que puede sangrarse por separado.

La mayor parte de la escoria generada por las operaciones finales o el refinado en los procesos de producción de metales no férreos pueden normalmente reciclarse o utilizarse para la recuperación ulterior de metales. La siguiente figura muestra el reciclaje interno de la escoria generada durante la producción de cobre primario. En este ejemplo, la escoria fundida obtenida del convertidor, que tiene un alto contenido en cobre, es devuelta a la fundición. La escoria que sale de la fundición es descobreada en un horno eléctrico de limpieza de escorias. Este horno opera continuamente con un flujo casi continuo de escoria. Según las instalaciones locales, la escoria se granula para producir abrasivos o se enfría lentamente y se rompe en trozos para relleno o material de construcción.

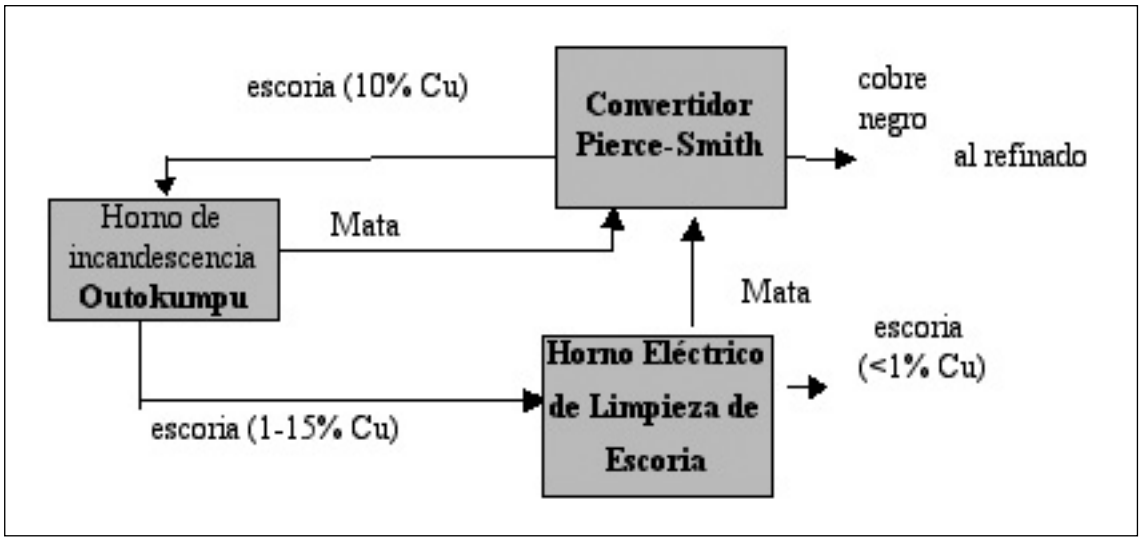


Figura 2.41: Limpieza en horno eléctrico de escorias de cobre.

Se hace una distinción entre escoria con un alto contenido de metal, que se recicla al proceso, y escoria final con una bajo contenido en metal. Varias instalaciones en las industrias de metales no férreos han demostrado que hay un mercado en el cual pueden vender escorias para su aprovechamiento ulterior. El uso de escoria como material de construcción es sólo posible si la cantidad de los compuestos metálicos lixiviables es baja. Existen varios ensayos que lo muestran. Las escorias que no pueden usarse como abrasivos o en ingeniería civil y construcción se envían para su desecho definitivo en vertedero.

La escoria salina se genera en la fundición de metales ligeros (aluminio, magnesio). El uso de un fundente salino evita que el metal fundido se oxide y aglomera las impurezas del proceso. Existen diversas formas de minimizar la cantidad de fundente salino utilizado, así como distintas técnicas de tratamiento empleadas para la recuperación de sales y metales, que se discuten con mayor detalle en el Capítulo 4 de este documento.

Las escorias y escorias superficiales se generan por la oxidación de metales en la superficie del baño o por reacciones con material ignífugo utilizado como revestimiento de hornos. El contenido de metal de las escorias superficiales es relativamente elevado (entre el 20 y el 80%), por lo que normalmente pueden reutilizarse al proceso principal o ser suministrados como materia prima secundaria a otras plantas de metales no férreos.

Otra fuente de residuos son los revestimientos de horno y refractarios consumidos. Se generan cuando se desprende material refractario del revestimiento de los hornos, o cuando debe renovarse por completo el revestimiento del horno. La durabilidad de un revestimiento de horno está comprendida entre unas cuantas semanas y varios años según el proceso y el metal (ej. para el horno flash Outokumpu de producción primaria de cobre puede llegar a 6-10 años). La

cantidad de material de revestimiento de horno puede ascender hasta 5 kg/t de metal producido según el metal fundido [tm 85, MURL Düsseldorf 1997]. Para los revestimientos de horno se utilizan las siguientes prácticas: Tratamiento en horno de fundición para formar una escoria inerte. Por ejemplo, los revestimientos de un proceso de fundición de latón son enviados directamente a una fundición local de cobre secundario; también pueden usarse como componente en la masa del orificio de sangrado; los revestimientos inertes se desechan en vertedero. La siguiente tabla ofrece un resumen de la cantidad de residuos reciclados, reutilizados y desechados de algunos de los hornos de fundición de metales en Alemania. En este sentido, el reciclaje significa que el residuo es devuelto al proceso en el que se ha producido. La reutilización significa que el residuo se utiliza para otro fin; por ejemplo, la escoria puede reutilizarse como material de construcción.

Tabla 2.25: Cantidades de residuos reciclados, reutilizados y desechados reportadas en 1996 para algunas plantas de metales no férreos en la región de Rin Norte Westfalia [tm 83, MURL Düsseldorf 1999]

Residuo	Cantidades de residuos reportadas en toneladas para 1996		
	Reciclado o reutilizado	Desecho en vertedero	Cantidad total
Residuo refractario (Dióxido de silicio)	21	188	209
Residuo refractario	1.655	1.145	2.800
Residuo refractario con componentes nocivos	637	728	1.365
Escoria	16.869	3	16.871
Escorias de fundición de plomo	1.903	0	1.903
Escorias superficiales con aluminio	45.904	927	46.831
Escorias con magnesio	615	81	696
Escoria salina de fundición de aluminio	112.438	0	112.438
Otros residuos	348	0	348

2.10.2.2 Residuos del sistema de eliminación

El sistema de eliminación es otra fuente importante de residuos sólidos. Estos son el polvo del gas de combustión y los lodos recuperados del equipo de control de polución atmosférica, así como otros residuos sólidos como material de filtro consumido.

El polvo del almacenamiento y manipulación de materias primas o de las operaciones de las unidades previas al proceso es recogido por el sistema de eliminación de polvo (normalmente un filtro de bolsa) y es devuelto al proceso principal o a otra fundición. En algunos casos, el polvo debe ser aglomerado antes de poder ser reciclado a la estación de almacenamiento y manipulación de materias primas.

El gas de escape cargado de polvo de las instalaciones de fundición y refinado puede limpiarse (como se describe en la sección 2.8) utilizando distintas técnicas de eliminación. El material recogido como polvo por el gas de escape puede ser aglomerado y enviado de nuevo a la fundición, o ser suministrado como materia prima para ulterior recuperación de metales en otra instalación. Un ejemplo es el polvo rico en zinc de un convertidor o de un horno eléctrico de limpieza de escorias en el proceso de fundición de cobre primario, que puede ser tratado como subproducto y ser reutilizado como materia prima en una planta de recuperación de zinc [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Otro ejemplo es el uso del vapor de sílice (microsílice), que se recoge en el filtro de bolsa en la fundición de silicio metal o ferrosilicio, y que se vende como valioso subproducto a la industria de la construcción.

El lodo con contenido metálico de un lavador se evacua normalmente, por ejemplo en una prensa filtrante con cámara, y es devuelto a la fundición.

Cuando se realiza la limpieza de gases de escape en un sistema de eliminación de polvo, el material de filtro debe ser sustituido ocasionalmente. Los filtros contienen partículas y compuestos metálicos del proceso. Hay una serie de ejemplos en los que el material de filtro se utiliza en el proceso pirometalúrgico. Si ello no es posible, se envía para su desecho final en un incinerador o vertedero. La tabla siguiente proporciona información acerca de la cantidad de residuos reciclados, reutilizados y desechados del sistema de eliminación en algunas de las plantas de producción de metales no férreos en Alemania.

Tabla 2.26: Cantidades de residuos reciclados, reutilizados y desechados reportadas en 1996 para algunas plantas de metales no férreos en Rin Norte-Westfalia [tm 84, MURL Düsseldorf 1999]

Residuo	Cantidades de residuos reportadas para 1996, en toneladas		
	Reciclado o reutilizado	Desecho en vertedero	Cantidad total
Polvo con metales no férreos	6.550	1.886	8.436
Polvo	201	13	214
Residuos minerales del sistema de eliminación	2.638	1.752	4.390
Lodo	508	4	511
Polvo con aluminio	1.477	66	1.543

2.10.2.3 Residuos del tratamiento de efluentes líquidos

Los procesos pirometalúrgicos para la producción de metales no férreos no producen normalmente aguas residuales nocivas. El agua se utiliza para la refrigeración directa o indirecta de hornos, lanzas de inyección y máquinas de moldeo, ej. para ánodo de cobre o colada continua. Este agua se calienta al refrigerar el equipo, pero normalmente no está contaminada por impurezas químicas o partículas metálicas. Por consiguiente, el agua se evacua directamente a su origen tras su sedimentación u otro paso de tratamiento. El material sólido que se elimina se devuelve a la fundición.

Si se utiliza un lavador húmedo para limpiar los gases de escape del proceso, se generan aguas residuales. Este caudal de agua residual debe tratarse para reducir la cantidad de compuestos metálicos. De este tratamiento se genera un lodo que puede ser rico en metal y en ocasiones puede ser reciclado al proceso si el contenido metálico es suficientemente alto.

El agua de proceso se deriva de las operaciones hidrometalúrgicas y presenta un alto riesgo de contaminación acuática. Por consiguiente, debe limpiarse en una planta de tratamiento de aguas residuales. La limpieza se realiza mediante neutralización o precipitación de iones específicos. El principal residuo de estos sistemas de tratamiento de efluentes es el yeso ($CaSO_4$), así como hidróxidos y sulfuros metálicos. El lodo se recicla en ocasiones de vuelta al proceso de producción principal si la neutralización no produce la pérdida de elementos menores, pero con mayor frecuencia se desecha.

2.10.2.4 Residuos de los procesos hidrometalúrgicos de metales no férreos

La producción de metales no férreos por procesos hidrometalúrgicos es otra fuente importante de residuos sólidos. El proceso de lixiviación puede generar cantidades relativamente

grandes de lodos (ej. de 0,3 a 0,5 toneladas de sólidos con hierro por tonelada de zinc según la calidad del concentrado). Estos residuos se desechan normalmente en balsas especialmente impermeabilizadas.

El proceso de lixiviación y purificación y los procesos de electrolíticos generan asimismo otros sólidos ricos en metales. Normalmente son ricos en un metal específico y en ocasiones pueden reciclarse al proceso de producción o ser enviados para la recuperación de metales a otras instalaciones de metales no férreos (ej. para la producción de metales preciosos, plomo, cobre y cadmio). El limo anódico de los tanques de cobre es por ejemplo una de las más importantes materias primas para la recuperación de metales preciosos, y por consiguiente se considera un valioso subproducto de la producción de cobre. Estos aspectos se discuten en los capítulos específicos de los metales.

2.10.2.5 Otros residuos de la producción de metales no férreos

Hay muchos otros tipos de residuos, como aceites hidráulicos y de transmisión térmica, que se derivan del mantenimiento regular del equipo, por ejemplo del transformador de los hornos eléctricos. Normalmente se suministra a una refinería de aceites (en algunos países como Italia, obligatoriamente a un consorcio o agencia). En determinadas circunstancias puede usarse como fuente de energía in situ.

2.10.3 Técnicas a considerar en la determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de emisiones y residuos, así como técnicas que reducen el consumo global de energía. Todas ellas se hallan disponibles comercialmente. Se dan ejemplos con el fin de demostrar técnicas que ilustran un excelente comportamiento medioambiental. Las técnicas, que se dan a modo de ejemplo, dependen de la información facilitada por la industria, los Estados miembros de la UE y la evaluación de la Oficina Europea de PCIC.

2.10.3.1 Minimización de residuos del proceso metalúrgico

Como se ha indicado en la sección 2.10.2.1, la cantidad de escorias y escorias superficiales producida por los metales de fundición está influenciada en gran medida por las impurezas de la materia prima, por lo que materiales más limpios producen una menor generación de estos sólidos. En algunos casos, esto puede asegurarse mediante la selección de la materia prima a utilizar. Por ejemplo, algunos concentrados de zinc pueden contener menores cantidades de hierro [tm 101,NL Zn 1998], y los procesos desarrollados para utilizar estos concentrados pueden minimizar la producción de residuos de hierro. La disponibilidad limitada y los mayores costes de estos concentrados significan que ésta no es una solución global. Para aluminio secundario, el pretratamiento de chatarra o el uso se materiales más limpios produce la reducción o eliminación del fundente salino empleado, según el horno utilizado. La economía del pretratamiento debe ser equilibrada.

Por otra parte, un almacenamiento y una manipulación inapropiados puede producir la humidificación de los materiales. Por ejemplo, en un proceso de refundición del aluminio, el agua se vaporiza, lo que produce una explosión.

La producción de escorias superficiales puede minimizarse optimizando el funcionamiento del horno, por ejemplo reduciendo la combustión evitando el sobrecalentamiento del materia fundido. Modernas técnicas de control de proceso se utilizan para asegurar condiciones operativas optimizadas.

Para evitar la oxidación de la superficie del baño de una fundición, puede usarse un horno cerrado. Por ejemplo, la fundición de aluminio en atmósfera reductora (enjuague del baño con gas inerte) reduce la cantidad de escorias superficiales generadas. Análogamente, el uso de un sistema de bombeo y de un pozo lateral es otra medida que puede reducir la oxidación.

Se ha demostrado que las cenizas de plomo y una gran cantidad de las escorias generadas por el proceso de fundición pueden ser recicladas o reutilizadas en gran medida.

Los revestimientos y refractarios consumidos no pueden evitarse por completo, pero puede reducirse su cantidad con las siguientes medidas:

- Construcción meticulosa del revestimiento de ladrillo del horno.
- Uso continuo del horno, minimizando así las variaciones de temperatura.
- Tiempo de impacto corto de los fundentes.
- Evitar los fundentes agresivos
- Limpieza meticulosa de hornos y crisoles
- Reducción de la agitación (rotación) del horno.

En determinadas condiciones, según la composición de los revestimientos y refractarios consumidos, la reutilización es posible. Por ejemplo, los refractarios se reutilizan en la fundición de cobre primario secundario, tras su trituración, como masa moldeable o de sangrado, o como fundente para ajustar la composición de la escoria. Alternativamente, el contenido metálico puede separarse del material mediante molturación y trituración, y los revestimiento y refractarios consumidos pueden reutilizarse en la construcción. El contenido metálico puede reciclarse en la fundición o enviarse a otras instalaciones de metalurgia no férrea.

2.10.3.2 Minimización de los residuos derivados del sistema de eliminación

Como se ha descrito anteriormente, la principal fuente de residuos generada por el sistema de eliminación es el polvo y el lodo de gases de combustión, según la tecnología de eliminación empleada. El volumen de gases de proceso que hay que limpiar depende en gran medida del tipo de horno. Por ejemplo, un horno totalmente cerrado produce mucho menos polvo de combustión que un horno semicerrado o abierto.

Como ya se ha indicado, el polvo que contiene metales puede normalmente ser reciclado a la fundición o venderse para su aprovechamiento ulterior a otras instalaciones de metales no férreos. La reutilización directa del polvo como materia prima requiere a menudo un paso de aglomeración como paso de tratamiento previo. El polvo y el lodo de combustión pueden procesarse en una serie de procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos.

El secado del material de alimentación para la fundición puede producir emisiones de SO_2, especialmente si se usan minerales de sulfuro como materia prima (la otra fuente es el contenido de azufre del combustible). El yeso ($CaSO_4$) producido en el lavador de SO_2 puede reciclarse en ocasiones al secador como parte de la alimentación de fundente del horno, según el proceso utilizado.

La cantidad de bolsas de filtro consumidas puede reducirse utilizando modernos materiales de filtro, que son más robustos. Los filtros de bolsa se caracterizan como una técnica de eliminación que no precisa mucho mantenimiento. En caso de daños en la bolsa, el compartimento de filtración correspondiente puede aislarse con placas de cobertura

hasta que puedan realizarse las reparaciones de forma segura. El cambio de filtro normalmente sólo es necesario si un 10 o un 20% de los compartimentos del filtro están fuera de servicio.

La sustitución de las bolsas de filtro por tejidos modernos y fiables es muchas veces fácil, pero deben tenerse en consideración los requisitos técnicos y los costes de inversión correspondientes para cada caso concreto. Las bolsas de filtro usadas pueden reciclarse en la fundición. En caso de conversión o renovación del sistema de filtración, la vida de servicio y la susceptibilidad del filtro pueden generar un menor número de bolsas. Si bien esto genera costes adicionales de instalación, normalmente pueden compensarse gracias a la reducción en el número de fallos de las bolsas.

2.10.3.3 Reducción de los residuos generados por el tratamiento de efluentes

Para reducir la carga de aguas con carga térmica en el medio ambiente, pueden adoptarse distintos tipos de sistemas de refrigeración, como sistemas de refrigeración cerrados, sistemas casi cerrados y técnicas de refrigeración de ciclo abierto (torres de refrigeración). Si se utiliza un ciclo de refrigeración cerrado (ej. refrigeradores por aire), la emisión de agua de refrigeración puede minimizarse, y puede requerirse alguna purga para evitar la acumulación de sal. Cabe destacar que la elección del mejor sistema de refrigeración depende de una serie de parámetros específicos del centro. Para minimizar el impacto de la refrigeración sobre el entorno en su conjunto es necesario consultar el Documento de Referencia de MTD para Sistemas de Refrigeración.

La cantidad de agua residual generada por un lavador húmedo puede reducirse si se recicla el agua tratada de nuevo al lavador. Para evitar un contenido creciente de sales en el ciclo de agua de lavado, debe sangrarse una pequeña cantidad de agua continuamente del sistema y sustituirse por agua fresca.

2.10.3.4 Reducción de otros residuos derivados de la producción de metales no férreos

Toda la maquinaria utilizada en instalaciones industriales utiliza aceite como lubricante. Este debe cambiarse, debido a la captación de metal y a las reacciones químicas del aceite. Un mantenimiento regular, las reparaciones y el mantenimiento preventivo pueden minimizar las pérdidas de aceite por fugas y aumentar los intervalos de cambio de aceite. Una reducción de la cantidad de aceite utilizado se consigue también filtrando el aceite, lo que prolonga su vida útil. Esto puede hacerse por ejemplo mediante filtros de paso en derivación para limpiar de forma continua una pequeña parte del aceite. Esta medidas pueden producir una extensión de la vida de servicio de hasta 10 veces según el sistema de filtro específico. Si los filtros de aceite usados se recogen por separado, pueden triturarse en una trituradora. El metal puede reutilizarse en una fundición como materia prima secundaria, y el aceite puede centrifugarse y luego enviarse a una refinería de aceite usado.

2.10.3.5 Reciclaje y reutilización de los residuos de los procesos de fundición de metales no férreos

Como ya se ha indicado en esta sección, los residuos de la producción de metales no férreos pueden reciclarse y reutilizarse en gran medida. La tabla siguiente resume las distintas posibilidades de reciclaje y reutilización de residuos.

Tabla 2.27: Residuos y posibles usos

Origen de los residuos	Metales Asociados	Producto o Residuo Intermedio	Opciones de reciclaje o reutilización
Manipulación de materias primas, etc.	Todos los metales	Polvo, restos	•Alimentación para el proceso principal
Horno de fundición	Todos los metales	Escoria	•Retorno a fundición •Material de construcción tras el tratamiento de la escoria •Industria abrasiva •Partes de la escoria pueden usarse como material refractario, por ejemplo la escoria de la producción de cromo metal
	Ferroaleaciones	Escoria rica	•Materia prima para otros procesos de ferroaleación
Horno de conversión	Cu	Escoria	•Reciclaje a fundición
Hornos de refinado	Cu	Escoria	•Reciclaje a fundición
	Pb	Escorias superficiales	•Recuperación de otros metales valiosos
	Metales preciosos (MPs)	Escoria y escorias superficiales	•Reciclaje interno
Tratamiento de escorias	Cu y Ni	Escoria limpia	•Material de construcción
		Mata	•Recuperación de material
Horno de fusión Al secundario	Todos los metales	Escorias superficiales	•Retoro al proceso tras tratamiento.
		Escoria	•Recuperación de material
		Escoria salina	•Recuperación de metales, sales y óxidos
Electro-refinado	Cu	Sangrado de electrolito Restos anódicos	•Recuperación de Ni. •Retorno al convertidor
		Limo anódico	•Recuperación de metales preciosos
Electro-recuperación	Zn, Ni, Co, PMs	Electrolito consumido	•Reutilización en el proceso de lixiviación
Electrólitos de sales fundidas	Al	SPL	•Combustible o desecho
		Exceso de baño	•Venta como electrolito
	Na y Li	Anode stubs	•Recuperación
		Material de pilas	•Chatarra de hierro tras limpieza
Destilación	Hg	Residuos	•Reutilización como alimentación del proceso
	Zn, Cd	Residuos	•Return to ISF
Lixiviación	Zn	Residuos de ferrita	•Desecho, reutilización de la solución
	Cu	Residuos	•Desecho
	Ni	Residuos de Cu/Fe	•Recuperación, desecho
Planta de ácido sulfúrico		Catalizador	•Regeneración
		Lodos ácidos	•Desecho
		Acido diluido	•Lixiviación, descomposición, neutralización
Revestimientos de horno	Todos los metales	Refractario	•Uso como agente escoriante, desecho
Molturación, Trituración grafito	Carbono	Polvos de carbono y	•Uso como materia prima en otros procesos
Decapado	Cu ,Ti	Acido consumido	•Recuperación
Sistemas de eliminación secos	La mayoría, con filtros de tejido o PEs	Polvo de filtro	•Retorno al proceso •Recuperación de otros metales
Sistemas de eliminación húmedos	La mayoría, con lavadores o PEs húmedos	Lodo de filtro	•Retorno al proceso o recuperación de otros metales (ej. Hg). Disposal
Lodo de tratamiento de aguas residuales	La mayoría	Lodos de hidróxidos o sulfuros	•Desecho, reutilización •Reutilización
Digestión	Alúmina	Lodo rojo	•Desecho, reutilización de solución

Según un proyecto de investigación para evitar los residuos y fomentar el reciclaje en gran número de plantas de fundición de metales no férreos en Rin Norte-Westfalia, puede presentarse la siguiente distribución para demostrar la importancia de las distintas rutas de reciclaje [tm 83, MURL Düsseldorf 1999] [tm 168, W. Neuhaus 1999].

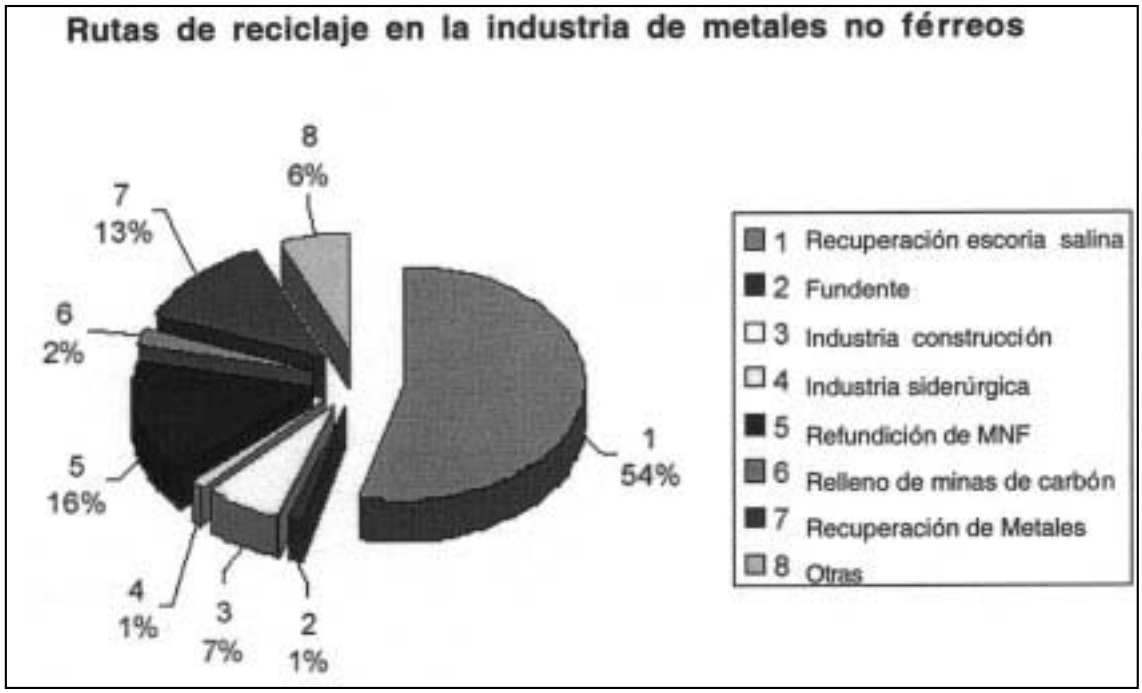


Figura 2.42: Distintas rutas de reciclaje según la cantidad de residuos generados por algunas plantas de producción de metales no férreos en Rin Norte-Westfalia.

Para conseguir una minimización de los residuos y un reciclaje efectivos, pueden considerarse las siguientes medidas:

- Periódicamente pueden realizarse auditorías de minimización de los desechos de acuerdo con un programa.
- Puede alentarse la participación activa del personal en estas iniciativas.
- Debe disponerse de un control activo de la circulación de materias y de los correspondientes balances de masas. Deben existir controles de agua, energía y calor.
- Debe existir una buena comprensión de los costes asociados con la producción de residuos dentro del proceso. Esto puede conseguirse mediante prácticas contables que aseguren que el desecho de residuos y otros costes medioambientales significativos se atribuyan a los procesos involucrados y no se traten simplemente como un coste general del centro de producción.

2.11 Recuperación de Energía

El artículo 3(d) de la Directiva de IPPC exige que la energía se use de forma eficiente, y esta nota incluye un comentario sobre el uso de la energía y su lugar en la determinación de las MTD en cada uno de los capítulos de la producción de metales. El uso de energía en la industria de metales no férreos está cubierta por una serie de informes preparados por el Centro para el Análisis y la Difusión de Tecnologías Energéticas Demostradas (CADDET). Estos informes se han utilizado ampliamente en la comparación de técnicas.

2.11.1 Técnicas aplicadas

La recuperación de energía y calor se practica extensamente durante la producción y moldeo de metales no férreos. Los procesos pirometalúrgicos son muy intensivos térmicamente y los gases de proceso contienen gran cantidad de energía calórica. En consecuencia, se utilizan calderas, intercambiadores de calor y quemadores recuperativos para recuperar este calor. Puede generarse vapor o electricidad para uso interno o externo, y los gases de proceso o de combustión pueden ser precalentados [tm 118, ETSU 1996]. La técnica utilizada para recuperar calor varía de un centro a otro. Está regida por una serie de factores como los posibles usos del calor y la energía en el centro o en sus proximidades, la escala de operación y el potencial de que los gases o sus componentes obstruyan o recubran los intercambiadores de calor.

Los siguientes ejemplos son típicos y constituyen técnicas a considerar para su uso en los procesos de producción de metales no férreos [tm 118, ETSU 1996]. Las técnicas descritas pueden incorporarse en muchos procesos existentes:

- Los gases calientes producidos durante la fundición o tostación de minerales de sulfuro se pasan casi siempre a través de calderas generadoras de vapor. El vapor producido puede utilizarse para producir electricidad y/o para requisitos de calefacción. Un ejemplo de ello es una fundición de cobre que produce el 25% de sus requisitos de energía eléctrica (10,5 MVA) a partir del vapor producido en la caldera de recuperación de calor de un horno flash. Además de la producción de energía, el vapor se utiliza como vapor de proceso y en el secador de concentrados, y el calor residual se utiliza para precalentar el aire de combustión.

- Otros procesos pirometalúrgicos son también altamente exotérmicos, particularmente cuando se utiliza aire de combustión enriquecido con oxígeno. Muchos procesos utilizan el exceso de calor producido durante las etapas de fundición o conversión para fundir las materias secundarias sin el uso de combustible adicional. Por ejemplo, el calor desprendido en el convertidor Pierce-Smith se utiliza para fundir chatarra anódica. En este caso, el material de chatarra se utiliza para el enfriamiento del proceso, y las adiciones se controlan cuidadosamente, lo que evita la necesidad de refrigerar el convertidor por otros medios en diversos momentos del ciclo. Muchos otros convertidores pueden usar adiciones de chatarra para enfriamiento, y los que no pueden son sometidos a desarrollos de proceso que lo permitan.

- El uso de aire enriquecido con oxígeno o de oxígeno en los quemadores reduce el consumo de energía al permitir la fundición autógena o la combustión completa del material carbonoso. Los volúmenes de gases residuales se reducen significativamente, lo que permite usar ventiladores más pequeños, etc.

- El material de revestimiento del horno puede asimismo influenciar el balance de energía de una operación de fundición. En este caso, se indica que los refractarios de bajo peso tienen un efecto beneficioso al reducir la conductividad térmica y el almacenamiento en una instalación [tm 106, Farrell 1998]. Este factor debe estar compensado por la durabilidad del revestimiento del horno y la infiltración del metal en el revestimiento, por lo que puede no ser aplicable en todos los casos.

- El secado separado de los concentrados a temperaturas bajas reduce los requisitos energéticos. Esto es debido a la energía requerida para supercalentar el vapor en una fundición y el aumento significativo en el volumen de gas global, que aumenta el tamaño de los ventiladores.

- La producción de ácido sulfúrico a partir del ácido sulfúrico emitido por las etapas de tostación y fundición es un proceso exotérmico y comporta una serie de etapas de

enfriamiento del gas. El calor generado en los gases durante la conversión y el calor contenido en el ácido producido puede usarse para generar vapor y/o agua caliente.

- El calor se recupera usando los gases calientes de las etapas de fusión para precalentar la carga del horno. De modo similar, el combustible gas y el aire de combustión puede precalentarse, o puede usarse un quemador de recuperación en el horno. La eficacia térmica aumenta en todos los casos. Por ejemplo, casi todos los hornos de cuba para fusión de cátodos/chatarra de cobre son alimentados con gas natural, y el diseño ofrece una eficacia térmica (utilización del combustible) del 58 al 60%, según el diámetro y la altura del horno. El consumo de gas es de aproximadamente 330 kWh/tonelada de metal. La eficacia de un horno de cuba es elevada, principalmente por el precalentamiento de la carga dentro del horno. Puede haber suficiente calor residual en el gas de escape para su recuperación y reutilización para calentar el aire de combustión y el gas. El esquema de recuperación de calor requiere el desvío de los gases de la chimenea del horno a través de un intercambiador de calor de tamaño apropiado, un ventilador de transferencia y los conductos correspondientes. El calor recuperado es aproximadamente de un 4 a un 6% del consumo de combustible del horno.

- El enfriamiento antes de una instalación de filtros de bolsa es una técnica importante, ya que proporciona protección térmica al filtro y permite una más amplia elección de filtro. En ocasiones es posible recuperar calor en esta etapa. Por ejemplo, en un esquema típico utilizado por un horno de cuba para fundir metal, los gases de la parte superior del horno son conducidos al primero de dos intercambiadores de gas, que produce aire de combustión precalentado para el horno. La temperatura de los gases después de este intercambiador de calor puede estar entre 200 y 450 ºC. El segundo intercambiador de calor reduce la temperatura del los gases a 130 ºC antes del filtro de bolsa. Los intercambiadores de calor van normalmente seguidos por un ciclón, que elimina las partículas de mayor tamaño y actúa como arresta-chispas.

- El monóxido de carbono producido en un horno eléctrico o un alto horno se recoge y se quema como combustible mediante distintos procesos o para producir vapor u otra energía. Pueden producirse cantidades significativas de este gas, y existen ejemplos en los que un gran porcentaje de la energía utilizada por la instalación es producida a partir del CO recogido de una instalación de horno de arco eléctrico. En otros casos, el CO formado en un horno eléctrico se quema en el horno y proporciona parte parte del calor requerido para el proceso de fusión.

- La recirculación de gas residual contaminado a través de un quemador de combustible oxiacetilénico ha producido considerables ahorros de energía. El quemador recupera el calor residual del gas, aprovecha el contenido energético de los contaminantes y los elimina [tm 116, Alfed 1998]. Este proceso puede reducir asimismo los óxidos de nitrógeno.

- El uso del contenido calorífico de los gases de proceso o del vapor para elevar la temperatura de las soluciones de lixiviación se practica con frecuencia. En algunos casos, una parte del caudal de gas puede desviarse a un lavador para recuperar calor al agua, que luego se utiliza para lixiviación. El gas enfriado es devuelto luego al flujo principal para su ulterior eliminación.

- Durante la fundición de chatarra electrónica o chatarra de baterías en recipientes metalúrgicos, el contenido calórico del plástico se utiliza para fundir el contenido metálico y otros componentes adicionales de chatarra o de formación de escoria.

La ventaja de precalentar el aire de combustión utilizado en quemadores está bien documentada. Si se utiliza un precalentamiento del aire de 400 ºC, hay un aumento en la

temperatura de las llamas de 200 ºC, mientras que si la temperatura de precalentamiento es de 500 ºC, la temperatura de las llamas aumenta en 300 ºC. Este aumento en la temperatura de la llama produce una mayor eficacia de fusión y una reducción del consumo de energía.

La alternativa al precalentamiento del aire de combustión es el precalentamiento del material cargado en el horno. La teoría indica que puede obtenerse un ahorro de energía del 8% por cada 100 ºC de precalentamiento, y en la práctica se indica que un precalentamiento de 400 ºC produce un ahorro de energía del 25%, mientras que un precalentamiento de 500 ºC produce un ahorro de energía del 30%. El precalentamiento se realiza en diversos procesos, por ejemplo, precalentando la carga del horno utilizando los gases de escape calientes del horno durante la producción de ferrocromo.

La figura siguiente ilustra el balance de energía del proceso Contimelt, que utiliza los gases calientes desprendidos por un horno de cuba para precalentar la carga.

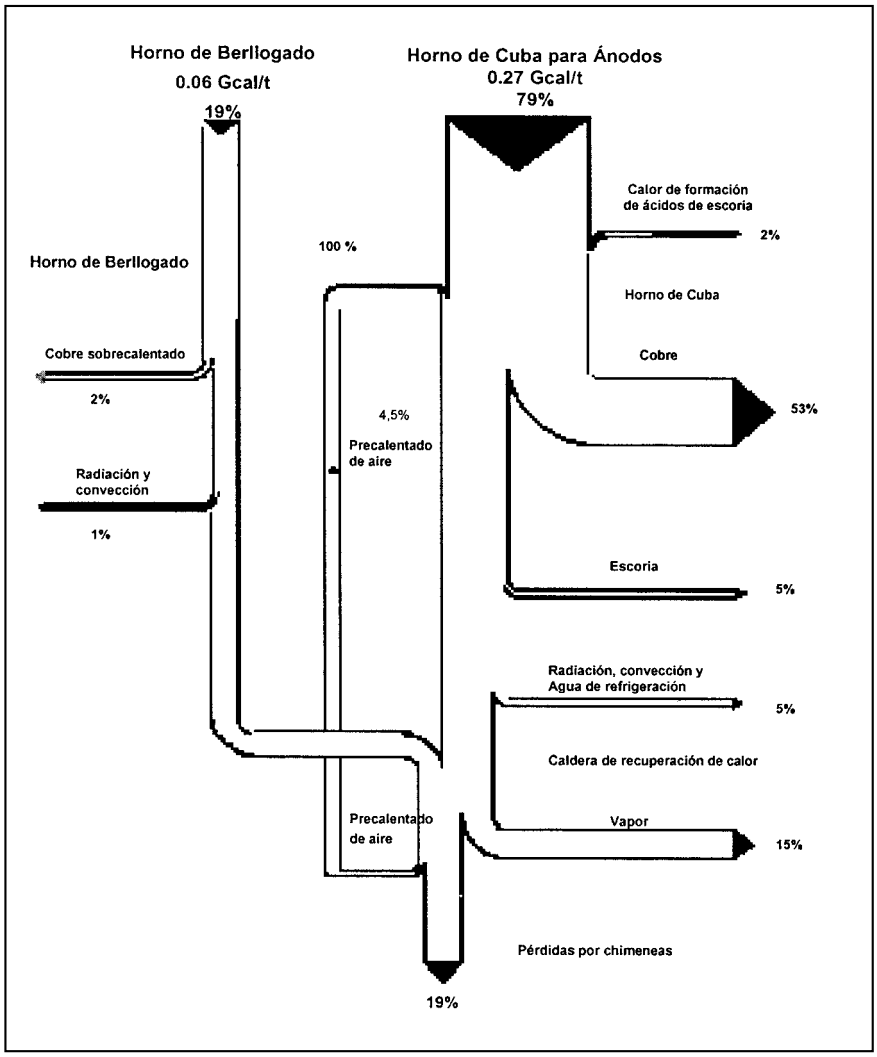


Figura 2.43: Balance de energía del proceso Contimelt [tm 124, DFIU Cu 1999],

La recuperación de calor y energía es por consiguiente un factor importante en esta industria, y refleja el gran porcentaje de los costes que representa la energía. Muchas técnicas de recuperación de energía son relativamente fáciles de acoplar en sistemas ya existentes [tm 118, ETSU 1996], pero ocasionalmente pueden existir algunos problemas de deposición de

compuestos metálicos en los intercambiadores de calor. El buen diseño se basa en un sólido conocimiento de los componentes emitidos y su comportamiento a distintas temperaturas. También se utilizan mecanismos de limpieza de los intercambiadores de calor con objeto de mantener la eficacia térmica.

Aunque estos ahorros son ejemplos de componentes o instalaciones individuales, dependen de forma crítica de las condiciones específicas del centro de producción de del proceso, incluida la economía.

2.12 Efectos sobre Otros Medios

Los efectos sobre otros medios se derivan de los procesos de eliminación de las emisiones de un medio ambiental que producen emisiones en otro medio ambiental. La IPPC alienta la prevención de las emisiones mediante el adecuado diseño de proceso y un buen nivel de operación y mantenimiento. este factor minimiza el impacto medioambiental global en todos los medios ambientales. Pocos procesos pueden operar con un nivel de emisiones nulo, pero se sugieren algunas "Tecnologías Limpias" como técnicas a considerar en la determinación de las MTD Los principios de la minimización y reutilización de los residuos y del agua, así como las técnicas de recuperación de energía arriba discutidas son claros ejemplos de ello.

Análogamente, el uso de oxígeno, la minimización de la transferencia de material fundido en cucharas de fundición y la recogida y recirculación o conversión de los gases son también factores significativos en la minimización de los aspectos de efectos sobre otros medios. Ejemplos comunes son la recogida de cloro de electrólisis con reutilización en una etapa de lixiviación y la recuperación de dióxido de azufre.

La elección del proceso de eliminación es también un factor significativo y un ejemplo claro es la comparación de un lavador húmedo con un filtro de tejido. El lavador húmedo genera un efluente del sangrado de la solución, así como un lodo ácido. Los lodos ácidos pueden ser más difíciles de reutilizar y pueden causar problemas en el lugar de desecho, pero no forman polvo durante su almacenamiento. Sobre esta base, un lavador húmedo es menos atractivo que un filtro de tejido, y también adolece de una menor eliminación de partículas en muchas instalaciones. No obstante, el lavador húmedo tiene su aplicación cuando el polvo a eliminar es muy abrasivo y denso o muy higroscópico. En estos casos, el rápido desgaste del blindaje de las bolsas puede hacer que el filtro de tejido sea muy difícil de utilizar y pueda producir emisiones en caso de rotura. El lavado húmedo controlado por pH es muy eficaz en la absorción del SO_2 de gases con bajas concentraciones de SO_2. Estos factores deben considerarse y sopesarse en cada centro de producción particular.

El coste medioambiental de producir la energía requerida para los procesos y la eliminación es otro aspecto importante de los efectos sobre otros medios. Este factor se tiene en cuenta en los ejemplos utilizados en este documento. No obstante, existen dificultades para hacer comparaciones directas, y aspectos como la fuente de energía para un centro de producción particular pueden hacer que ésta sea una evaluación complicada.

La evaluación de los Efectos sobre Otros Medios es un factor significativo y se detalla en los capítulos de los metales específicos, donde se ilustran asimismo aspectos específicos de los distintos centros de producción y técnicas.

2.13 Ruido y Vibración

El ruido y la vibración son aspectos comunes en el sector, y su origen se sitúa en todas las secciones de la industria. El ruido de proceso emitido por una instalación al entorno circundante es un factor que ha causado muchas quejas en el pasado, y se ha recibido

información sobre las causas y los enfoques necesarios para minimizar el ruido y la vibración. El efecto del ruido sobre los operarios dentro de una instalación no se encuentra dentro del ámbito de esta nota.

Las fuentes significativas de ruido y vibración son el transporte y la manipulación de materias primas y productos; los procesos de producción que comportan pirometalurgia; las operaciones de trituración y molturación; el uso de bombas y ventiladores; la ventilación de vapor; y la existencia de sistemas de alarma no atendidos. El ruido y la vibración pueden medirse en diversas formas, pero generalmente el detalle es específico del centro y tiene en consideración la frecuencia del sonido y la proximidad de centros de población.

Las plantas nuevas pueden especificarse con bajos niveles de ruido y vibración. Un buen mantenimiento puede evitar que los equipos como ventiladores y bombas se desequilibren. Las interconexiones entre los equipos pueden diseñarse para evitar o minimizar la transmisión de ruido. Las técnicas comunes de eliminación de ruido son:

- El uso de terraplenes para atenuar la fuente de ruido;
- El cierre de las plantas o componentes ruidosos en estructuras que absorban el ruido;
- El uso de soportes e interconexiones anti-ruido para los equipos;
- La orientación de la maquinaria que emite ruido; y
- El cambio de la frecuencia del sonido.

2.14 Olor

En la industria de metales no férreos existen varias fuentes potenciales de olor. Las más significativas son los vapores metálicos, los aceites y disolventes orgánicos, los sulfuros del enfriamiento de escorias y tratamiento de agua residuales, los reactivos químicos utilizados en los procesos hidrometalúrgicos y de tratamiento de efluentes (ej. amoníaco) y los gases ácidos. Los olores pueden evitarse con un diseño cuidadoso, una buena elección de los reactivos y una correcta manipulación de materias. Por ejemplo, las producción de amoníaco de las escorias superficiales de aluminio puede evitarse manteniendo el material seco.

Todas las técnicas de eliminación descritas anteriormente en este capítulo contribuyen a la prevención y eliminación de olores. Los principios generales de “Buen Orden” y buenas prácticas de mantenimiento también tienen una gran contribución en la prevención y el control.

La jerarquía básica de los principios de control de olores son:

- Evitar o minimizar el uso de materiales malolientes.
- Contener y extraer los materiales y gases olorosos antes de que se dispersen y diluyan.
- Tratarlos, a ser posible mediante postcombustión o filtración.

El uso de medios biológicos como turba o materiales similares que actúen como sustrato para especies biológicas ha dado buenos resultados en la eliminación de olores [tm 159, VDI 1996]. La eliminación de olores puede ser un proceso muy complejo y caro si se diluyen materiales fuertemente olorosos. El tratamiento de volúmenes de gas muy grandes con bajas concentraciones de materiales olorosos requiere una planta de proceso de gran tamaño.

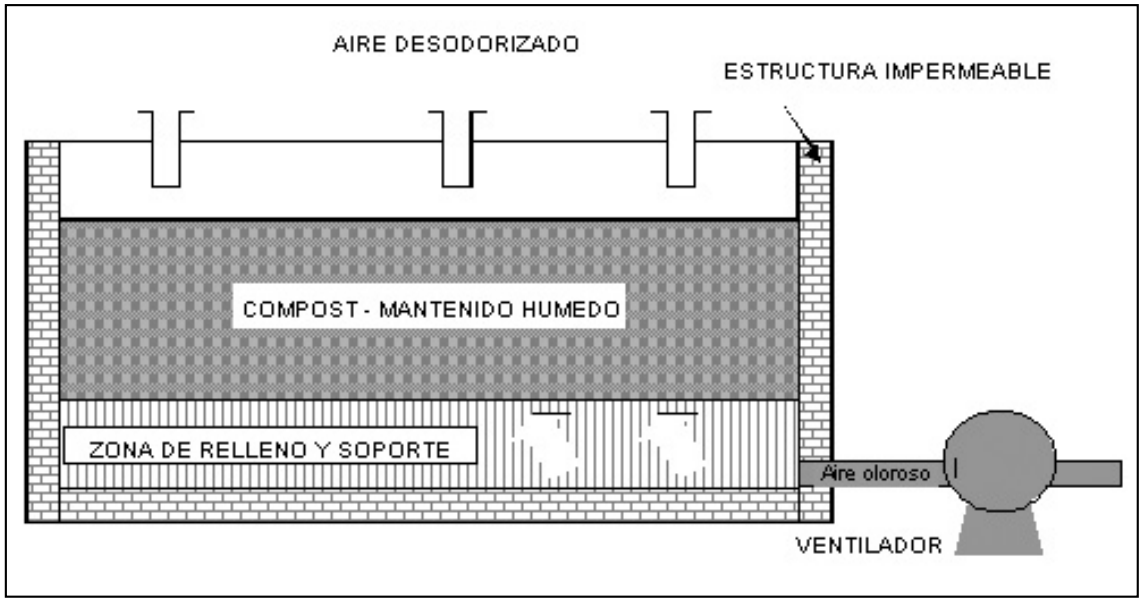


Figura 2.44: Esquema de un Biolfiltro simple.

2.15 Aspectos de Seguridad

La política general para la prevención, la preparación necesaria y la respuesta a los accidentes industriales se basa en los siguientes principios:

2.15.1 Principio de prevención

- La construcción y operación de la planta deben ser de modo que se prevenga la aparición incontrolada de anomalías en el funcionamiento.
- La construcción y operación de la planta deben ser de modo que las consecuencias de los accidentes sean reducidas.
- La construcción y operación de la planta deben ser conformes a las mejores técnicas disponibles en cuanto a seguridad (tecnología de punta en lo relativo a seguridad).

2.15.2 Consideración de sistemas complejos en industrias de proceso

Los sistemas complejos deben ser examinados minuciosamente mediante métodos sistemáticos y lógicos. Esto se tiene en cuenta aplicando:

- Métodos de investigación analíticos sistemáticos, como estudios de Viabilidad y Riesgo (HAZOP)
- Análisis de Seguridad detallado teniendo en consideración las condiciones del caso individual.

2.15.3 Adecuación de medios

Los requisitos de seguridad se clasifican de acuerdo con el “tipo y alcance de los riesgos que cabe esperar”. Con este fin, dentro de los Estados miembros se establecen reglamentos para:

- sustancias susceptibles de producir accidentes (criterios de sustancias, lista de sustancias),
- actividades industriales susceptibles de producir accidentes (lista de plantas).

La dependencia objetiva de potencial de desastres de la cantidad de sustancias peligrosas se determina mediante el concepto de umbral de cantidad, que define los distintos grados de seguridad requeridos en función de la cantidad.

2.16 Operación y desmantelamiento de la planta

El artículo 3(f) de la Directiva sobre IPPC requiere que se tomen las medidas necesarias al cese definitivo de las actividades para evitar todo riesgo de contaminación y devolver el centro de producción a un estado satisfactorio. La protección del suelo y del agua son de importancia capital, y debe evitarse que se produzca la suspensión en el aire de materiales o polvo. Un enfoque integrado significa la adopción de las siguientes medidas como mínimo:

- Minimización de la cantidad de suelo que deba excavarse o sustituirse debido a construcción y garantía de que el material excavado en el suelo se trate cuidadosamente (para evitar cambios perjudiciales en los terrenos circundantes).

- Minimización de la introducción de sustancias en el suelo por fugas, deposición aérea y almacenamiento inapropiado de materias primas, productos o residuos durante la fase operativa de una instalación.

- Evaluación de la contaminación histórica para tener en cuenta las condiciones anteriores a la reglamentación para asegurar un cierre limpio cuando se produzca el desmantelamiento de una instalación, esto es, la limpieza y rehabilitación con respecto al uso futuro de la zona. Las funciones naturales del terreno deben salvaguardarse, si es factible.

2.17 Mejores Técnicas Disponibles

Para la comprensión de esta sección y de su contenido, se llama la atención del lector al prefacio de este documento, y en particular a la sección quinta del prefacio: “Cómo entender y utilizar el presente documento”. Las técnicas y niveles asociados de emisiones y/o consumos, o rangos de niveles, presentados en esta sección han sido determinados mediante un proceso iterativo que comporta los siguientes pasos:

- Identificación de los aspectos medioambientales claves del sector.
- Examen de las técnicas más relevantes para tratar estos aspectos clave.
- Identificación de los mejores niveles de comportamiento medioambiental, sobre la base de los datos disponibles en la Unión Europea y en todo el mundo.
- Examen de las condiciones en las que se consiguen estos niveles de comportamiento, como costes, efectos sobre otros medios o razones principales de la puesta en práctica de estas técnicas.
- Selección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y de los niveles asociados de emisión y/o consumo para este sector en un sentido general, todo ello de acuerdo con el Artículo 2(11) y el Anexo IV de la Directiva.

La evaluación experta por parte de la Oficina Europea de IPPC y el Grupo Técnico de Trabajo (TWG) ha desempeñado un papel clave en cada uno de estos pasos y el modo en que aquí se presenta la información.

Sobre la base de estas técnicas de evaluación, y en la medida de lo posible, en este capítulo

se presentan niveles de emisiones y consumos, asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles, que se consideran apropiados para el sector en su conjunto y en muchos casos reflejan el funcionamiento real de algunas instalaciones del sector. Cuando se presentan niveles de emisiones o consumos "asociados con las mejores técnicas disponibles", debe entenderse que ello significa que tales niveles representan el comportamiento medioambiental que podría preverse como resultado de la aplicación, en este sector, de las técnicas descritas, teniendo en cuenta el equilibrio de costes y ventajas inherente a la definición de las MTD. No obstante, no son valores límite de consumo o emisión ni deben entenderse como tales. En algunos casos puede ser técnicamente posible conseguir mejores niveles de emisiones o consumos, pero debido a los costes involucrados o por la consideración de efectos sobre otros medios, no se consideran apropiados como mejor técnica disponible para el sector en su conjunto. No obstante, tales niveles pueden ser considerados justificados en casos más específicos en los que existan motivos especiales de puesta en práctica.

Los niveles de emisiones y consumos asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles deben ser contemplados en el contexto de las condiciones de referencia que se especifiquen (ej. periodos de promedio).

El concepto de "niveles asociados con las MTD", arriba descrito, debe distinguirse del término "nivel obtenible" utilizado en otros lugares de este documento. Cuando un nivel se describe como "obtenible" usando una técnica particular o una combinación de técnicas, debe entenderse que significa que se puede esperar conseguir el nivel a lo largo de un periodo de tiempo sustancial en una instalación o proceso bien mantenido y gestionado mediante tales técnicas.

Cuando se hallan disponibles, se facilitan datos relativos a costes junto con las técnicas presentadas en el capítulo anterior. Estos dan una indicación aproximada de la magnitud de los costes involucrados. No obstante, el coste real de la aplicación de una técnica dependerá mucho de la situación específica relativa, por ejemplo, a los impuestos, tasas y características técnicas de la instalación en cuestión. No es posible evaluar con detalle estos factores específicos de cada centro de producción. En ausencia de datos relativos a costes, las conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas se extraen a partir de observaciones de las instalaciones existentes.

La intención es que las mejores técnicas disponibles generales de este capítulo sean un punto de referencia en relación al cual se juzgue el comportamiento presente de una instalación o se estudie una propuesta de una nueva instalación. De este modo servirán de ayuda en la determinación de las condiciones apropiadas "basadas en las mejores técnicas disponibles" para la instalación, o en el establecimiento de reglamentos de aplicación general conforme al Artículo 9(8). Está previsto que las nuevas instalaciones puedan diseñarse para tener un comportamiento igual o incluso mejor que los niveles generales para las mejores técnicas disponibles aquí presentados. También se considera que las instalaciones existentes podrían moverse hacia los niveles generales para las mejores técnicas disponibles o incluso mejorarlos, con arreglo a la aplicabilidad técnica y económica de las técnicas en cada caso.

Aunque los BREFs no establecen normas de cumplimiento legal, tienen por finalidad facilitar información que sirva de referencia a la industria, los Estados miembros y el público acerca de los niveles obtenibles de emisiones y consumos al utilizar las técnicas especificadas. Los valores límite apropiados para cualquier caso específico deberán determinarse teniendo en cuenta los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales.

No es posible concluir las Mejores Técnicas Disponibles para todas las etapas de proceso comunes, debido a la influencia de cada uno de los grupos de metales. Por ejemplo, la selección del proceso de producción sólo puede realizarse para cada metal individualmente tras tener en cuenta las diversas influencias de las materias primas disponibles, etc. Las Mejores Técnicas Disponibles incluidas en esta sección para los procesos comunes hacen referencia a:

- Manipulación y almacenamiento de materiales;
- Control de proceso;
- Recogida de vapores y gases;
- Eliminación de azufre;
- Prevención y destrucción de dioxinas; y
- Eliminación del mercurio de los gases de proceso.

2.17.1 Manipulación y almacenamiento de materiales

Las técnicas utilizadas dependen en gran medida del tipo de material que se utilice. Por ejemplo, los materiales grandes y pesados se tratan con una serie de técnicas completamente distintas a las utilizadas para materiales finos y polvorientos. Estos aspectos son específicos de cada uno de los centros de producción y materiales. No obstante, existen varias técnicas que se consideran como MTD en la prevención de emisiones derivadas de la manipulación de materias primas.

Estas técnicas se listan anteriormente en este capítulo, en el apartado de técnicas a considerar en la determinación de las MTD. No obstante, existen varias técnicas que se consideran más eficaces en la prevención de emisiones de la manipulación de materias primas. Estas técnicas son:

- El uso de sistema de almacenamiento de líquidos que los contenga en recintos impermeables y con capacidad para contener al menos el volumen del tanque de almacenamiento más grande del recinto. Existen diversos reglamentos dentro de cada unos de los Estados miembros, que deben cumplirse según proceda. Las zonas de almacenamiento deben estar diseñadas de modo que las fugas de las partes superiores de los tanques y de los sistemas de suministro queden recogidas y contenidas dentro del recinto. El contenido del tanque debe indicarse y deben utilizarse las alarmas asociadas. El uso de suministro planificados y de sistemas de control automático para evitar un llenado excesivo de los tanques de almacenamiento.

- El ácido sulfúrico y otras sustancias reactivas deben también almacenarse en tanques de doble pared o tanques colocados en recintos químicamente resistentes de la misma capacidad. El uso de sistemas de detección de fugas y de alarmas es una medida razonable. Si existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la zona de almacenamiento debe ser impermeable y resistente al material almacenado.

- Los puntos de suministro deben estar contenidos dentro del recinto para recoger los derrames de materias. Debe practicarse la devolución por ventilación de los gases desplazados al vehículo de suministro para reducir las emisiones de COVs. También debe estudiarse el uso del cierre automático de la conexiones de suministro para evitar derrames.

- Las materias incompatibles (como las sustancias oxidantes y orgánicas) deben estar separadas y utilizarse gases inertes para los tanques o zonas de almacenamiento si es necesario.

- El uso de interceptadores de aceites y sólidos si es necesario para el desagüe de las áreas de almacenamiento abiertas. El almacenamiento de materiales que puedan emitir aceite en zonas recubiertas de cemento que tengan curvas u otros dispositivos de contención. El uso de métodos de tratamiento de efluentes para las especies químicas almacenadas.

- Cintas transportadoras y conductos de transferencia situados en lugares seguros y abiertos por encima del suelo, de modo que las fugas puedan detectarse de forma rápida y puedan

evitarse los daños derivados de vehículos y otros equipos. Si se utilizan conducciones soterradas, su curso puede estar documentado y marcado, adoptándose sistemas de excavación seguros.

- El uso de depósitos bien diseñados y robustos para gases a presión (incluidos GLPs) con control de la presión de los tanques y de los conductos de suministro para evitar rupturas y fugas. Deben utilizarse monitores de gas en zonas confinadas y cerca de los tanques de almacenamiento.

- Cuando sea necesario, pueden usarse sistemas herméticos de suministro, almacenamiento y distribución para materiales polvorientos, así como silos. Pueden usarse naves completamente cerradas para el almacenamiento de materiales polvorientos con el fin de no tener que utilizar dispositivos de filtración especiales.

- Pueden usarse agentes sellantes (como melazas y PVA) cuando proceda y sea compatible con el fin de reducir la tendencia de los materiales a formar polvo.

- Cuando sea necesario, pueden usarse transportadores cerrados con equipos de extracción y filtración bien diseñados y robustos en los puntos de suministro, silos, sistemas de transferencia neumática y puntos de transferencia de transportadores, para evitar la emisión de polvo.

- El material no polvoriento e insoluble puede almacenarse en superficies herméticas con desagüe y recogida de desagües.

- Las virutas, virutas de torno y otros materiales aceitosos deben almacenarse a cubierto para evitar que el aceite sea arrastrado por el agua de lluvia.

- Deben usarse sistemas de transporte racionalizados para minimizar la formación y transporte de polvo dentro del centro de producción. Las aguas de lluvia que arrastren el polvo deben recogerse y tratarse antes de su evacuación.

- El uso de sistemas de lavado de las ruedas y de la carrocería o de otros sistemas de limpieza de los vehículos empleados para suministrar o manipular materiales polvorientos. Las condiciones locales, como la posible formación de hielo, pueden influir en el método empleado. Pueden usarse campañas planificadas para la limpieza de las carreteras.

- Pueden adoptarse sistemas de control de stocks y de inspección para prevenir derrames y detectar fugas.

- Pueden incorporarse sistemas de muestreo y análisis al sistemas de manipulación y almacenamiento de materiales con el fin de determinar la calidad de la materia prima y el método de proceso. Estos sistemas deben estar diseñados y operados al mismo alto estándar de calidad que los sistemas de manipulación y almacenamiento.

- Las áreas de almacenamiento para reductores, como carbón, coque o virutas de madera deben supervisarse para detectar posibles incendios causados por ignición espontánea.

- El uso de buenas prácticas de diseño y construcción, así como de un mantenimiento adecuado.

La tabla siguiente resume las técnicas de acuerdo con el tipo y las características del material.

Tabla 2.28: Resumen de técnicas de manipulación y almacenamiento

Materia prima	Grupo de Metales	Método de Manipulación	Método de almacenamiento	Comentarios
Concentrados: Forman polvo No forman polvo	Todos	Transportadores cerrados o transportadores neumáticos cubiertos	Recinto cerrado Almacén cubierto	Prevención de contaminación del agua.
Material en gránulos finos, como metal en polvo	Metales refractarios	Transportadores cerrados o transportadores neumáticos cubiertos	Bidones, tolvas y recipientes cerrados.	Prevención de contaminación del agua y emisiones fugitivas al aire.
Materias secundarias: Elementos grandes Elementos pequeños Finos Virutas	Todos	 Cargadora mecánica Skips de carga Cerrados o aglomerados	 Abierto Naves cubiertas Cerrado si forma polvo Cubierto	Prevención de contaminación del agua. Reacciones con el agua. Drenaje aceitoso
Fundentes: Forman polvo No forman polvo	Todos	Transportadores cerrados o transportadores neumáticos cubiertos Transportadores cubiertos	Recinto cerrado Almacén cubierto	Prevención de contaminación del agua.
Combustible sólido y coque:	Todos	Conducción superior	Almacén cubierto	Si no forma polvo.
Combustibles líquidos y gases a baja presión	Todos	Transportadores cubiertos	Almacenaje registrado Areas confinadas.	Ventilación a contracorriente de las líneas de suministro.
Gases de proceso: Oxígeno, Cloro, CO	 Todos Al, PM, Ni	Conducción superior Conducción de presión reducida	Almacenaje registrado	Control de pérdida de presión, alarmas para gases tóxicos.
Disolventes	Grupo de Cu, Ni, Zn, Metales preciosos, Carbono	Conducción superior Manual	Bidones, tanques	Ventilación a contracorriente de las líneas de suministro.
Productos: Cátodos, alambrón, palanquillas, lingotes, conglomerados etc.	Todos	Depende de las condiciones.	Area de cemento abierta o almacén cubierto.	Sistema de desagüe apropiado.
Residuos de proceso para recuperación	Todos	Depende de las condiciones.	Abierto, cubierto o cerrado según formación de polvo y reacción con agua.	Sistema de desagüe apropiado.
Residuos para desecho (ej. revestimientos de horno)	Todos	Depende de las condiciones.	Naves abiertas, cubiertas o cerradas o recipientes herméticos (bidones) según el material.	Sistema de desagüe apropiado.

2.17.2 Control de proceso

Los principios de las Mejores Técnicas Disponibles incluyen los conceptos de cómo se diseña, opera, controla, asigna personal y mantiene un proceso. Estos factores permiten alcanzar un buen comportamiento en términos de prevención y minimización de emisiones, eficacia de proceso y ahorro de costes. Se utiliza un buen control de proceso para conseguir estas mejoras, así como para mantener condiciones seguras.

El control de proceso se ha desarrollado recientemente en este sector, y se aplica a diversos procesos. Se utilizan las siguientes técnicas:

El muestreo y análisis de materias primas se utiliza comúnmente para controlar las condiciones de la planta. Debe conseguirse una buena mezcla de distintos materiales de partida para obtener una eficacia de conversión óptima y reducir las emisiones y rechazos.

El uso de sistemas de pesaje y medición de material de entrada.

Se utilizan microprocesadores para controlar a velocidad de alimentación del material, las condiciones de los procesos críticos y de combustión, así como adiciones de gas. Se miden varios parámetros para poder controlar los procesos, existiendo alarmas para los parámetros críticos:

- Medición en línea de temperatura, presión (o depresión) de los hornos y volumen o caudal de gases.
- Control de los componentes de los gases (O_2, SO_2, CO).
- El control en línea de la vibración se utiliza para detectar bloqueos y posibles fallos del equipo.
- Medición en línea de intensidad y voltaje de los procesos electrolíticos.
- Medición en línea de las emisiones para controlar los parámetros de proceso críticos.

Medición y control de la temperatura de los hornos de fusión para evitar la producción de vapores de metales y de óxidos metálicos por sobrecalentamiento.

Los operarios, técnicos y otros deben recibir formación continuada y ser evaluados en el uso de las instrucciones operativas, el uso de las modernas técnicas de control descritas , así como sobre las acciones a realizar e importancia de las mismas cuando se producen alarmas.

Optimización de los niveles de supervisión para aprovechar lo anteriormente descrito y mantener la responsabilidad de los operarios.

2.17.3 Recogida de vapores y humos

Las emisiones a la atmósfera se derivan de las etapas de almacenamiento, manipulación, pretratamiento, pirometalurgia e hidrometalurgia. La transferencia de materiales es particularmente importante. Los datos facilitados han confirmado que la importancia de las emisiones fugitivas en muchos procesos es muy elevada, y que las emisiones fugitivas pueden ser mucho mayores que las capturadas y eliminadas. En estos casos, es posible reducir el impacto medioambiental siguiendo la jerarquía de las técnicas de recogida de gases desde el almacenamiento y la manipulación de materiales, reactores u hornos, y desde los puntos de transferencia de materiales. Las posibles emisiones fugitivas deben tenerse en consideración en todas las etapas de diseño y desarrollo del proceso. La jerarquía de recogida de gases de todas las etapas de proceso son:

- Optimización de procesos y minimización de emisiones como el pretratamiento térmico o mecánico de materias secundarias para minimizar la contaminación orgánica del material de alimentación.
- El uso de unidades de proceso u hornos cerrados para evitar las emisiones fugitivas, permitir la recuperación de calor y facilitar la recogida de gases de proceso para otros usos (ej. CO como combustible y SO_2 como ácido sulfúrico) o para su eliminación.
- El uso de hornos semicerrados cuando no se disponga de hornos cerrados.
- La minimización de las transferencias de materias entre los procesos.
- Si estas transferencias son inevitables, es preferible el uso de bateas en lugar de cucharas para materiales fundidos.
- En algunos casos, la restricción de las técnicas a las que eviten las transferencias de materiales fundidos puede evitar la recuperación de algunas materias primas secundarias que de lo contrario entrarían en la corriente residual. En estos casos es apropiado el uso de recogida de vapores secundaria o terciaria.

- Las campanas y conductos diseñados para capturar los vapores derivados de las transferencias y del sangrado de metales, matas o escorias calientes.
- Puede ser necesario el uso de recintos cerrados para hornos o reactores con el fin de evitar la emisión a la atmósfera de vapores perdidos.
- Si el uso de extracción primaria y recinto cerrado puede ser ineficaz, puede usarse un horno totalmente cerrado y extraer el aire de ventilación mediante extractores a un sistema adecuado de tratamiento y evacuación.
- La recogida de humos en el techo consume gran cantidad de energía y debe ser un último recurso.

2.17.4 Eliminación de dióxido de azufre

Las MejoresTécnicas Disponibles para la eliminación de dióxido de azufre dependen del grado de fijación del azufre en una mata o escoria para evitar la formación de dióxido de azufre y de la concentración del gas que se produce. Para gases con una concentración muy baja, un lavador húmedo o semiseco, que produzca yeso para su venta a ser posible, se considera como MTD.

Para gases de mayor concentración, la recuperación del dióxido de azufre mediante absorción con agua fría seguido de una planta de ácido sulfúrico para el gas restante y el desprendimiento y producción de dióxido de azufre líquido a partir de la solución absorbida se considera como MTD si existe un mercado local para el material. El uso de una planta de ácido sulfúrico de doble contacto con un mínimo de cuatro pasadas se considera como MTD. El principio de maximización de la concentración del gas de entrada se considera asimismo como MTD con el fin de que el proceso de eliminación subsiguiente pueda operar a la máxima eficacia. Los siguientes factores se consideran como MTD para una planta de ácido sulfúrico que utilice gases de escape de fundición.

- En una instalación nueva puede usarse una planta de doble contacto y doble absorción con un mínimo de 4 pasadas. Puede usarse un catalizador dopado con cesio para mejorar la conversión. Puede ser posible mejorar los catalizadores existentes durante los periodos de mantenimiento, incorporando catalizadores dopados con cesio al añadir catalizadores. Esto puede ser particularmente efectivo si se utiliza en las pasadas finales, en las que el contenido de dióxido de azufre es bajo, pero para ser plenamente eficaz debe ir acompañado de mejoras en otras áreas.

- Los gases se diluyen antes de las etapas de contacto para optimizar el contenido de oxígeno y dar un contenido de dióxido de azufre de ~ 14% o ligeramente superior para adecuarlo a los límites térmicos del material portador del catalizador. Se requiere dopaje con óxido de cesio para estas altas concentraciones de entrada, ya que permite una menor temperatura de entrada de la primera pasada.

- Para concentraciones bajas y variables de dióxido de azufre (1,5 a 4%), puede usarse una planta de absorción simple como la del proceso WSA en las plantas existentes. El uso de un catalizador dopado con óxido de cesio en la pasada final permite alcanzar un rendimiento óptimo y puede incorporarse durante los cambios rutinarios de catalizador o durante el mantenimiento. Para ser plenamente eficaz, esto debe ir acompañado por mejoras en otras áreas, como la limpieza del gas para evitar el empobrecimiento del catalizador. La conversión a doble contacto es compleja y cara, pero el uso de una planta de contacto simple con desulfurización del gas de salida si es necesario, para producir yeso para su venta, puede permitir ahorro de energía y una menor producción de residuos.

- Los fluoruros y cloruros deben eliminarse para evitar daños en la estructura de la planta en las etapas posteriores.

- El polvo debe ser eliminado de la corriente de gas antes de las etapas de catálisis, dando una calidad del gas final de < 1mg polvo /Nm^3 (ópticamente limpio). El mercurio también debe eliminarse en esta etapa si el contenido de mercurio del material de la alimentación lo hace necesario. Las plantas existentes sin eliminación de mercurio pueden usar un proceso de intercambio iónico o precipitación, por ejemplo como tiosulfato de mercurio, para eliminar el mercurio del ácido si es necesario.

- El trióxido de azufre debe reducirse para dar una concentración de gas de entrada por debajo de ~15 - 25 mg/Nm^3. El ácido diluido producido puede descomponerse y emplearse para la producción de ácido.

- Deben usarse sistemas de calentamiento de gas con control automático si el gas es muy diluido y el calor de la reacción es insuficiente para mantener la temperatura del lecho catalítico.

- Los gases se enfrían a una temperatura que satisfaga el balance de agua de la planta de ácido. La temperatura depende de la concentración de SO_2 del gas y de la concentración del ácido producido. Un gas con un 4 - 6% de SO_2 requiere temperaturas de enfriamiento por debajo de 30 ºC, mientras que un gas con un contenido de SO_2 bastante por encima del 10% puede tolerar temperaturas de gas de aproximadamente 35 – 40 ºC, al producir ácido con una concentración del 98,5%.

- El uso de filtros de bujía para eliminar las neblinas ácidas antes de la chimenea final se considera como MTD en los casos en que se genera una neblina ácida.

2.17.5 Prevención y destrucción de dioxinas

La presencia de dioxinas o su formación durante un proceso debe ser tenida en consideración para muchos de los procesos pirometalúrgicos utilizados para producir metales no férreos. En los capítulos de los metales específicos se reportan ejemplos particulares, y en dichos casos los siguientes factores se consideran como MTD para la prevención de la formación de dioxinas y la destrucción de las que pueda haber presentes.

- Control de calidad de la chatarra utilizada como materia prima según el proceso utilizado. El uso del material de alimentación correcto para el horno o proceso concreto. La selección y clasificación para evitar la adición de material contaminado con materia orgánica o precursores puede reducir el potencial de formación de dioxinas.

- El uso de sistemas de postcombustión correctamente diseñados y operados y un enfriamiento rápido de los gases calientes hasta < 250 °C.

- El uso de condiciones de combustión óptimas. El uso de inyección de oxígeno en la parte superior de un horno para asegurar la combustión completa de los gases del horno si es necesario.

- La absorción sobre carbón activado en un reactor de lecho fijo o móvil, o mediante inyección en la corriente de gas, y su eliminación como polvo de filtro.

- Eliminación de polvo muy eficaz, por ejemplo filtros cerámicos, filtros de tejido de gran eficacia o tren de limpieza de gases antes de una planta de ácido sulfúrico.

- El uso de una etapa de oxidación catalítica o filtros de tejido que incorporen un recubrimiento catalítico.

- El tratamiento de los polvos recogidos en horno a alta temperatura para destruir las dioxinas y recuperar metales.

Las concentraciones de las emisiones asociadas con estos procesos son < 0,1 a 0,5 ng/Nm3 según el material de alimentación, el proceso de fundición o fusión y las técnicas o combinación de técnicas empleadas para la eliminación de dioxinas.

2.17.6 Eliminación de mercurio

La eliminación de mercurio es necesaria para utilizar algunas materias primas que lo contienen. En los capítulos específicos de los distintos metales se dan ejemplos concretos, y en tales casos las siguientes técnicas se consideran como MTD.

- El proceso Boliden/Norzink con la recuperación de la solución de lavado y producción de mercurio metal.
- El proceso Bolchem con la filtración del sulfuro de mercurio para permitir el retorno del ácido a la etapa de absorción.
- Proceso Outokumpu.
- Proceso con tiocianato sódico.
- Filtro con Carbón Activado. Se utiliza un filtro de adsorción con carbón activado para eliminar el vapor de mercurio de la corriente de gas, así como las dioxinas.

Para procesos en los que la eliminación del mercurio de los gases no es practicable, los dos procesos para reducir el contenido de mercurio en el ácido sulfúrico producido en la producción de metales no férreos se consideran como MTD.

- Proceso de intercambio iónico Superlig.
- Proceso con yoduro potásico.

Las emisiones asociadas con los procesos arriba indicados están relacionadas con el mercurio residual que haya presente en el ácido producido, la especificación del producto es normalmente < 0,1 ppm (mg/l) y es equivalente a 0,02 mg/Nm^3 en el gas limpio.

2.17.7 Tratamiento de efluentes y reutilización del agua

Las mejores técnicas disponibles son una combinación de los distintos métodos de tratamiento y pueden sólo escogerse para cada centro de producción concreto, teniendo en consideración los factores específicos del centro. Los factores más importantes a decidir, que en casos específicos pueden ser la mejor solución para minimizar la cantidad de aguas residuales y la concentración de los contaminantes, son los siguientes:

- El proceso en el que se genera el agua residual,
- La cantidad de agua,
- Los contaminantes y sus concentraciones.

Los contaminantes más comunes son metales y sus compuestos, y el tratamiento inicial se centra en la precipitación de los metales en forma de hidróxidos o sulfuros en una o más etapas, seguido de la separación del precipitado por sedimentación o filtración. La técnica varía según la combinación de los contaminantes, pero la siguiente tabla resume los métodos descritos anteriormente.

Tabla 2.29: Resumen de las corrientes de aguas residuales.

Fuente del agua residual	Metales asociados producidos	Métodos de minimización	Métodos de tratamiento
Agua de proceso	• Producción de alúmina • Rotura de baterías ácidas de plomo. • Decapado.	• Retorno al proceso en la medida de lo posible.	• Neutralización y precipitación. • Electrólisis.
Agua de refrigeración indirecta	• Refrigeración de hornos para la mayoría	• Uso de un sistema de refrigeración cerrado.	• Sedimentación.
	de metales. • Enfriamiento de electrolitos para Zn	• Control del sistema para detectar fugas.	
Agua de enfriamiento directo	• Moldeo de Cu y Al . • Electrodos de carbono • Ferroaleaciones • Cromo metal	• Sedimentación u otro tratamiento. • Sistema de refrigeración cerrado.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Granulación de escoria	• Cu, Ni, Pb, Metales preciosos, ferroaleaciones	• Reutilización en un sistema cerrado.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Electrólisis	• Cu, Ni, Zn Mg	• Sistema cerrado. • Electro-recuperación del sangrado de electrolito.	• Neutralización y precipitación.
Hidrometalurgia (extracción de fondo)	• Zn, Cd	• Sistema cerrado. • Tratamiento de extracción de fondo.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Sistema de eliminación (extracción de fondo)	• Lavadores húmedos. • PEs y lavadores húmedos para plantas de ácido.	• Tratamiento de extracción de fondo. Reutilización de las corrientes de ácido diluido si es posible.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario.
Agua superficial	• Todos	• Buen almacenamiento de materias primas.	• Sedimentación. • Precipitación si es necesario. • Filtración.

2.17.8 Otros procesos comunes

Las Mejores Técnicas Disponibles para todos los otros procesos discutidos en este capítulo son aquellas que comprenden las técnicas a considerar en la determinación de las MTD en las distintas subsecciones. Por consiguiente, debe hacerse referencia a las dichas a considerar. En los capítulos de los metales específicos se facilita información más detallada y cuando es necesario se discuten los factores individuales que pueden afectar la elección de la técnica.

2.18 Técnicas Emergentes

Las técnicas emergentes aquí indicadas son sólo para los procesos comunes descritos anteriormente en la sección de Mejores Técnicas Disponibles. Las técnicas emergentes para otros procesos se detallan en los capítulos posteriores.

No se señalaron técnicas adicionales para Almacenamiento y Manipulación de Materiales, Eliminación de Mercurio y Prevención y Destrucción de Dioxinas.

2.18.1 Eliminación de azufre

Se han identificado las siguientes técnicas emergentes [tm 209, JOM 1999].

- La combinación de una planta de ácido sulfúrico de contacto simple y de una planta de ácido de columna modificada permite alcanzar una eficacia de eliminación de azufre superior en dos órdenes de magnitud a la de los procesos convencionales. Se afirma que la concentración de SO_2 del gas de salida es < 3ppm.
- Un proceso biológico de desulfurización de los gases de combustión que convierte el SO_2 de las emisiones al aire o al agua en azufre elemental con una eficacia de eliminación superior al 95%.

3 PROCESOS PARA LA PRODUCCION DE COBRE Y SUS ALEACIONES (INCLUIDOS Sn Y Be) A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS PRIMARIAS O SECUNDARIAS

3.1 Técnicas y Procesos Aplicados

3.1.1 Cobre primario

El cobre primario puede producirse a partir de concentrados primarios y otros materiales mediante métodos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos [tm 22, EC 1991; tm 27, HMIP Cu 1993; tm 26, PARCOM 1996]. Los concentrados contienen diversas cantidades de otros metales además de cobre y las etapas de proceso se utilizan para recuperarlas en la medida de lo posible [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Los procesos genéricos se discuten a continuación.

3.1.1.1 Método pirometalúrgico

Este método comporta una serie de pasos, según el concentrado utilizado. La mayoría de concentrados son sulfurosos, y las etapas involucradas son tostación, fundición, conversión, refinado y electro-refinado. Los resúmenes de todos los hornos mencionados en esta sección se incluyen en el Capítulo 2, y en este capítulo se facilita más información, en el apartado de técnicas [tm 92, Copper Expert Group 1998].

3.1.1.1.1 Fundición de concentrado a mata

La tostación parcial convierte los sulfuros complejos de hierro y cobre del concentrado en sulfuros simples, calentando el mineral o concentrado en condiciones oxidantes. Los gases derivados del azufre generado por este proceso se dirigen a plantas ácidas in situ para ser utilizados como materia prima en la producción de ácido sulfúrico o la producción de SO_2 líquido. La etapa de fundición se utiliza luego para separar el sulfuro de cobre de los otros sólidos presentes en los minerales mediante la formación de silicatos, especialmente silicatos de hierro. Esta reacción depende de la gran afinidad del cobre por el azufre en comparación con otras impurezas metálicas. La tostación parcial no se emplea normalmente.

La tostación y la fundición se realizan normalmente de forma simultánea en un mismo horno a temperaturas elevadas para producir una fundición que puede separarse formando una mata (sulfuro de cobre con algo de sulfuro de hierro) y una escoria rica en hierro y sílice. Normalmente se agrega un fundente que contiene sílice y, si es necesario, cal (CaO) a la fundición para facilitar la formación de la escoria.

Se emplean dos procesos básicos de fundición, la fundición en baño y la fundición flash. El proceso de fundición flash utiliza enriquecimiento con oxígeno para producir una operación autotérmica (autógena) o casi autotérmica. Los procesos de fundición en baño utilizan por lo general un menor grado de enriquecimiento con oxígeno. El uso de oxígeno también aumenta las concentraciones de dióxido de azufre, lo que hace que la recogida del gas sea más eficaz utilizando uno de los sistemas de recuperación de azufre (normalmente la producción de ácido sulfúrico o la producción de dióxido de azufre líquido).

La fundición en baño se realiza en una serie de hornos patentados, como hornos de Reverbero, Eléctrico, ISA Smelt, Noranda, Mitsubishi, Teniente, Baiyin, Vanyucov [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 137, Cu Expert Group 1998]. Todos los procesos se basan en los procesos de tostación y fundición que tienen lugar en un baño fundido, en los que la separación de escoria y mata y el sangrado tiene lugar de diversas formas.

Tabla: 3.1: Tecnología de fundición de cobre primario [tm 137 Copper Expert Group 1998]

Proceso de Fundición	Estado de Desarrollo		Aspectos Económicos		Comentarios
	Operación a escala industrial	Comportamiento medio ambiental: Potencial o limitaciones	Variabilidad económica	Producción: Potencial y / o limitaciones	
Fundición en horno de reverbero	Establecida	Limitado en cierta medida	Aceptable	Limitación del ritmo de fundición de una unidad.	
Tostación parcial y fundición en horno eléctrico	Establecida	Bueno	Buena	Limitación del ritmo de producción.	¿Tamaño del horno de tostación posible factor limitante?
Fundición flash Outokumpu y convertidor Pierce-Smith	Establecida	Bueno	Buena	Velocidad muy elevada posible en 1 unidad, según el diseño del horno y el tipo de concentrados.	Referencia mundial para fundición de cobre primario, todavía con potencial para mejorar.
Fundición flash Inco	Establecida	Bueno	Buena	Limitación del ritmo de fundición probado por unidad.	Tamaño de los hornos instalados. Tiene mayor potencial.
Aplicación Contop	Se usa en 1 planta	Probablemente bueno	Probablemente aceptable	Limitación en función del tamaño del horno y del número de quemadores que pueden instalarse.	Quemador de ciclón sólo. Característica del proceso introducida a escala industrial.
Convertidor Teniente, proceso Noranda	Establecida	Bueno	Buena	Limitación de la velocidad de fundición por el tamaño del reactor y los límites de enriquecimiento con O_2	Frente a otros procesos, la mayor relación de entrada de aire requiere más esfuerzo de captura de gases de proceso.
ISA Smelt	Se usa en 3 plantas	Bueno	Buena	Límite superior de producción no determinado.	Potencial de mejora.
Proceso Vanyucov	6 hornos a escala industrial en Rusia y Kazajstán	Potencialmente bueno	Probablemente buena	No se dispone de un análisis final.	Información no disponible para un juicio fundado; en general puede tener un potencial considerable.
Proceso Baiyin	Se desconoce el número exacto. Al menos 2 unidades industriales en operación.	Potencialmente bueno	Desconocida	No se dispone de un análisis final; la información disponible sugiere ritmos de producción de hasta 75000 t/a de Cu.	Información no disponible para un juicio fundado. Puede tener un potencial considerable.
Fundición flash directa de cobre blíster Outokumpu	Establecida	Bueno	Buena		Aplicable a concentrados con bajo nivel de hierro/escoria
Proceso Mitsubishi para fundición continua de cobre	Establecida	Bueno	Buena	Hasta ahora se ha alcanzado un nivel de producción > 200.000 t/a	Potencial de mayor desarrollo.
Convertidor flash en continuo Kennecott/Outokumpu	Opera en una planta. Segunda planta en fase de encargo.	Bueno	Buena	Mayor ritmo de producción utilizado para justificar la inversión.	Potencial de desarrollo sustancial.
Convertidor en continuo Noranda	Recientemente instalado en Horne a escala industrial	Bueno	Sin datos disponibles para un análisis final	No hay datos disponibles para un análisis final	Su potencial efectivo todavía debe determinarse cuando se disponga de datos operativos.

Las diferencias entre estos procesos pueden ser grandes, por ejemplo en la posición de los puntos de adición de aire/oxígeno, algunos procesos operan en discontinuo. Los hornos de fundición en baño operan generalmente con un horno de retención o un sedimentador separado. Las descripciones generales se dan en el Capítulo 2 y en otras partes del documento [tm 137, Cu Expert Group 1998].

La Fundición Flash se realiza en hornos Outokumpu o INCO [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996] o en un horno de ciclón (Contop). Los procesos Outokumpu y de ciclón utilizan enriquecimiento con oxígeno, mientras que el proceso INCO utiliza oxígeno técnico. La fundición flash se basa en la tostación y la fundición de concentrado seco transformándolo en partículas suspendidas en el aire. Las partículas reaccionadas caen en una cámara de sedimentación, donde se produce la separación de mata y escoria, en ocasiones se emplea combustible adicional en el sedimentador para mantener la temperatura.

La mata y la escoria son posteriormente sangradas y procesadas, y los gases pasan desde el horno, a través de una cámara vertical, a un intercambiador de calor.

Además de las técnicas arriba indicadas, a nivel mundial pueden encontrarse otras técnicas además de los procesos de fundición en baño o flash [tm 137, Copper Expert Group 1998].

Los Convertidores Rotatorios de Inyección Superior (TBRCs) se utilizaban asimismo en la fundición de cobre primario. Ahora ya no se utilizan debido a sus elevados costes operativos.

Los hornos de reverbero también se emplean para la fundición de mata, pero no dentro de la UE. Estos hornos no utilizan el contenido energético del azufre y el hierro del concentrado y se basan en el uso de combustible fósil para fundir los concentrados mediante los gases de combustión calientes que pasan sobre la solera. El proceso no es por lo tanto tan eficiente como los otros procesos descritos. Los gases de combustión se agregan al volumen general de gas y producen un contenido de dióxido de azufre muy bajo, que es muy difícil de eliminar de forma efectiva. El uso de hornos de reverbero se ha reducido considerablemente desde los años 70. El contenido de SO_2 de los gases de escape es normalmente muy bajo, por lo que no puede tratarse en una planta de ácido.

Tabla 3.2: Uso mundial de las tecnología de fundición

Proceso	Número de fundiciones que utilizan la tecnología	Número de hornos	Producción de cobre blíster blístee 1998 '000 t/a
Fundición Flash Outokumpu	26	26	3.801
Fundición Flash Directa de Cobre Blíster Outokumpu	2	2	238
Horno de Reverbero	27	37	1.604
Reactor El Teniente	7	12	1.344
Horno Eléctrico	6	8	560
Alto Horno	14	29	548
Proceso Mitsubishi	4	4	497
Fundición Flash Inco	3	3	448
Proceso Vanuykov	3	5	448
ISA Smelt	3	3	269
Reactor Noranda	2	2	197
Contop	1	1	116
Proceso Baiyin	1	1	57
Kivcet	1	1	15

3.1.1.1.2 Conversión

Se utilizan dos tipos de proceso de conversión: el proceso en discontinuo convencional, que es el más comúnmente utilizado, y el proceso de conversión en continuo [tm 137 Copper Expert Group 1998].

a) Conversión en discontinuo

El proceso de conversión en discontinuo comprende dos etapas. Se realiza inyectando una mezcla de aire/oxígeno a través de la mata recuperada de la operación de fundición. Lo más común es utilizar un horno de baño cilíndrico [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996] y se realizan adiciones de fundente. En la primera etapa se oxida el hierro y parte del azufre, formándose escoria y dióxido de azufre gas; la escoria es retirada periódicamente de la superficie y es procesada para recuperar cobre. Normalmente, la extracción de la primera etapa se realiza en varios pasos con adiciones crecientes de mata. En la segunda etapa, la extracción de cobre, el sulfuro de cobre es oxidado a cobre blíster (98.5% Cu) y se forma más dióxido de azufre gas. El cobre blíster se sangra en final de la inyección de cobre. El dióxido de azufre que se forma es tratado posteriormente para la recuperación de azufre, normalmente en una planta de ácido sulfúrico.

La reacción es fuertemente exotérmica y también volatiliza las impurezas metálicas como plomo y zinc, que se captura en la planta de eliminación y se recuperan. El calor del proceso también puede usarse para fundir chatarra anódica y otras chatarras de cobre sin la adición de calor primario. Puede haber variaciones en concentración de dióxido de azufre durante las diversas etapas de conversión según el tipo de horno utilizado.

Los convertidores Pierce-Smith (P.S.) y tipo Hoboken se utilizan en discontinuo (en este capítulo se denominan convertidores Pierce-Smith o similares). Se trata de hornos de baño cilíndrico con toberas dispuestas lateralmente para inyección de aire/oxígeno [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996]. El horno ISA Smelt también se ha utilizado para la conversión en discontinuo de mate en cobre blíster.

Los Convertidores Rotatorios de Inyección Superior (TRBC) se utilizaban en el pasado para la conversión en discontinuo de material de cobre primario, pero ahora ya no se utilizan.

b) Conversión continua

Los procesos de conversión continua que se utilizan industrialmente son el horno de conversión flash Kennecott / Outokumpu [tm 53 & tm 67 Kennecott 1997; tm 63 Outokumpu 1995], el horno Mitsubishi (que forma parte del proceso integral Mitsubishi) y – muy recientemente – el convertidor Noranda [tm 137 Copper Expert Group 1998].

Los convertidores Mitsubishi y Noranda reciben material de alimentación fundido para su conversión. En contraste, el proceso Kennecott / Outokumpu presenta las siguientes características: la mata de un horno de fundición se granula primero en agua, se tritura y se seca. El material se mezcla luego con agentes escoriantes y se alimenta al quemador de concentrado de un horno de fundición flash con una atmósfera rica en oxígeno; la conversión tiene lugar en las partículas suspendidas en el aire. El proceso produce una concentración elevada y constante de dióxido de azufre que se recupera. La escoria y el cobre blíster se sangran para su proceso ulterior. El uso de mata triturada permite que la calidad de la mata esté equilibrada con la velocidad de alimentación y el grado de enriquecimiento de oxígeno para obtener una eficacia de conversión óptima, y también permite desligar los procesos de producción y conversión de mata.

Existen diferencias significativas entre los conceptos de los convertidores en continuo y en discontinuo en cuanto operación y a variaciones en la producción de dióxido de azufre a lo largo de los ciclos de conversión. También existen variaciones en la facilidad de recogida de vapores durante la carga, así como en la capacidad de fundir chatarra anódica. En un caso, los gases de

ventilación del ala del convertidor se recogen y se tratan, mientras que en otro caso se emplea un sistema inteligente de recogida de vapores [tm 201, Velten 1999].

3.1.1.1.3 Refinado al fuego

Se trata de un paso de purificación adicional aplicado al metal bruto (cobre blíster) producido por la etapa de conversión. El paso de refinado comporta la adición de aire y luego de un reductor (hidrocarburos, etc.) para reducir cualquier óxido presente [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 92 Copper Expert Group 1998].

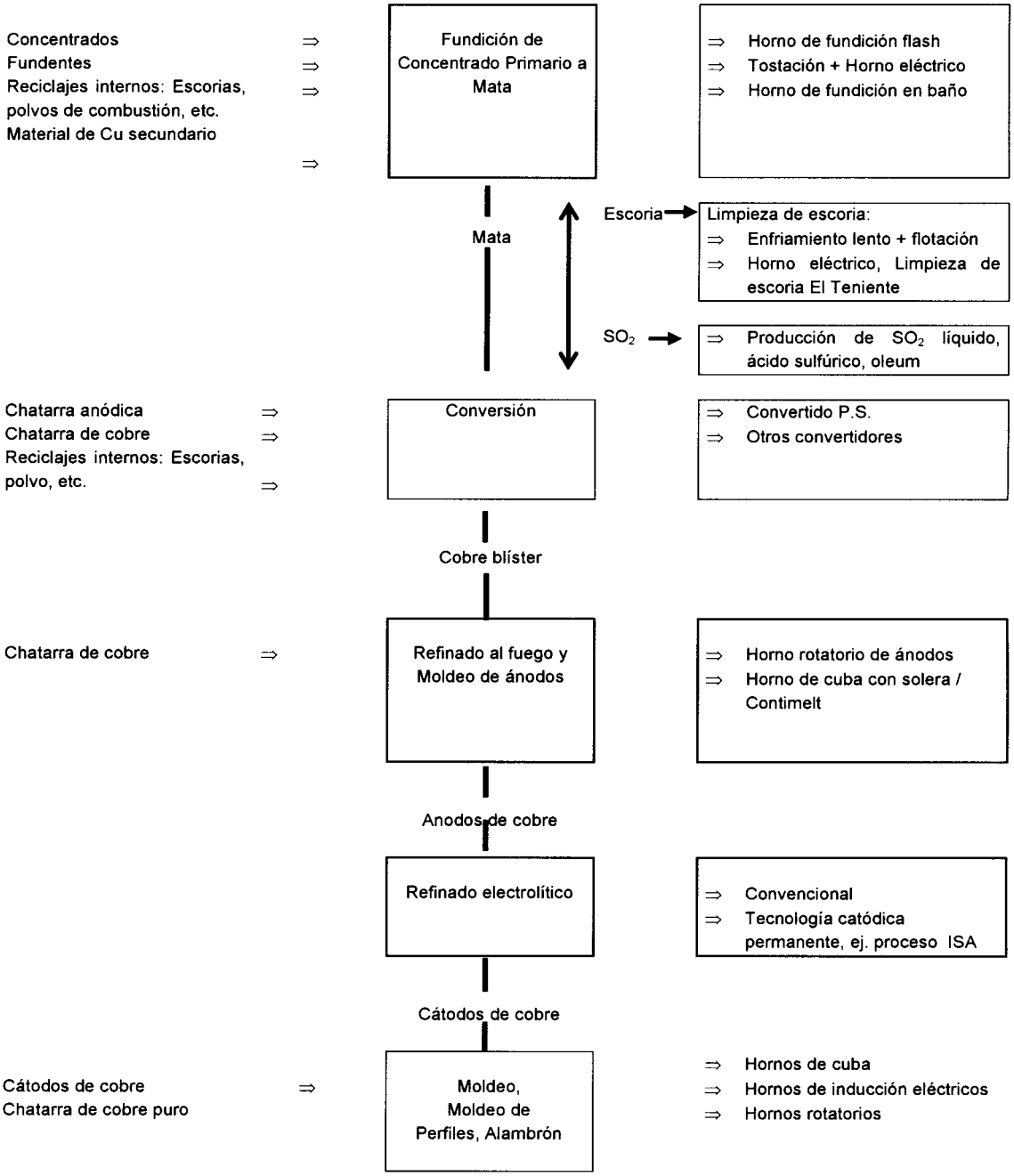


Figura 3.1: Ruta de Producción de Cobre Primario.

El refinado al fuego se consigue inyectando en primer lugar aire a través del metal fundido para oxidar las impurezas y eliminar las trazas finales de azufre produciendo una pequeña cantidad de escoria. Luego se agrega una fuente de agente reductor, como gas natural o propano, para reducir el óxido de cobre que se forme. También puede utilizarse amoníaco como reductor, pero se ha indicado que aumenta los niveles de NO_2 [tm215, Mining Engineering July 1999]. Históricamente se utilizaban varas o troncos de madera como fuente de reductor (y todavía se emplean en unos pocos casos), por lo que el proceso se denomina "Poling". Muchas instalaciones utilizan un sistema de postcombustión para tratar los gases durante el proceso de poling. En las fundiciones primarias y algunas secundarias se utilizan hornos rotatorios cilíndricos (Hornos de Anodos) para el refinado al fuego. Estos hornos son similares al convertidor Pierce-Smith y utilizan toberas para agregar gas. Se cargan con cobre fundido. Algunos procesos secundarios utilizan un horno de reverbero con lanzas para la adición de aire, y se alimentan con cobre de convertidor y chatarra de cobre. Algunos hornos de reverbero son basculantes y están equipados con toberas.

El sistema Contimelt también se utiliza para el refinado al fuego cuando el material de entrada es sólido y debe fundirse primero. Durante la producción de semis también se aplica a veces refinado al fuego. También se usan combinaciones de hornos de cuba con solera (para fusión en discontinuo) y hornos rotatorios (para reducción en discontinuo). Estos sistemas pueden usarse para materias primas primarias (cobre blíster) y secundarias (chatarra).

El metal del horno de ánodos se moldea luego en ánodos. La técnica más comúnmente utilizada es una rueda de moldeo compuesta por una serie de moldes en forma de ánodo en el perímetro de una mesa giratoria. El metal fundido se dosifica en los moldes para obtener un espesor consistente en los ánodos, y la rueda gira, pasando los ánodos por una serie de chorros de agua para enfriarlos.

Como alternativa al molde de "moldeo con paradas" de un sistema de rueda, también se producen ánodos de cobre con un moldeador de doble correa Hazelett. Este sistema produce una banda de cobre con el espesor deseado de los ánodos. A partir de la banda pueden obtenerse ánodos cortando con la forma tradicional de los ánodos o, según el sistema "Contilanod", moldeando talones de ánodos en bloques laterales especiales de estancamiento espaciados a intervalos definidos en el moldeador. Las placas de ánodos preformadas se cortan con una antorcha de plasma o cizallas especiales. La ventaja de este método es la uniformidad de los ánodos producidos; no obstante, el sistema requiere un cuidadoso mantenimiento, y los costes operativos son comparativamente mayores.

3.1.1.1.4 Refinado electrolítico

En este sistema de utiliza una célula electrolítica consistente en una ánodo de cobre moldeado y un cátodo, colocados en un electrolito que contiene sulfato de cobre y ácido sulfúrico. El cátodo es una preforma de cobre puro (placa de arranque) o una placa de acero inoxidable – placa de cátodo permanente (Proceso Mount ISA y sistema Noranda/Kidd Creek) [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996; tm 92, Copper Expert Group 1998]]. A una elevada densidad de corriente y bajo voltaje, los iones de cobre son disueltos desde el ánodo impuro y pasan a la solución, desde donde se depositan en el cátodo. Se extrae cobre del ánodo en la medida en que el ánodo restante es todavía bastante fuerte mecánicamente para evitar un colapso. El ánodo restante es luego reciclado al proceso de producción, normalmente al convertidor, para enfriar la reacción y recuperar el cobre. Si se utilizan placas de cátodo permanentes, los depósitos de cobre puro pueden desprenderse y luego, como placas de cátodo de cobre sólido, fundirse y moldearse a la forma deseada.

Durante el electro-refinado se separan otros metales contenidos en los ánodos, lo metales solubles como el Ni se disuelven en el electrolito, y los metales insolubles como los metales

preciosos, Se y Te forman un limo anódico que sedimenta en las células electrolíticas. Los lodos anódicos se extraen periódicamente de las células, recuperándose los metales valiosos (ver Capítulo 6, Metales Preciosos).

Una parte del electrolito se sangra del sistema. El cobre se elimina por electro-recuperación o, en algunas plantas, una parte se recupera como sulfato de cobre. La evaporación, cristalización y ulterior refinado recuperan el níquel como sulfato de níquel. Las siguientes técnicas se utilizan para el tratamiento y eliminación de arsénico: Extracción con disolventes; Precipitación durante la electro-recuperación final de cobre; Precipitación desde el "ácido negro". En algunos casos se produce arseniato de cobre, que se convierte a arseniato de cobre y cromo, que se utiliza como conservante de la madera.

La eliminación de impurezas durante el refinado electrolítico está diseñada para producir un cobre catódico con una calidad al menos igual o mejor que el estándar "calidad A" de la Bolsa de Metales de Londres. En la tabla siguiente se muestra un ejemplo de la composición de los ánodos y la calidad e los cátodos obtenidos. Nótese que el nivel de impurezas en el ánodo afecta a la calidad del cátodo; el nivel de impureza de los ánodos depende asimismo de la fuente del concentrado o materia prima secundaria.

Tabla 3.3: Ejemplo de eliminación de impurezas durante el refinado electrolítico [tm 124, DFIU Cu 1999]

Elemento	Contenido en el Anodo* g/t	Contenido en el Cátodo g/t
Plata	600 - 720	9 - 10
Selenio	50 - 510	< 0.5
Teluro	20 - 130	< 0.5
Arsénico	700 - 760	< 1
Antimonio	330 - 700	< 1
Bismuto	60	< 0.5
Plomo	990 - 500	< 1
Níquel	1000 - 5000	< 3

Nota. *La calidad del ánodo depende de la composición de la materia prima.

La tendencia actual es el uso de células más grandes con mayor número de electrodos en la sección de tanques y el empleo de formadores de cátodos de acero inoxidable [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Se observa una mejora en la eficiencia cuando estos factores se combina con un buen control de calidad de los ánodos. El control de calidad es necesario para asegurar que los ánodos sean rectos y planos, hagan buen contacto eléctrico y hayan sido adecuadamente refinados al fuego. De forma similar, hay asimismo una mejora en la calidad de los cátodos usando preformas de acero inoxidable, ya que de este modo se reduce la cantidad de impurezas que se arrastran mecánicamente y se incorporan al cátodo. Estas preformas catódicas dan una aumento en la eficacia de corriente del 97% o incluso más. Las secciones de tanques modernas utilizan un alto grado de automatización para los cambios de cátodos y ánodos y el desprendimiento de los depósitos catódicos de las placas catódicas permanentes [tm 22, EC 1991; tm 26, PARCOM 1996]. También puede usarse placas de arranque de cobre preparadas mecánicamente en lugar de preformas de acero inoxidable.

3.1.1.1.5 Tratamiento de escorias

Las escorias producidas por la fundición primaria con altas calidades de mata y por las etapas de conversión son ricas en cobre y son sometidas a una serie de procesos de tratamiento de escorias [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Un proceso es el uso de un horno eléctrico para

la reacción de la escoria con carbón en forma de menudo de coque o con los electrodos mismos, y para la sedimentación de la mata de coque que se forma para producir una escoria inerte. Los hornos eléctricos pueden operarse en continuo o en discontinuo. La escoria de convertidor puede también devolverse directamente al horno eléctrico de limpieza de escoria o al horno de fundición. Alternativamente se emplean asimismo procesos de flotación una vez la escoria ha sido enfriada lentamente, triturada y molturada. El concentrado obtenido es una parte rica en cobre y se devuelve a la fundición. Este método se emplea únicamente cuando hay suficiente espacio disponible y los residuos pueden ser adecuadamente tratados y desechados.

También se practica el tratamiento en horno eléctrico de la escoria de horno de fundición y el tratamiento separado de la escoria de convertidor mediante enfriamiento lento y flotación. Las escorias de los procesos de tratamiento de escorias se utilizan para proyectos de ingeniería civil, construcción de carreteras, laderas fluviales y aplicaciones similares, así como para granalla, ya que a menudo tienen propiedades superiores a las de los materiales alternativos.

Otras escorias ricas en cobre como las escorias de refinado se recirculan normalmente a una etapa de proceso anterior, principalmente a conversión o, en fundiciones secundarias, a la etapa de fundición.

3.1.1.2 La vía hidrometalúrgica

Este proceso se aplica normalmente a minerales de óxidos o de mezcla de óxidos y sulfuros en la propia mina, donde hay suficiente espacio para formar las zonas de lixiviación y

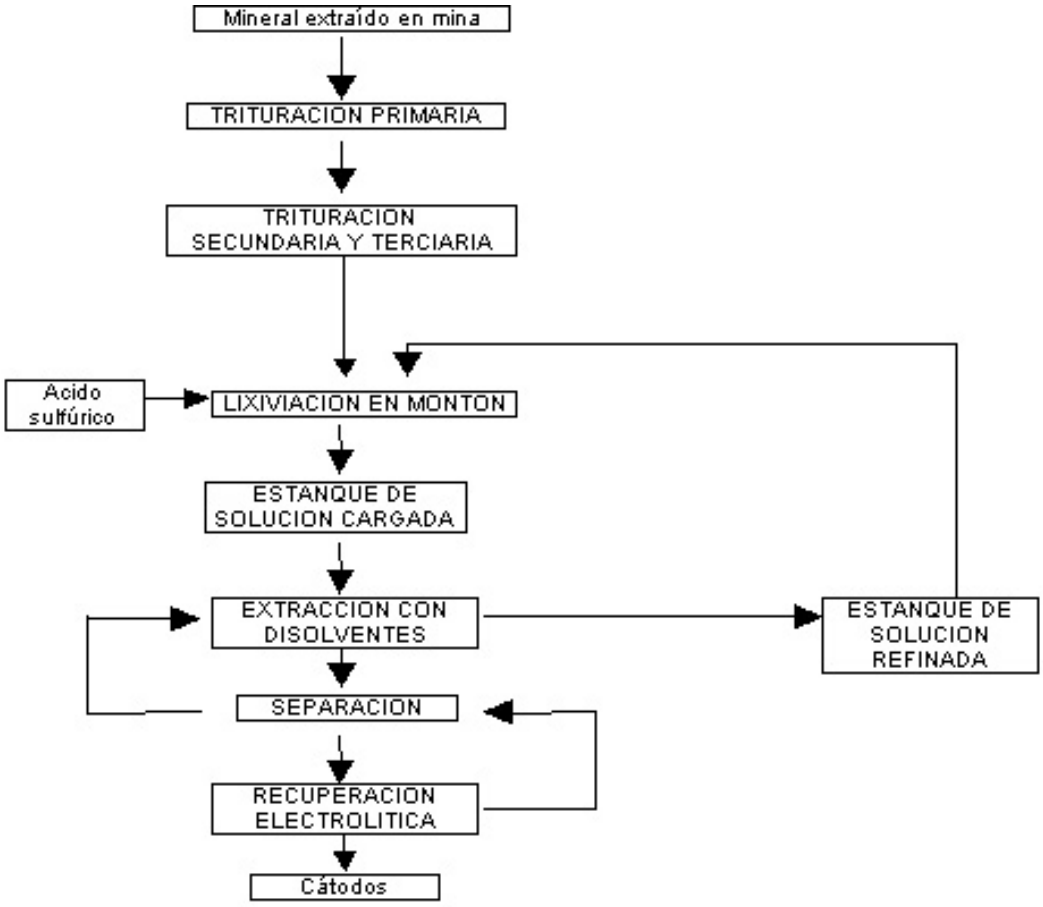


Figura 3.2: Diagrama de flujo de un proceso de lixiviación en montón [tm 140, Finland Cu 1999].

tratamiento. El proceso es particularmente útil para los minerales que son difíciles de concentrar por los medios convencionales y que no contienen metales preciosos [tm 55 & tm 56 Outokumpu 1997; tm 137, Copper Expert Group 1998]. Algunos procesos patentados están en fase de desarrollo y se indican más adelante en el apartado de técnicas emergentes.

La vía hidrometalúrgica comporta la trituración del mineral, seguido de lixiviación con ácido sulfúrico, en ocasiones en presencia de especies biológicas, utilizando procesos de montones, cuba o agitación [tm 137, Cu Expert Group 1998]. La solución producida de la lixiviación es luego clarificada, purificada y concentrada mediante extracción con disolventes. En la figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo de la vía hidrometalúrgica.

El cobre es luego eliminado por electro-recuperación. El proceso de recuperación electrolítica se diferencia de la recuperación electrolítica en la forma del ánodo. La electro-recuperación utiliza un ánodo inerte que puede ser de plomo o titanio, y los iones metálicos se eliminan de la solución y se deposita en el cátodo del mismo modo que en el electro-refinado. El metal se desprende de los cátodos del mismo modo que si se utilizan preformas catódicas permanentes. El electrolito se devuelve luego al circuito de extracción de disolvente. Normalmente se sangra parte del electrolito para el control de las impurezas, lo que podría haberse realizado durante la extracción con disolvente.

3.1.2 Producción secundaria

El cobre secundario se produce mediante procesos pirometalúrgicos. Las etapas de proceso utilizadas dependen del contenido en cobre de la materia prima secundaria, de su distribución de tamaños y de otros componentes [tm 92, Cu Expert Group 1998; tm 124, DFIU Cu 1999]. Al igual que en el cobre primario, las distintas etapas se utilizan para eliminar estos componentes y recuperar metales en la medida de los posible de los residuos que se producen.

El material de alimentación secundario puede contener materias orgánicas como recubrimientos, o ser de naturaleza aceitosa, y las instalaciones lo tienen en cuenta utilizando métodos de eliminación de aceites y recubrimientos, o mediante un correcto diseño del horno y del sistema de eliminación. La finalidad es poder acomodar el aumento de los volúmenes de gases de combustión, destruir los COVs y minimizar la formación de dioxinas o destruirlas. El tipo de pretratamiento aplicado o el horno utilizado depende de la presencia de materias orgánicas, del tipo de material de entrada, es decir, del contenido de cobre y otros metales contenidos, y si son de tipo oxídico o metálico.

Si se utiliza un horno como un convertidor para fundir chatarra impura de latón y separar los metales contenidos, los elementos de aleación se volatilizan del cobre, produciendo cobre negro y un polvo de filtro rico en zinc.

Se utiliza una amplia gama de materias primas secundarias, algunas de las cuales se describen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Producción de materias primas secundarias de la producción de cobre [tm 124, DFIU Cu 1999]

Tipo de material	Contenido de Cu [% peso]	Fuentes
Lodos mixtos de cobre	2 – 25	Galvanoplastia
Chatarra informática	15 – 20	Industria electrónica
Lodos de cobre	2 – 40	Galvanoplastia
Material de cobre-hierro (en terrones o triturado) de inducidos, estátores, rotores, etc.	10 – 20	Industria eléctrica
Escorias de latón, cenizas y escorias con cobre	10 – 40	Fundiciones, plantas de productos semiacabados
Escorias de latón rojo, cenizas y escorias con cobre	10 – 40	Fundiciones, plantas de productos semiacabados
Material de trituradora	30 – 80	Plantas de trituración
Radiadores de cobre-latón	60 – 65	Automóviles
Chatarra mixta de latón cobrizo	70 – 85	Contadores de agua, engranajes, válvulas, grifos, componentes de maquinaria, cajas de cojinetes, hélices, accesorios
Chatarra ligera de cobre	88 – 92	Láminas de cobre, aleros, canales, calderas de agua, calentadores
Chatarra pesada de cobre	90 – 98	Láminas, punzones e cobre, raíles de deslizamiento, cables, tuberías
Chatarra mixta de cobre	90 – 95	Chatarra de cobre ligera y pesada
Gránulos de cobre	90 – 98	De la trituración de cables
Chatarra de cobre puro Nº1	99	Productos semiacabados, cable, recortes, bandas

Las etapas utilizadas para la producción secundaria de cobre son generalmente similares a las utilizadas para la producción primaria, pero la materia prima es normalmente oxídica o metálica, y por lo tanto las condiciones de proceso varían. La fundición de materias primas secundarias utiliza por lo tanto condiciones reductoras.

3.1.2.1 Etapa de fundición secundaria

Para material de calidad baja o media se utilizan una serie de hornos, como Altos Hornos, Hornos Mini-Smelter, Hornos de Rotatorios de Inyección Superior (TRBC), Hornos de Arco Eléctrico Sumergido, Hornos ISA Smelt, Hornos de Reverbero y Hornos Rotatorios [tm 27, HMIP Cu 1993; tm 92, Cu Expert Group 1998; tm 124, DFIU Cu 1999]. El tipo de horno utilizado depende del contenido de cobre y de la materia prima secundaria, de su tamaño y otros componentes. La fundición y refinado de cobre secundario es por lo tanto compleja, y el tipo de material secundario que puede procesarse depende de las instalaciones y hornos concretos que se hallen disponibles [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Los detalles sobre los hornos se incluyen en la sección 2.

Se agrega hierro (en forma de cobre férreo, chatarra normal de hierro, etc.), carbono (en

forma de coque o gas natural) y fundentes para reducir los óxidos metálicos si es necesario, y los procesos se adaptan al material de alimentación. Los vapores de los hornos contienen metales volátiles y óxidos metálicos como los de zinc, plomo y estaño, que pueden recuperarse como metal refinado, aleación u óxido, y que también contienen polvo, dióxido de azufre, dioxinas y COVs, según las materias primas.

El horno Mini-Smelter se utiliza asimismo para la producción de cobre secundario con chatarra que contiene hierro y estaño. En esta aplicación, el hierro es el reductor en la primera etapa para producir cobre metálico, y luego se inyecta oxígeno en la fundición para oxidar el hierro y otros metales (Pb, Sn) presentes, que se recuperan en la escoria. La oxidación del contenido de hierro aporta el calor para favorecer el proceso.

3.1.2.2 Conversión, refinado al fuego, tratamiento de escorias y refinado electrolítico, proceso de chatarra de aleación pura

Los hornos de conversión y refinado son muy similares a los utilizados para la producción primaria, y los sistemas de tratamiento de escorias y refinado electrolítico son los mismos. La principal diferencia es que los convertidores utilizados para la producción secundaria tratan metal y no mata. Utiliza coque como combustible para la fusión y para compensar los déficits de calor del proceso, mientras que en los convertidores primarios la mata proporciona el calor necesario para el proceso [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Los convertidores secundarios también oxidan y convierten en escoria elementos menores como el hierro, y separan otros metales como zinc y estaño por volatilización. Producen un cobre de convertidor en una calidad adecuada para el refinado al fuego. El calor de reacción, cuando se inyecta aire en el convertidor, se utiliza para volatilizar los componentes metálicos, y se emplean agentes escoriantes para eliminar el hierro y algo de plomo. Los hornos de refinado al fuego se utilizan asimismo para fundir chatarra de alta calidad. Los comentarios realizados sobre posibles emisiones fugitivas son también aplicables a los procesos secundarios.

Los limos y soluciones consumidas del electro-refinado son también fuentes de metales preciosos y otros metales como el níquel. Se recuperan del mismo modo que los de la producción primaria.

Las aleaciones de cobre como bronces y latones se utilizan asimismo como materias primas secundarias en una serie de procesos. Si contienen impurezas o están mezclados con otras aleaciones, se procesan en los circuitos de fundición secundaria y refinado, como se describe anteriormente.

Las aleaciones puras se utilizan directamente para la fabricación de semis. Los hornos de inducción se utilizan para fundir el material limpio, seguido de moldeo en formas adecuadas para los siguientes pasos de fabricación. Se realiza análisis y control de carga para producir la aleación deseada sin adiciones importantes de metal virgen. Del polvo de filtro puede recogerse óxido de zinc.

Según el tipo de materiales de alimentación, en algunas plantas se produce en la primera etapa un polvo de combustión que es rico en zinc y plomo, por ejemplo durante la fundición en alto horno de material de baja calidad. Estos polvos contienen hasta un 65% de compuestos combinados de zinc y plomo y son un material de alimentación muy adecuado para su proceso en el Horno de Fundición Imperial para la producción de plomo y zinc.

3.1.3 Estaño

El estaño se recupera de los residuos producidos durante algunos de los procesos de refinado de cobre secundario, desde el desestañado de latas de acero recubiertas y de minerales. En el momento presente, en la UE no hay producción de estaño directamente desde minerales.

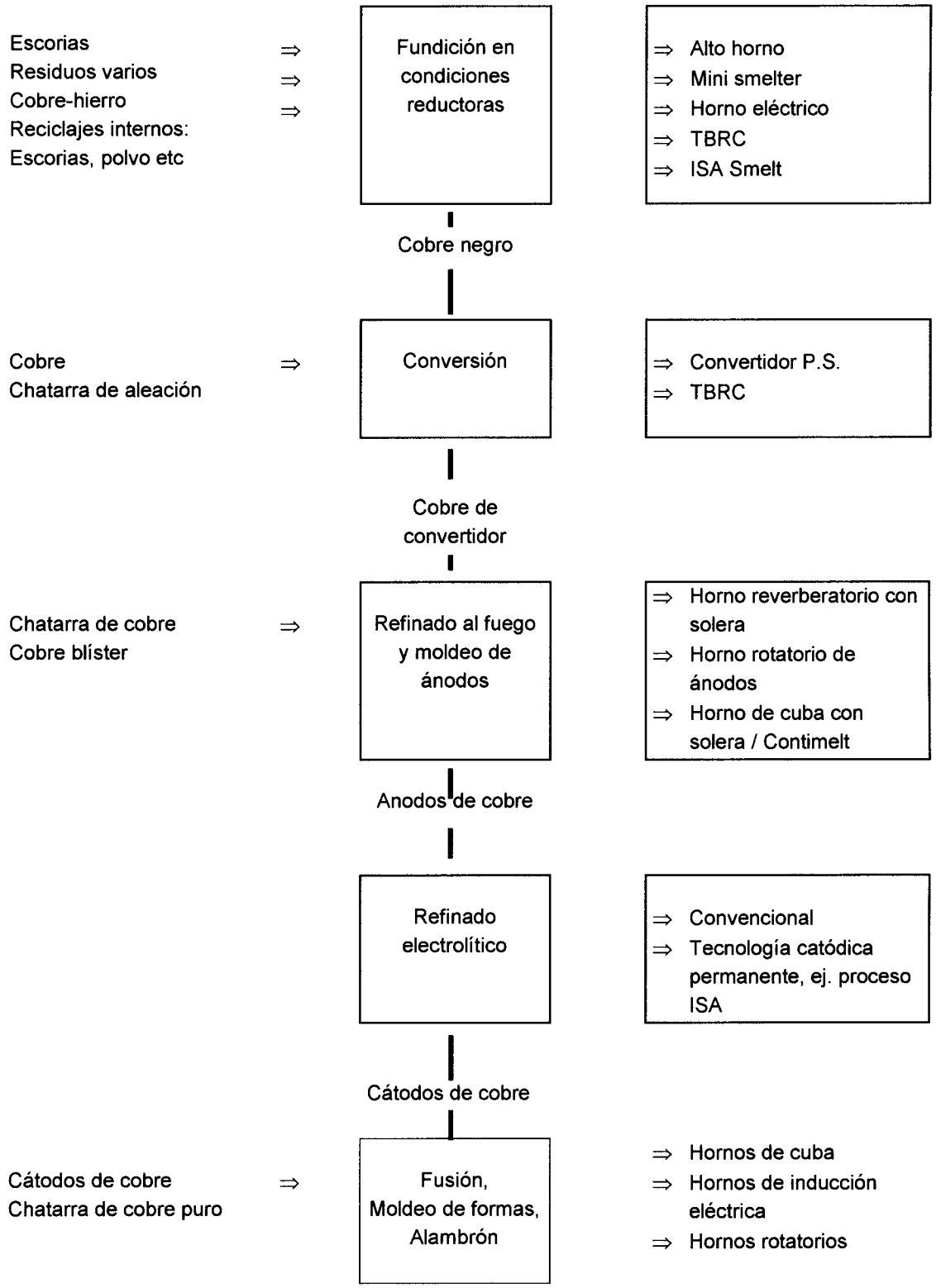


Figura 3.3: Diagrama de flujo genérico para la producción de cobre secundario.

En una fundición de cobre secundario, se utiliza un segundo paso de reducción [tm 92, Cu Expert Group 1998]. El plomo y el estaño se reducen con chatarra de acero o latas de estaño en un TBRC. Se agrega chatarra, escorias y residuos de plomo/estaño, y se produce una aleación de estaño/plomo. La aleación pasa a una cuchara de sacudidas para eliminar los residuos de cobre, níquel y silicio, y la aleación sin cobre es luego tratada en un sistema de destilación al vacío de

tres etapas para separar el estaño y el plomo. El estaño es luego refinado por cristalización antes de la segunda etapa de destilación al vacío.

Otro método utilizado en otras fundiciones de cobre utiliza el polvo de combustión del convertidor de cobre secundario (a veces también del alto horno) como material de alimentación. En condiciones reductoras, el zinc es volatilizado y recuperado en forma de óxido, mientras que el estaño y el plomo se producen en forma de aleación.

La chatarra de acero se desestaña mediante procesos de lixiviación electrolítica o química con sosa cáustica y nitrito sódico [tm 9, HMIP-Sn 1993]. En el último caso se libera amoníaco (0,048 kg por kg de estaño). El estaño se disuelve y luego se recupera por electrólisis, separándose de los cátodos mediante inmersión en un baño de estaño fundido. Se producen lingotes de estaño o estaño en polvo, que se utilizan en la producción de diversas aleaciones y materiales de recubrimiento.

El estaño se refina mediante diversos procesos. El refinado electrolítico se lleva a cabo con cátodos de acero, y también puede realizarse un proceso de refinado pirometalúrgico de forma similar al refinado de plomo. En caso de refinado de estaño, el hierro se elimina por licuación, el cobre se elimina mediante la adición de azufre, y el arsénico y el antimonio se eliminan mediante la adición de aluminio o sodio.

3.1.4 Producción de alambrón

El alambrón se fabrica a partir de cátodos de cobre de gran pureza refinados electrolíticamente, lo que asegura que las trazas de impurezas, que puede afectar a la conductividad, la recocibilidad y la fragilidad en caliente, queden minimizadas. Se presta atención al control de las condiciones del horno para minimizar la absorción de oxígeno en el metal. Se utilizan los siguientes procesos [tm 117, Copper Expert Group 1998]:

3.1.4.1 Proceso Southwire

Este proceso utiliza hornos de cuba para fundir cátodos de cobre y otros materiales de cobre puro. Se consiguen velocidades de fusión de unas 60 t/h .

Los materiales de alimentación se funden con quemadores a gas natural, propano o similares, dispuestos en filas alrededor del cuerpo del horno. El combustible se quema en condiciones de combustión estrictamente controladas para mantener una atmósfera ligeramente reductora (menos de 0,5% a 1,5% de CO o H_2) en las zonas en las que los gases están en contacto con el cobre, para minimizar el contenido en oxígeno del cobre. Esto se consigue mediante un control independiente de la relación combustible/aire para cada quemador con control del contenido de CO o H_2 de los gases de combustión de cada quemador en secuencia.

Los gases del horno se enfrían, y el polvo se elimina con filtros de tejido. También puede aplicarse postcombustión para destruir el CO si la concentración es elevada.

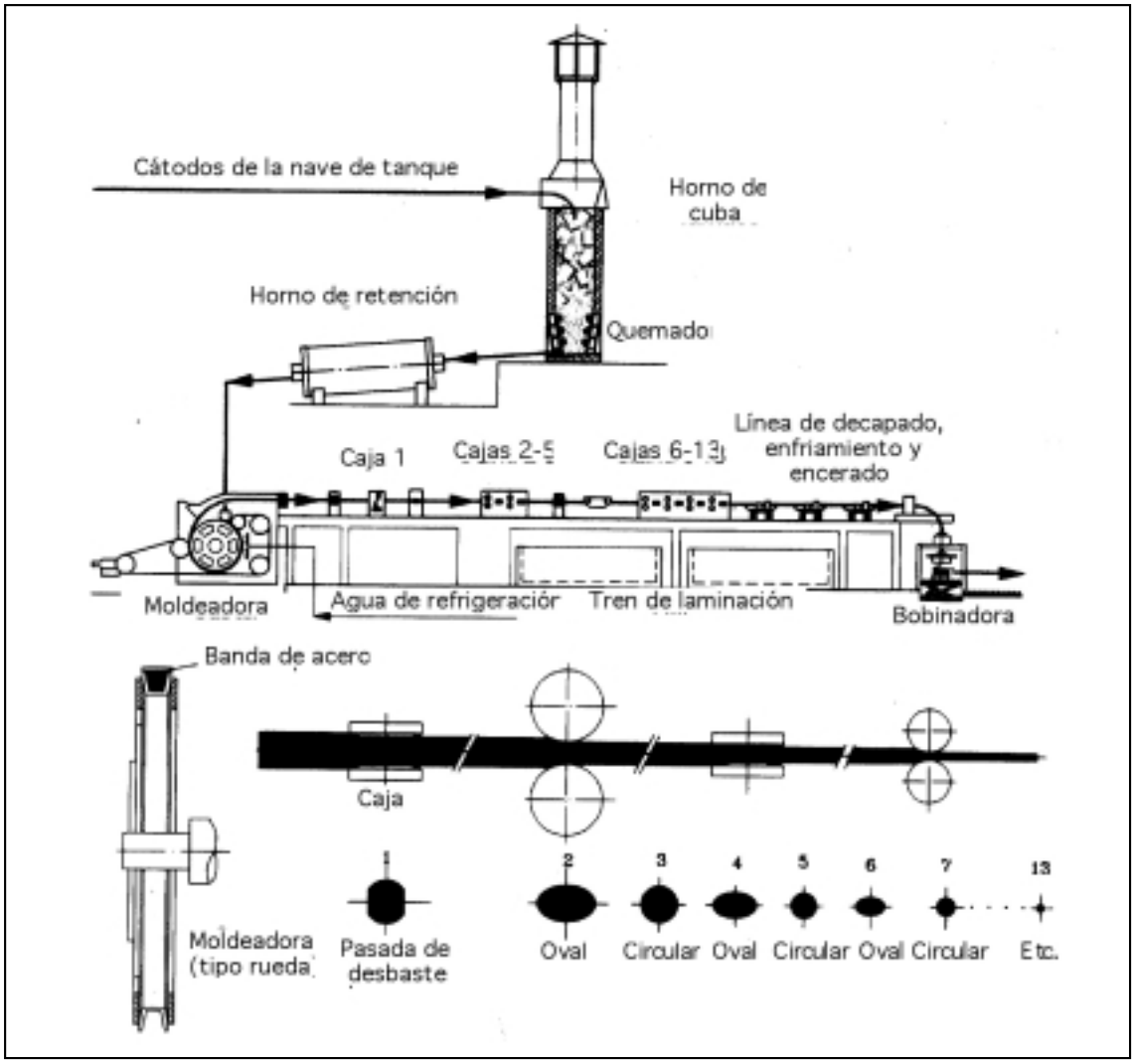


Figura 3.4: Ejemplo del proceso Southwire [tm 124, DFIU Cu 1999].

El cobre fundido se evacúa desde la base del horno de cuba y fluye a un horno de retención cilíndrico para el ajuste de la temperatura y equilibrado del metal, así como para tratamiento metalúrgico. Se utilizan quemadores a gas natural para mantener la temperatura del cobre fundido, y una atmósfera reductora en las artesas. El horno de retención, que también tiene combustión a gas natural o combustible similar, sirve como depósito para suministrar un caudal constante de metal al proceso de moldeo y, si se requiere, puede usarse para sobrecalentar el metal.

El cobre fundido fluye desde el horno de retención a través de una artesa equipada con control de caudal a la rueda de moldeo. Una banda de acero refrigerada por agua encierra más de la mitad de la circunferencia de la rueda, formando una cavidad de moldeo en la que el cobre fundido solidifica formando una barra de moldeo trapezoidal entre 5.000 y 8.300 mm^2. Se utiliza acetileno, que se quema con aire, para producir un aprestado de hollín en la rueda de moldeo y la banda de acero. Tras su nivelado y desbarbado, la barra moldeada es alimentada mediante rodillos prensores a un tren de laminación consistente en una sección de desbarbado y una sección de acabado que reduce la barra a su diámetro final. Como líquido de laminación se utiliza una emulsión de aceite mineral o solución sintética en agua.

3.1.4.2 Proceso Contirod

Para la fusión del cobre se utiliza un horno de cuba como el arriba descrito. El cobre fundido del horno fluye a través de una artesa equipada con sifones a un horno de retención rotatorio calentado a gas. El cobre fluye luego a un embudo de vertido, que controla automáticamente las velocidades de alimentación a la moldeadora [tm 117, Copper Expert Group 1998].

Se utiliza la máquina de Hazelett de doble correa [tm 124, DFIU Cu 1999]. Las dos correas son refrigeradas por una película continua de agua que se mueve a alta velocidad a lo largo de su superficie. Los bloques laterales son refrigerados automáticamente en una zona de enfriamiento especialmente diseñada situada en el recorrido de retorno del circuito. Según el tamaño de la planta, el área de la barra moldeada puede estar entre 5.000 mm^2 y 9.100 mm^2, y las capacidades de producción entre 25 y 50 toneladas por hora. La barra rectangular se enfría, se fresan las cuatro esquinas para eliminar las rebabas y luego entra en un tren de laminación compuesto por pasadas alternativas horizontales y verticales para producir el producto final. Como líquido de laminación se utiliza una emulsión de aceite mineral o solución sintética en agua.

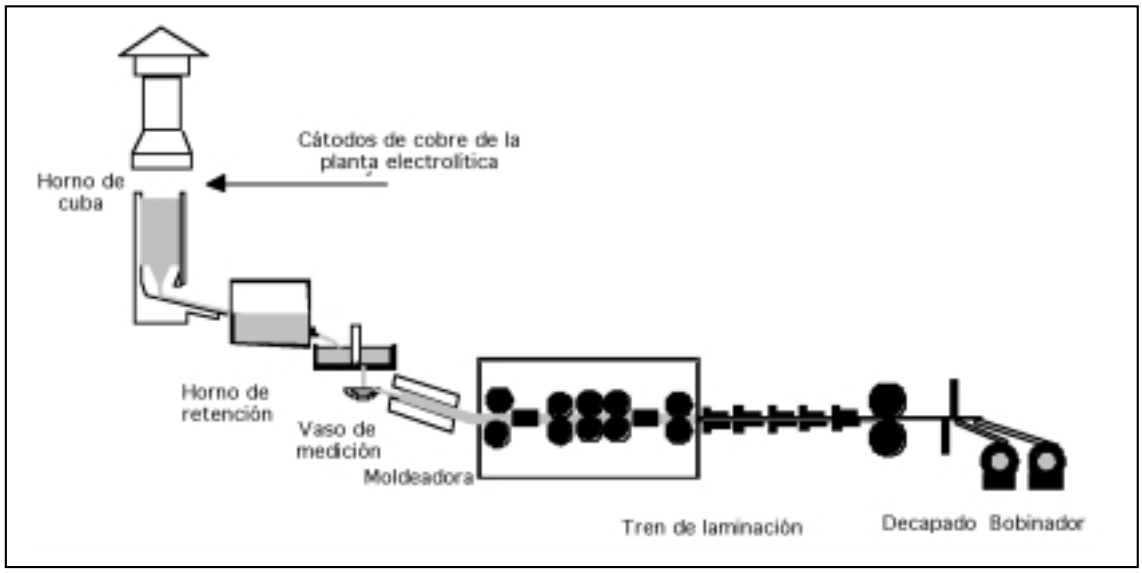


Figura 3.5: Ejemplo del proceso Contirod [tm 124, DFIU Cu 1999].

3.1.4.3 Procesos Properzi y Secor

Los procesos continuos Properzi y Secor son similares al concepto Southwire con variaciones en la geometría de moldeo [tm 117, Copper Expert Group 1998]. Las características descritas para el proceso Southwire son también válidas para estos dos sistemas de fabricación de alambrón de cobre.

3.1.4.4 Proceso de Moldeo por Gravedad (Upcast)

El cobre se funde en un horno de inducción de canal. El material fundido se transforma en discontinuo en un horno de retención de inducción. Para capacidades de producción pequeñas puede ser suficiente un solo horno combinado de fusión y retención [tm 117, Copper Expert Group 1998].

La máquina de moldeo Upcast está situada encima del horno de retención. Hileras de grafito refrigeradas por agua se sumergen hasta una cierta profundidad en el material fundido, y el cobre

fundido fluye continuamente a las hileras, donde solidifica y es extraído por los rodillos prensores. El alambrón solidificado es extraído hacia arriba por los rodillos prensores.

3.1.4.2 Proceso de Conformación por Inmersión

El material de alimentación precalentado es evacuado a un horno de fusión por inducción de canal. El cobre pasa al horno de retención y al crisol conectado al horno de retención. Una barra madre, de 12,5 mm de diámetro se extrae a través de una matriz de entrada en la base del crisol . El estirado del alambre central a través del baño de metal y el control del diámetro a través de la matriz superior permiten aumentar el diámetro. La barra moldeada se dirige a través de transportadores oscilantes a un tren de laminación de tres cajas que produce barra de 8.0 mm y 12,5 mm [tm 117, Copper Expert Group 1998].

3.5.1 Producción de productos semiacabados de cobre y aleaciones de cobre

El cobre y las aleaciones de cobre se funden de forma continua o discontinua, y se moldean para la producción de formas adecuadas para los siguientes pasos de fabricación. Los productos moldeados son precursores de gran variedad de materiales, como láminas, bandas, perfiles, barras, varillas, cables y tubos. Generalmente se siguen las siguientes rutas [tm 117, Copper Expert Group 1998].

- Las palanquillas se fabrican principalmente de cobre y aleaciones de cobre y sirven para la producción de tubos y secciones, así como alambrón.

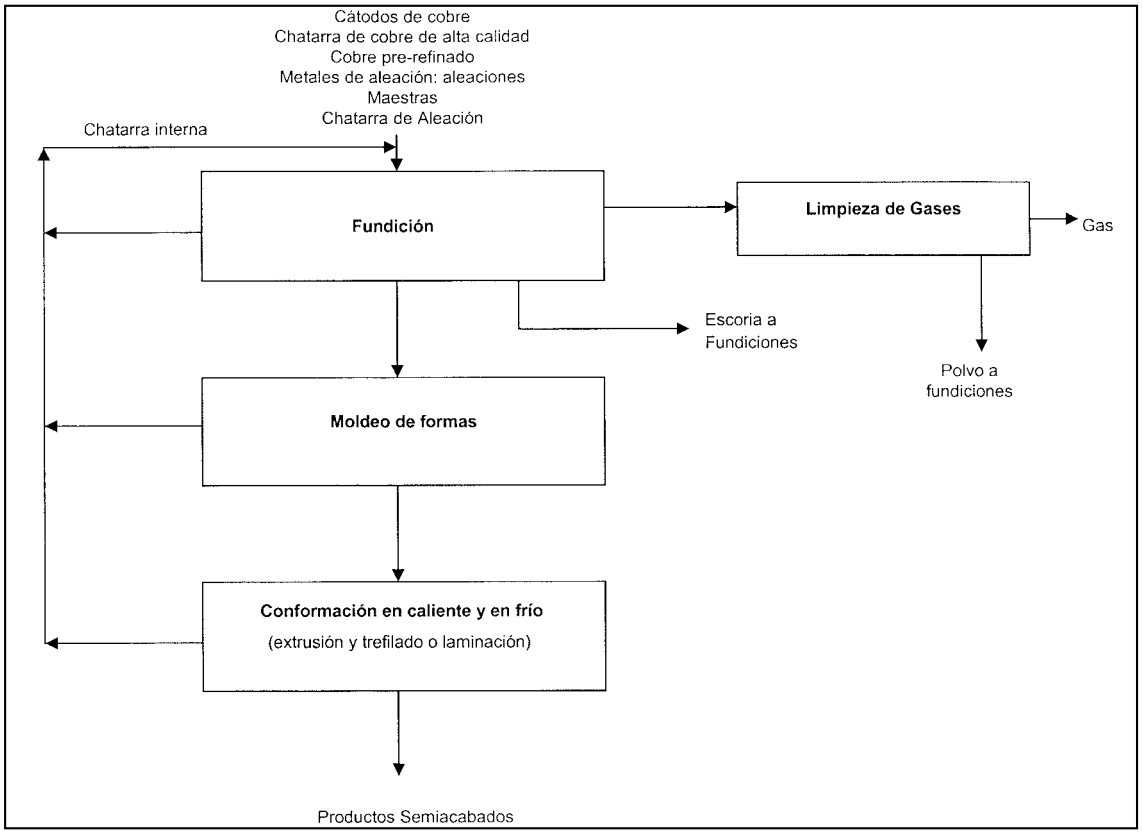


Figura 3.6: Diagrama de flujo general de la fabricación de productos semiacabados. [tm 124, DFIU Cu 1999].

- Los planchones y conglomerados se moldean con cobre y aleaciones de cobre y sirven para la producción de láminas o bandas.
- Se aplican procesos especiales para productos específicos de cobre y aleaciones de cobre: Proceso de moldeo por gravedad (Upcast) para cables y tubos, moldeo en continuo horizontal para bandas y perfiles, moldeo vertical de bandas y proceso de cilindrado de los tubos de cobre.

3.1.5.1 Procesos de fusión

El cobre y sus aleaciones pueden fundirse en discontinuo en un horno eléctrico o de inducción. Cuando se requieren velocidades de fusión elevadas, el cobre se funde también en continuo en un horno de cuba. Los hornos de crisol o de reverbero se utilizan también para la fusión y refinado al fuego de cobre. Los sistemas de recogida y eliminación de humos se escogen de acuerdo con la materia prima y el grado de contaminación presente. El gas recogido de los hornos eléctricos se limpia normalmente en ciclones, seguidos de filtros de tejido. Para hornos de cuba con combustión a gas, el control de los quemadores es un factor crítico para minimizar el contenido de CO de los gases emitidos. Si el contenido de CO es suficientemente alto (ej.> 5% CO), se utiliza un sistema de postcombustión seguido de filtros de tejido; los filtros de tejido se utilizan asimismo para la eliminación de polvo en hornos de cuba.

Como materia prima se utiliza cátodo de cobre y chatarra de cobre y aleaciones, y normalmente se almacena en almacenes abiertos, de forma que las distintas aleaciones puedan mezclarse para producir la aleación final. Esta premezcla es un factor importante para reducir el tiempo empleado en preparar la mezcla fundida, ya que minimiza la energía empleada y reduce la dependencia de las costosas Aleaciones Maestras. Para los hornos de inducción, la chatarra se corta en trozos pequeños para mejorar la eficacia de fusión y permitir el fácil despliegue de campanas, etc.

Las materias primas son también latones o limaduras y virutas de cobre, y en este caso están cubiertas de lubricantes. Se tiene cuidado en evitar que el aceite se filtre desde la zona de almacenamiento y contamine el suelo y el agua superficial. Análogamente se utilizan secadores de virutas u otros hornos, así como métodos de eliminación de aceite acuosos o con disolventes, para eliminar los lubricantes y demás contaminación orgánica.

Cuando se funden latones o bronces, el zinc es volatilizado del horno, lo que puede minimizarse con un buen control de la temperatura. Los vapores se recogen en el sistema de extracción de gas y se eliminan en un filtro de tejido. Por lo general, el óxido de zinc se recupera. También se realiza un cierto grado de refinado al fuego, y los vapores resultantes se tienen en cuenta en el diseño de sistemas de recogida y eliminación de vapores.

3.1.5.2 Moldeo

Normalmente, el metal fundido del horno o de la sección de retención puede moldearse en continuo o en discontinuo [tm 117, Cu Expert Group 1998]. La colada continua utiliza tanto el modo vertical como el horizontal, pero el moldeo en discontinuo utiliza normalmente el modo vertical. También se utilizan técnicas de moldeo por gravedad (Upcast). También se producen palanquillas y conglomerados/planchones, que luego son procesados.

En el caso de la producción de palanquillas, planchones o conglomerados, el metal se funde y pasa a través de un horno de retención a un moldeadora de palanquilla vertical u horizontal. Las palanquillas de cortan con sierra para su ulterior fabricación.

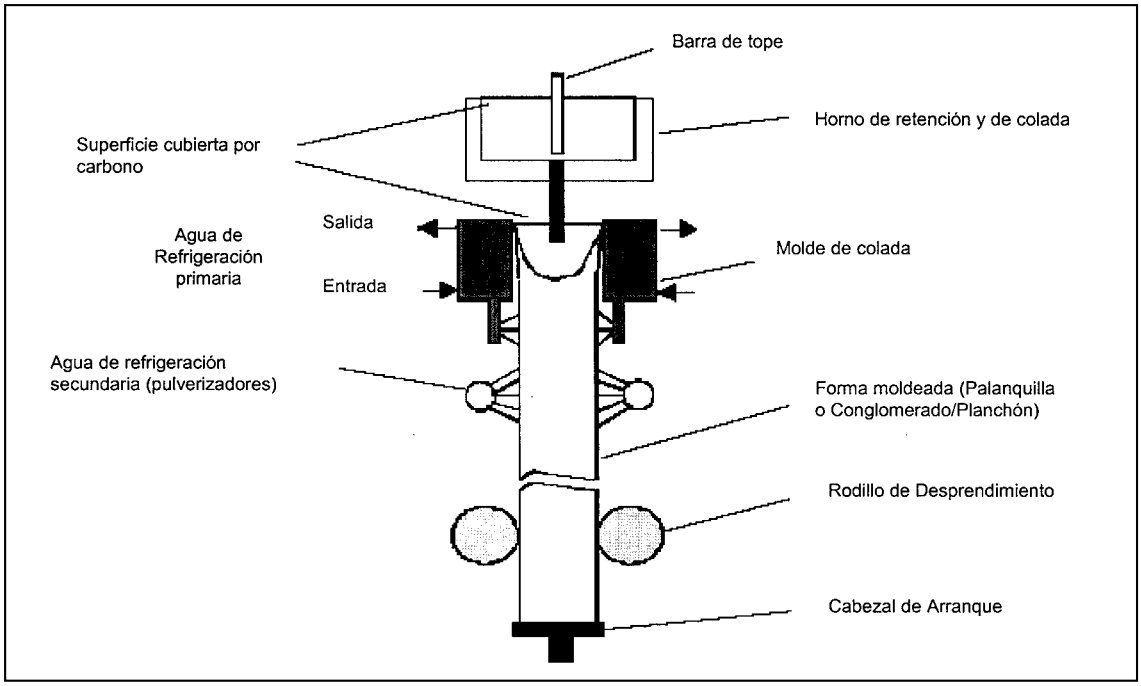


Figura 3.7: Principio de colada continua o semicontinua [tm 124, DFIU Cu 1999].

Se aplican procesos especiales para productos específicos de cobre y aleaciones de cobre: Proceso de moldeo por gravedad (Upcast) para cables y tubos, moldeo en continuo horizontal para bandas y perfiles, moldeo vertical de bandas y proceso de cilindrado para la fabricación de tubos de cobre.

3.1.5.3 Fabricación de tubos, perfiles y barras

Las palanquillas de cobre o aleación de cobre se precalientan y extrusionan, siendo estiradas para formar tubos de distintos diámetros y grosores en una serie de "pasadas". Las máquinas de estirado utilizan una variedad de aceites y jabones como lubricantes, que contaminan los tubos y los recortes. Los productos son normalmente recocidos y desengrasados antes del transporte, y los recortes se desengrasan en un horno o mediante otro proceso de desengrase antes de ser devueltos al horno para su fusión.

También pueden producirse tubos de cobre utilizando la prensa de extrusión con perforadora en la que secciones de palanquilla son extrusionadas en cuerpos de tubos; los cuerpos de tubo son luego laminadas en un laminador de ruptura (tren Pilger) y finalmente se estiran a su tamaño en bloques de estirado. El aceite utilizado (en pequeñas cantidades) para las operaciones de estirado se neutraliza en sistemas de desengrase/decapado que frecuentemente van conectados a la sección de recocido.

Los productos son recocidos en diversos tipos de hornos en condiciones reductoras utilizando como gas protector "exogas" o mezclas de hidrógeno/nitrógeno.

3.1.5.4 Fabricación de láminas y bandas

Los planchones/conglomerados de aleación de cobre son el material de partida para la fabricación de láminas y bandas. El material se precalienta en hornos con combustión a gas o aceite, se lamina en caliente y en frío, y luego se envía a la operación de acabado, que incluye un re-laminado y corte a la longitud y anchura deseadas. Los pasos intermedios aplicados para la

producción de bandas de alta calidad son fresado superficial, recocido, decapado, lavado y secado [tm 117, Copper Expert Group 1998].

La laminación en caliente se realiza normalmente con un tren de laminación doble equipado con bancos de hasta 200 m y un dispositivo de bobinado final. Al agua de refrigeración de los rodillos se le agregan pequeñas cantidades de lubricante para mejorar la fijación a los rodillos de acero. El vapor generado es ventilado, y al gas ventilado se le elimina la neblina antes de su emisión a la atmósfera.

Luego se realizan otras operaciones de laminación en frío. La laminación en frío endurece el metal. En la mayoría de casos, la bobina es recocida antes de la laminación en frío. La laminación se realiza en condiciones reductoras para evitar la oxidación. Como gas de protección se utiliza "exogás" o mezclas de nitrógeno/hidrógeno. El exogás se produce a partir de gas natural en un reactor especial, con combustión indirecta. Se adquiere N_2 y H_2, que se almacenan *in situ* en depósitos especiales. Las mezclas de gas de protección de N_2/H_2 se producen desde los depósitos de almacenamiento mezclando los gases en la proporción adecuada. Para el recocido antes de la laminación en frío se utilizan hornos tipo campana con calentamiento eléctrico o combustión indirecta a gas natural o fuel oil. Para el recocido intermedio de las bobinas prelaminadas se utilizan hornos de torre.

El espesor de las láminas se reduce progresivamente en diversos pasos de laminación en frío en distintos trenes reversibles. Para la laminación en frío se emplean diversos tipos de trenes, denominados Dúo, Quarto, Sexto, o Sendzimir (12 rodillos). También se emplean diseños de

Tabla 3.5: Datos típicos de un proceso de producción de banda de latón [tm 124, DFIU Cu 1999]

Laminación en Caliente	
Tipo de tren de laminación	Principalmente Dúo
Dimensiones iniciales	250 – 130 mm de espesor, 450 – 1.000 mm de ancho
Dimensiones finales Temperatura	15 – 12 mm de espesor, 450 – 1.000 mm de ancho 750 – 800 °C
Fuerza de laminación	~ 10 - 12 kN/mm de ancho de lámina
Fresado superficial	Corte de ambas superficies de 0,3 – 0,7 mm
1º Laminación en frío	
Tipo de tren de laminación	Principalmente Quarto
Fuerza de laminación	~ 15 – 20 kN/mm de ancho de lámina
Reducción de dimensiones y velocidad de laminación	Reducción de 15 mm a 4 mm de espesor en múltiples pasadas, velocidad 100 - 200 m/min
Indice de conversión	70 - 80%
Recocido*) (recristalización)	
Temperatura	550 – 600 °C
2ª Laminación (final)	
Tipo de tren de laminación	Principalmente Quarto; alternativamente, según el espesor de la lámina, pueden usarse trenes Sexto o trenes con 20 rodillos
Fuerza de laminación	~ 2 – 10 kN/mm de ancho de lámina, según el tipo de tren utilizado
Velocidad de laminación	Reducción de 4 a 1 mm: 300 – 500 m/min, múltiples pasadas Reducción de 1 a 0,1 mm: 500 - 1.000 m/min, múltiples pasadas
Corte de láminas en bandas	
Tipo de equipo	Máquina de corte de bandas longitudinales

Nota. *Se requiere recocido si el índice de conversión es superior al 70-80%. Las temperaturas de recocido seleccionadas dependen de las propiedades deseadas para el material.

trenes de laminación que combinan trenes de una sola caja con trenes de laminación múltiples en línea. La combinación de los distintos tipos depende del espesor de la lámina en las bobinas y del estado de acabado que haya alcanzado ya la lámina.

Durante la laminación en frío se utiliza una emulsión o aceite para la protección de los rodillos. Por lo tanto, los trenes de laminación son ventilados, y los gases de ventilación son limpiados por filtros mecánicos, precipitadores electrostáticos húmedos o lavadores. La emulsión y el aceite se limpian del metal, y las partículas de aceite fraccionadas se eliminan con filtros de papel o filtros textiles.

3.1.6 Lingotes de cobre y de aleaciones de cobre

Los lingotes de cobre o de sus aleaciones se producen para la industria de la fundición mediante un proceso de colada de molde fijo. Se produce una amplia variedad de aleaciones con otros metales como Ni, Sn, Zn Al etc.

La producción de lingotes requiere la obtención de una composición precisa de la aleación. Esto se consigue en la etapa de recepción y almacenamiento de materias primas, mediante su separación y clasificación. La chatarra antigua se almacena normalmente en almacenes abiertos, de forma que las distintas aleaciones puedan mezclarse para producir la aleación final. Esta premezcla es un factor importante para reducir el tiempo empleado en preparar la mezcla fundida, ya que minimiza la energía empleada y reduce la dependencia de las costosas Aleaciones Maestras. El cobre o sus aleaciones pueden fundirse en discontinuo en hornos rotatorios o de inducción. Los hornos rotatorios se utilizan normalmente para la chatarra más sucia, y con frecuencia se utilizan quemadores oxiacetilénicos [tm 106, Farrell 1998].

Los sistemas de recogida y eliminación de vapores se eligen de acuerdo con la materia prima y el grado de contaminación presente. El acceso a un horno de inducción para la carga y el sangrado significa el uso de un sistema de campanas móviles. Las campanas son robustas, de modo que puedan soportar ciertos impactos mecánicos. El gas recogido de los hornos de inducción se limpia normalmente en ciclones, seguido de filtros de tejido. Puede usarse un sistema de postcombustión, seguido de un sistema de recuperación de calor, para los casos en los que haya contaminación orgánica, o bien el sistema de control de combustión del horno debe ser capaz de ajustarse para la combustión de los contaminantes.

Cuando se funden latones o bronces, el zinc es volatilizado del horno, lo que puede minimizarse con un buen control de la temperatura. Los vapores se recogen en el sistema de extracción de gas y se eliminan en un filtro de tejido. Por lo general, el óxido de zinc se recupera. También se realiza un cierto grado de refinado al fuego, y los vapores resultantes se tienen en cuenta en el diseño de sistemas de recogida y eliminación de vapores.

La mezcla fundida en el horno se muestrea y analiza, realizándose los ajustes finales en la aleación. El metal se sangra luego en artesas cubiertas que alimentan una cadena de moldes de lingote. Los moldes están normalmente tratados con un aceite mineral para evitar que se peguen, y se generan vapores de aceite, que pueden recogerse y quemarse.

Los lingotes, una vez enfriados, se apilan, se aseguran y se almacenan al aire libre en palets.

3.1.6.1 Aleaciones Maestras

La carga del horno está normalmente preajustada para adecuarse a la aleación a utilizar, pero el metal fundido puede transferirse a una cuchara u horno de retención de modo que

pueda realizarse un ajuste fino de la composición de las aleaciones antes del moldeo. Con este fin se utilizan aleaciones maestras como CuP, CuNi, CuZnPb, CuBe, etc.. Estas aleaciones maestras se producen en hornos similares a los descritos anteriormente, la naturaleza de los vapores y el polvo de la producción de las aleaciones maestras influye sobre el control de proceso, así como sobre los sistemas de recogida y eliminación utilizados. Los sistemas de operación y recogida más estrictos son particularmente apropiados cuando se utilizan materiales extremadamente peligrosos como el berilio o cuando se agregan materiales reactivos como el fósforo para producir una aleación. Por ejemplo, la aleación maestra de cobre y fósforo se realiza del modo siguiente:

Se utilizan dos hornos en serie (normalmente se emplean hornos de inducción). El cobre se funde en el primer horno y se transfiere al segundo, donde se inyecta fósforo fundido mediante una lanza para forma la aleación. La velocidad de inyección se controla con el fin de minimizar el vapor de pentóxido de fósforo, particularmente durante las etapas finales en las que el metal se acerca a la saturación (< 14%P). El cobre fosforado se sangra luego en moldes. Mientras la aleación se enfría siguen emitiéndose vapores de pentóxido de fósforo si el contenido de fósforo es demasiado elevado.

El pentóxido de fósforo es muy higroscópico y por lo tanto el vapor no puede filtrarse utilizando un filtro de tejido convencional, ya que el vapor absorbe la humedad y recubre las bolsas con ácido fosfórico. El lavado húmedo convencional tiene un efecto limitado, ya que el vapor fino forma una neblina fina y n logra entrar en contacto con el medio de lavado. Puede conseguirse una reducción efectiva de la concentración de componentes fosforados en la corriente de gas utilizando lavadores de Venturi de alta energía o filtros de estera fibrosa. En teoría, puede producirse un ácido diluido para su proceso ulterior, pero en la práctica es difícil.

3.1.7 Operaciones de decapado

Los cables, tubos, bandas y otros materiales se decapan para dar un acabado brillante antes de su embalaje o, en el caso del cable de cobre, para eliminar el óxido de la superficie antes del trefilado. Se utilizan soluciones de ácido sulfúrico, y en ocasiones una mezcla diluida de ácido sulfúrico y nítrico. En este último caso pueden emitirse vapores nítricos si se utilizan ácidos de mayor concentración.

3.1.7.1 Decapado no ácido de alambrón de cobre

Este proceso se utiliza en un circuito cerrado. Los alambrones pueden decaparse en un sistema en línea consistente en un tubo de acero horizontal dividido en compartimentos. Se utiliza una solución de un 2,5% a un 3,5% de alcohol isopropílico (AIP) en agua. El proceso de conversión de la cascarilla de óxido cuproso con alcohol para formar cobre (que se deja en parte en el alambrón) se conoce como proceso Burns [tm 117, Cu Expert Group 1998]. En la fabricación de alambrón de cobre, la práctica normal es reciclar la solución a decapado, tras la eliminación del lodo de cobre por sedimentación o filtración; la concentración de AIP se ajusta según convenga.

Tras el decapado, el alambrón se seca con aire comprimido. Luego se le aplica un recubrimiento de cera, aplicado mediante la pulverización fina de una emulsión de cera al 4%, que evita la oxidación de la superficie del alambrón. El alambrón se recoge en bobinas que se colocan en palets de madera, que se fijan con flejes y se retractilan con plástico.

3.1.7.2 Decapado ácido de alambrón de cobre y semis de cobre y sus aleaciones

a) Alambrón de cobre

El decapado ácido de alambrón de cobre utiliza un tubo de acero horizontal dividido en compartimentos [tm 117, Cu Expert Group 1998]. En una primera etapa, el alambrón se decapa con ácido sulfúrico diluido; luego, el ácido residual se lava en varias etapas de la superficie del alambrón mediante pulverizadores de agua, y luego se seca con aire comprimido y se recubre con cera.

Alternativamente, tras el enfriamiento parcial en un tubo largo relleno de agua, el alambrón se conforma en espirales que corresponden al diámetro de la bobina. Estas espirales se extienden sobre una mesa de rodillas en las que la temperatura se reduce a 20 ºC con pulverizadores de agua. Un transportador de una aleación resistente al ácido lleva estas espirales a los tanques de decapado, donde el alambrón es decapado con una solución de ácido sulfúrico al 20%. El sistema de decapado mediante inmersión de ácido sulfúrico garantiza la perfecta eliminación de todos los óxidos de la superficie del alambrón. Las espirales se lavan luego con agua de enjuague y por último de protegen con una solución de cera.

Se utiliza electro-recuperación para recuperar el cobre disuelto por el ácido de decapado, o también puede transferirse la solución de lavado como agua de confección a una sección de tanques in situ, o tratarse mediante intercambio iónico.

b) Semis de cobre y aleaciones de cobre

El decapado superficial de láminas y bandas se realiza normalmente con ácido sulfúrico (8 - 10%), pero para algunas aleaciones especiales se utilizan mezclas de ácido sulfúrico y nítrico en líneas continuas o sistemas automáticos. Mediante limpieza de gases de eliminan los vapores de ácido nítrico. El ácido se cambia de vez en cuando para asegurar que la calidad de la superficie no se vea afectada.

El ácido consumido es enviado para su tratamiento y recuperación del metal en plantas de tratamiento internas o externas. Los sistemas de decapado cuentan con sistemas de ventilación para la protección de los operarios. Los productos se enjuagan, y el agua de enjuague es enviada para tratamiento, reciclándose los lodos si es posible. El agua consumida se limpia por ultrafiltración.

3.2 Niveles Actuales de Emisión y Consumo

Los principales aspectos medioambientales de la industria de cobre refinado son la contaminación atmosférica y del agua [tm 28, WRC 1993; tm 210, Copper Expert Group 1999]. Las instalaciones cuentan por lo general con sus propias instalaciones de tratamiento de aguas residuales, y normalmente se practica el reciclaje de las mismas. La mayoría de posibles residuos son reutilizados.

Algunos aspectos locales, como el ruido, son relevantes para la industria.

Debido a la naturaleza peligrosa de algunos residuos sólidos y líquidos, existe asimismo un riesgo significativo de contaminación del suelo a menos que se almacenen y manipulen correctamente.

Las emisiones fugitivas pueden ser también muy considerables. Se han realizado mediciones en una de las principales fundiciones de cobre, que produce cobre primario y secundario. Los resultados muestran claramente que las emisiones fugitivas predominan incluso tras realizar mejoras en los sistemas de captura de vapores secundarios [tm 161, Petersen 1999]. En este ejemplo, las cargas de polvo medidas fueron las siguientes:

Tabla 3.6: Comparación de las cargas de polvo eliminadas y fugitivas en una fundición primaria de cobre [tm 161, Petersen 1999]

	Emisión de polvo kg/a	
	Antes de la recogida adicional de gas secundario (1992)	**Después de la recogida adicional de gas secundario (1996)***
Producción de ánodos t/a	220.000	325.000
Emisiones fugitivas		
Total fundición	66.490	32.200
Línea de techo	56.160	17.020
Emisiones en chimenea de la fundición primaria		
Fundición/Planta de ácido	7.990	7.600
Campanas secundarias de la chimenea	2.547	2.116

Nota. * Emisiones tras una inversión de 10 millones de Euros para mejorar el sistema de captura y tratamiento de gases fugitivos. Energía adicional = 13,6 GWh/a.

3.2.1 Uso de la energía en la producción de cobre

La producción de cobre requiere energía en la mayoría de sus etapas, aunque la que utiliza mayor energía es el proceso electrolítico [tm 26, PARCOM 1996]. La producción del requisito (neto) de energía para una serie de procesos con concentrado de cobre es del orden de 14 – 20 GJ/t de cátodo de cobre [tm 210, Cu Expert Group 1999]. La cifra exacta depende principalmente del concentrado (% S y Fe), aunque también de la unidad de fundición empleada, del grado de enriquecimiento con oxígeno y de la recogida y aprovechamiento del calor de los procesos. Los datos comparativos basados únicamente en el tipo de fundición están por consiguientes sujetos a imprecisiones. El uso del contenido energético del concentrado es más importante, y las fundiciones que consiguen un funcionamiento autógeno tienen un menor consumo energético.

La energía consumida por la etapa de refinado electrolítico de la producción de cobre se indica que es de 300 - 400 kWh por tonelada de cobre [tm 137, Cu Expert Group 1998]. El tipo de cátodo en bruto utilizado (acero inoxidable o cobre) tiene una influencia decisiva en la eficacia de la sección de tanques [tm 92, Cu Expert Group 1998], lo que puede representar de un 92% a un 95% en términos de eficacia de corriente.

3.2.2 Datos de emisiones y consumos

Las principales fuentes de emisión y consumo de la producción de cobre son las siguientes:

3.2.2.1 Entrada y salida de cobre primario

Los datos de entrada y salida de una fundición primaria de cobre dependen del contenido de cobre del concentrado, de la concentración de otros metales (As, Se, Hg, Ag, Au etc) y del uso de chatarra de cobre o de otros materiales que contengan cobre en las distintas partes del proceso.

El esquema siguiente ilustra las entradas y posibles salidas de un proceso típico para la producción de cobre primario.

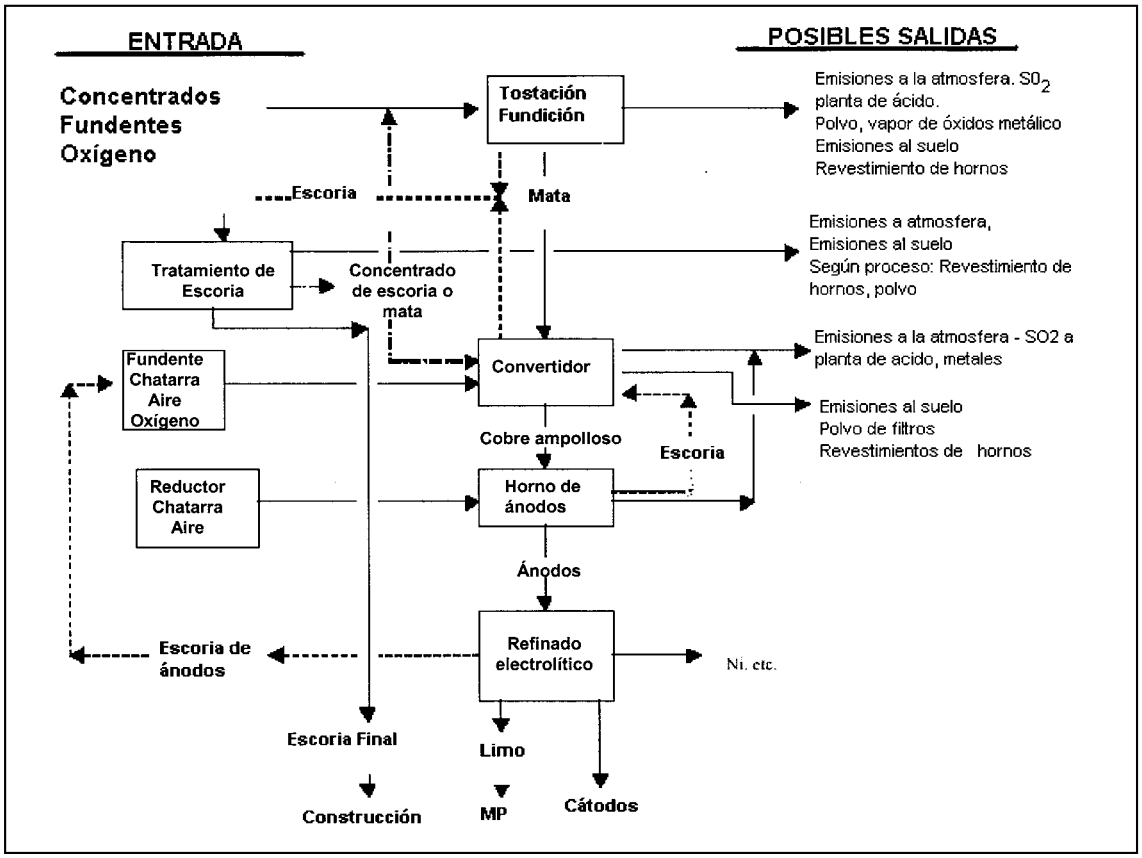


Figura 3.8: Diagrama genérico de entradas y salidas para cobre primario.

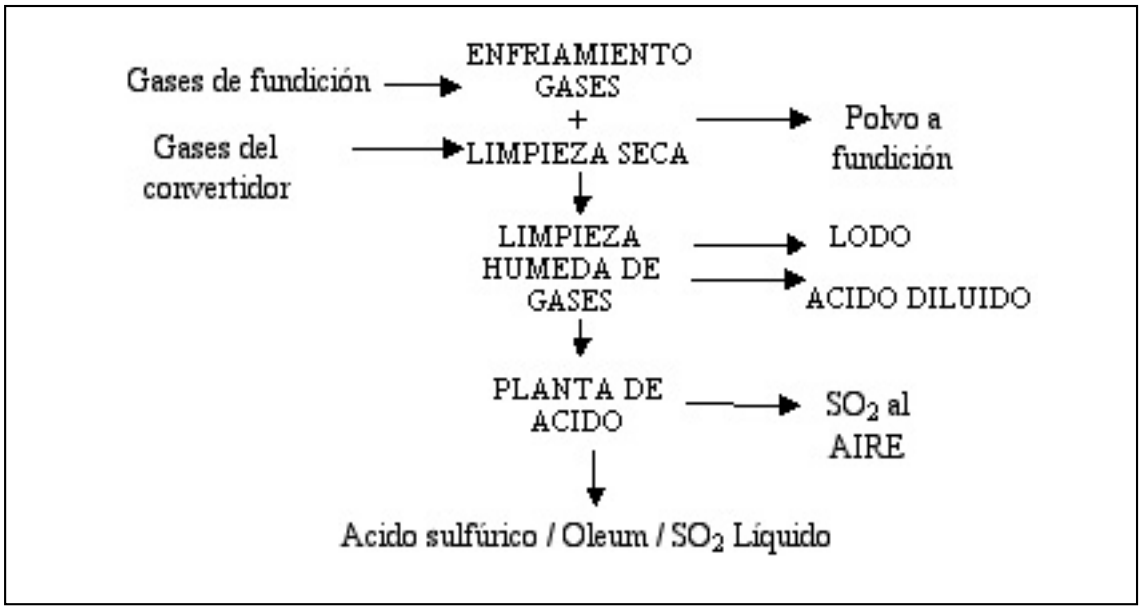


Figura 3.9: Tratamiento de los gases de horno de fundición y convertidor.

Algunas fundiciones de cobre primario están integradas con instalaciones de fundición secundaria o con la producción de polvo de óxido de plomo o zinc a partir de concentrados mixtos, etc. Los datos de entrada y salida son por lo tanto muy difíciles de comparar. A continuación se indican los valores para un proceso complejo. Cabe destacar que la principal influencia sobre los datos de entrada y salida es el contenido de cobre del concentrado y otras

materias primas, por lo que pueden haber variaciones de los datos y las comparaciones no son significativas. La recuperación de cobre durante la fundición y el refinado es más significativa y es superior al 96%.

Tabla 3.7: Ejemplo de datos de entrada y salida para una fundición / refinería de cobre primario [tm 124, DFIU Cu 1999]

Materiales de entrada	Cantidad [t/a]	Productos	Cantidad [t/a]
Concentrados de cobre	690.000	Cátodo de cobre	370.000
Chatarra de cobre	95.000	Sales de cobre	6.500
Material triturado de chatarra electrónica	1.200	Sulfato de níquel	1.800
Productos intermedios externos	86.000	Metales preciosos	150
		Plomo refinado	9.000
		Acido sulfúrico	660.000
		Escorias	410.000

3.2.2.2 Entradas y salidas de cobre secundario

Como se ha indicado anteriormente, las materias primas secundarias pueden introducirse en distintas partes de los procesos secundarios según su pureza, contenido de otros metales y grado de contaminación superficial. El grado de contaminación orgánica afecta a las posibles emisiones y en las distintas etapas del proceso se utilizan sistemas de postcombustión para destruir los componentes orgánicos como dioxinas, según el grado de contaminación orgánica presente. El siguiente esquema muestra un diagrama genérico de entradas y salidas para cobre secundario.

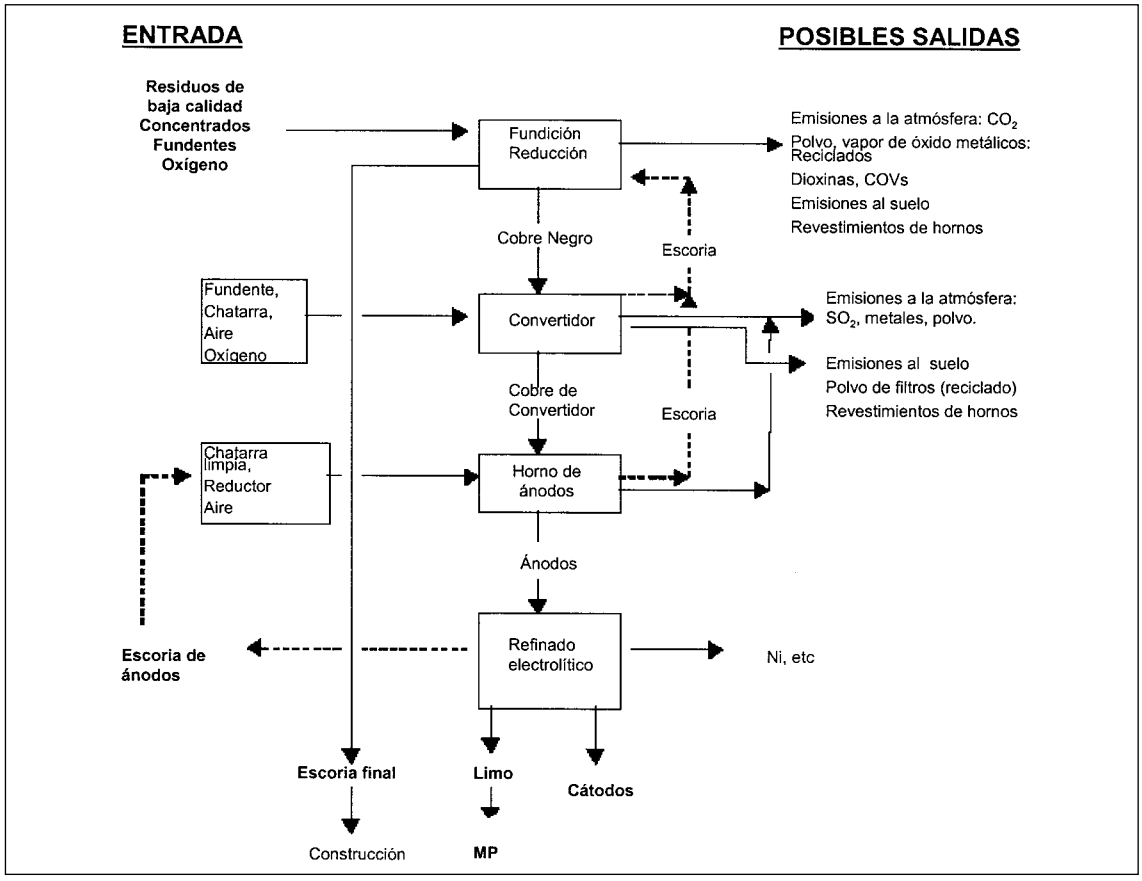


Figura 3.10: Diagrama genérico de entradas y salidas para cobre secundario.

Muchos residuos se reciclan dentro del proceso y a otros procesos asociados. Los productores de metales no férreos, por ejemplo de plomo, zinc y estaño, utilizan muchos de los residuos como materias primas para sus procesos. Muchos centros de producción tienen procesos incorporados in situ para recuperar otros metales de estos residuos.

El siguiente esquema muestra un ejemplo de cómo la producción de cobre y otros metales a partir de materias primas secundarias puede ser un proceso complejo e integrado. La tabla adjunta muestra asimismo las cantidades de entrada y salida asociadas con este ejemplo particular.

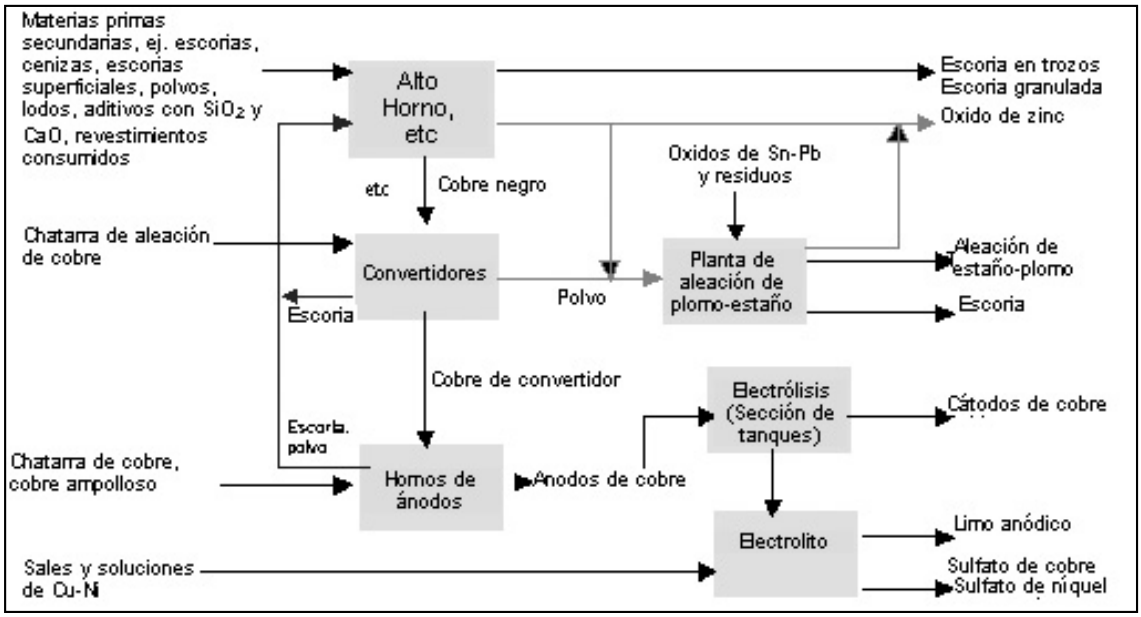


Figura 3.11: Ejemplo de diagrama de Entrada-Salida para un centro de producción de cobre secundario con un proceso de recuperación de estaño/plomo [tm 124, DFIU Cu 1999].

Tabla 3.8: Datos de Entrada-Salida para el diagrama de proceso de cobre secundario de arriba [tm 124, DFIU Cu 1999]

Entradas	Cantidad [t/a]	Sdalidas	Cantidad [t/a]
Chatarra de cobre*)	130.000	Cátodos de cobre	176.000
Cobre blíster	20.000	Sulfato de cobre	2.200
Chatarra de aleación de cobre	35.000	Sulfato de níquel	2.400
Materiales intermedios externos (ej. escorias, polvos, cenizas, lodos, restos, etc.)	40.000	Oxidos de zinc	9.000
Material de cobre-hierro*)	25.000	Aleaciones de plomo-estaño	3.700
Caliza	13.000	Limo anódico	1.000
Sílice	11.000	Escoria	80.000
Coque	25.000		
Carbón	15.000		
Fuel oil	11.000		

Nota. *) incluida chatarra electrónica.

3.2.2.3 Emisiones a la atmósfera

Puede emitirse al aire polvo, compuestos metálicos, carbono orgánico (que puede producir la formación de dioxinas) y dióxido de azufre [tm 124, DFIU Cu 1999]. Las posibles fuentes y la importancia de las emisiones potenciales al aire se muestran en la siguiente tabla y se discuten más adelante en esta sección:

Tabla 3.9: Importancia de las posibles emisiones a la atmósfera de los procesos de producción de cobre

Fuente de Emisión	Polvo y Compuestos Metálicos	Dioxinas	Carbono Orgánico	Compuestos de Azufre
Manipulación del Material	••			
Almacenamiento	•			
Secado	•••		•	•
Tratamiento de Chatarra	••	••• (secundario)	••• (secundario)	
Fundición	•••	••• (secundario)	•(secundario)	••• (Tratado en una planta de recuperación)
Conversión	••	• (secundario)	• (secundario)	••• (Tratado en una planta de recuperación)
Refinado	••	• (secundario)	• (secundario)	•
Fusión/Moldeo	• (•• para aleaciones)		• (secundario) + CO	
Transferencias con Cuchara	•••			•
Electrólisis				
Tratamiento de Escorias	••		•CO	

Nota. ••• más significativa. • menos significativa.

Los óxidos de nitrógeno son relativamente insignificantes [tm 24, DFIU 1996] pero pueden ser absorbidos en el ácido sulfúrico de un proceso primario; el uso de enriquecimiento con oxígeno puede reducir en ocasiones la formación de óxidos de nitrógeno por vía térmica. Esto depende del punto en que se agregue oxígeno, en ocasiones se produce una mayor concentración de óxidos de nitrógeno debido al aumento de temperatura, aunque el volumen de gas y la cantidad total es menor. Pueden usarse quemadores de bao nivel de NOx. La formación de dioxinas en la zona de combustión y en la zona de enfriamiento del sistema de tratamiento de gases de escape (síntesis de novo) puede ser posible. Las emisiones pueden salir del proceso como emisiones de chimenea o como emisiones fugitivas, según los sistemas de eliminación empleados y la calidad del mantenimiento de la planta. Las emisiones de chimenea se controlan normalmente de forma continua o periódica y son reportadas por personal in situ o por asesores externos a las autoridades competentes.

3.2.2.3.1 Monóxido de carbono

Además de las emisiones arriba indicadas, los procesos de fundición que utilizan hornos que necesitan mantener una atmósfera reductora pueden producir una concentración significativa de monóxido de carbono. Esto es así especialmente para la fusión de cobre de alta calidad en hornos de cuba en combinación con moldeo de formas o producción de alambrón, ya que los productos requieren un nivel de oxígeno controlado para obtener una alta conductividad. Por consiguiente,

el proceso opera en condiciones reductoras y el contenido de monóxido de carbono de los gases puede ser elevado, los niveles típicos son ~ 5.000 mg/Nm^3. Los sistemas de control de los quemadores que se emplean pueden asimismo minimizar el CO y mantener la calidad de los productos. También pueden incorporarse alarmas de CO en el proceso. La producción típica de CO en un horno de cuba utilizado para producción de alambrón o semis es de 2.000 a 11.000 gramos por tonelada de cobre [tm 117, Cu Expert Group 1998]. En algunas instalaciones se utiliza postcombustión para eliminar los hidrocarburos de los gases cuando se procesa chatarra recubierta con compuestos orgánicos. El CO también se destruye al mismo tiempo, y las emisiones reportadas son de ~ 45 gramos por toneladas de cobre [tm 124, DFIU Cu 1999].

Es posible predecir las concentraciones de base de CO, lo que puede utilizarse para determinar el efecto del CO sobre la calidad del aire local (hay una propuesta de Calidad del Aire de la UE para CO) por lo que las ulteriores medidas de eliminación necesarias pueden evaluarse localmente. La eliminación de CO mediante combustión de los gases de los hornos de cuba con estos niveles de CO requeriría combustible adicional, por lo que la emisión de CO_2 aumentaría exponencialmente.

También se produce monóxido de carbono durante la operación de los hornos de limpieza de escoria y de los altos hornos, y en algunas circunstancias puede emitirse en los gases de escape. Puede utilizarse postcombustión para eliminar el CO, lo que da concentraciones típicas del orden de 10 a 200 mg/Nm^3. Hay al menos un ejemplo en el que se inyecta oxígeno mediante lanza en la parte superior de un alto horno, por encima de la zona de reacción, para crear una zona de postcombustión en el cuerpo del horno. Esta medida destruye asimismo los compuestos orgánicos como las dioxinas. Los hornos eléctricos utilizados para la limpieza de escorias y procesos de reducción se utilizan normalmente con postcombustión, tanto dentro del horno como en una cámara de reacción especial.

3.2.2.3.2 Polvo y compuestos metálicos

Pueden emitirse desde la mayoría de etapas del proceso. Las técnicas para el tratamiento de las emisiones derivadas de las etapas de manipulación, almacenamiento, secado y tratamiento se cubren en el Capítulo 2, y la aplicación de las mismas debe llevarse a cabo para prevenir y minimizar dichas emisiones.

Las emisiones directas y fugitivas de las etapas de fundición, conversión y refinado son potencialmente elevadas. La importancia de las emisiones es también elevada, ya que estas etapas de proceso se utilizan para eliminar los metales volátiles como Zn, Pb, algo de As y Cd del cobre, y estos metales están presentes en el gas y en parte en el polvo.

Normalmente, las fundiciones primarias contienen el polvo muy bien, y son suficientemente herméticas para minimizar las emisiones fugitivas, se utilizan quemadores de concentrado o lanzas, por lo que son fáciles de cerrar. Normalmente se realiza un buen mantenimiento de los hornos y conductos para minimizar las emisiones fugitivas, y los gases recogidos se tratan en sistemas de eliminación de polvo antes de los procesos de recuperación de azufre.

Las fundiciones secundarias tienen mayor tendencia a las emisiones fugitivas durante los ciclos de carga y sangrado. Estos hornos tienen grandes puertas de carga, y la deformación y mal cierre de estas puertas es un factor a tener en cuenta. Los gases que se recogen se enfrían normalmente, y el polvo se elimina de los caudales de gas mediante precipitadores electrostáticos o filtros de bolsa. Normalmente se consigue una elevada eficacia de filtración, y las concentraciones de polvo tras la eliminación son del orden de < 1 - 10 mg/Nm^3 [tm 210, Copper Expert Group 1999; tm 160, Winter Cu 1999].

Debido al tipo de operación en discontinuo, las etapas de conversión y refinado no pueden

ser tan herméticas como la etapa de fundición. La alimentación y transferencia de mata, escoria y metal es una fuente potencial significativa de vapores fugitivos. Un factor más importante es que el uso de sistemas de transferencia de cuchara o artesa puede inhibir la eficacia de las campanas de recogida de vapores, particularmente con convertidores Pierce-Smith o similares. Se utilizan diversos sistemas se recogida de vapores para minimizar estas emisiones fugitivas, y funcionan de forma muy efectiva. Las adiciones "a través de las campanas" de fundente u otros materiales puede minimizar el tiempo de apertura. La producción de mata de alta calidad reduce el número de transferencias con cuchara y por consiguiente reduce el potencial de vapores. Las emisiones fugitivas o no recogidas son por consiguiente muy importantes. Estos aspectos dependen de que la recogida primaria de vapores, y en algunos casos la secundaria, sea eficaz y efectiva.

Las etapas de fusión y moldeo utilizadas durante la producción de alambrón, semis, etc. son también fuentes potenciales de polvo y metales. La producción de aleaciones de cobre como latones produce considerables cantidades de vapores (ZnO) en la etapa de moldeo, y esto requiere una recogida eficaz. La carga de polvo es generalmente baja, pero puede usarse recuperación de calor/energía si es practicable. Normalmente se utiliza un sistema eficaz de recogida de vapores y filtros de tejido. [tm 117, Cu Expert Group 1998].

Las emisiones de metales dependen en gran medida de la composición del polvo producido por los procesos. La composición varía ampliamente, y está influenciada a) por el proceso que es la fuente de polvo, y b) por las materias primas que se están procesando. Por ejemplo, el polvo producido de un convertidor de chatarra es totalmente distinto al de un convertidor de mata. La siguiente tabla muestra los rangos medidos de metales en polvo en una serie de procesos de cobre.

Tabla 3.10: Principales componentes del polvo de los procesos de cobre

Componente	Polvo de PE de horno de fundición de concentrado a mata	Polvo de alto horno	Polvo de convertidor de chatarra	Polvo de PE de convertidor de mata	Polvo de horno eléctrico de limpieza de escoria	Polvo de horno de ánodos
Pb%	0,1 – 5	5 – 40	5 – 30	2 – 25	2 – 15	2 – 20
Zn%	0,1 – 10	20 – 60	25 – 70	5 – 70	25 – 60	5 – 40
Sn%	0,1 – 1	0,2 – 5	1 – 20	0,1 – 4		
Cu%	5 – 30	2 – 12	2 – 15	10 – 25	0,5 – 2,5	15 – 25
As%	0,1 – 4					0,5 – 10
Ni%	0,1 – 1	0,1 – 1		0,1 – 1		

3.2.2.3.3 Compuestos orgánicos

Pueden emitirse durante la producción primaria de la etapa de secado, según los materiales utilizados para el tratamiento de los minerales y del combustible empleado para el secado. Para la producción secundaria, las fuentes más significativas son las etapas de tratamiento de chatarra, fundición y refinado. La etapa de conversión de cobre secundario es también una fuente potencial si se agrega chatarra contaminada con material orgánico al convertidor y no se consigue una combustión completa, especialmente por lo que respecta a emisiones fugitivas. Para la producción de alambrón de cobre y semis, pueden emitirse COVs si se utiliza material aceitoso como material de partida, cuya cuantía puede ser de 5 – 100 g por tonelada de cobre. También pueden emitirse COVs de los procesos de desengrase o de extracción con disolventes.

3.2.2.3.4 Dioxinas

Entre los compuestos orgánicos que pueden emitirse se incluyen dioxinas derivadas de la mala combustión de aceite y plástico en el material de entrada, así como de síntesis de novo si los gases no se enfrían con suficiente rapidez. Puede aplicarse un tratamiento de la chatarra para eliminar la contaminación orgánica, pero lo más normal es utilizar sistemas de postcombustión para tratar los gases producidos, seguidos de un enfriamiento rápido. En los casos en los que no es posible tratar los gases de los hornos mediante postcombustión, puede oxidarse agregando oxígeno por encima de la zona de fusión. También es posible analizar la contaminación orgánica de las materias primas secundarias, con el film de poder utilizar la combinación más apropiada de horno y sistema de eliminación con objeto de evitar emisiones de humo y vapores, así como de las dioxinas asociadas.

El Grupo de Trabajo Técnico informa de que en el caso de fundición y conversión primaria, las elevadas temperaturas operativas destruyen los componentes orgánicos, y la presencia de dióxido de azufre inhibe la síntesis de novo de dioxinas. La chatarra de fusión contaminada con material orgánico es también una posible fuente de dioxinas en la industria de fabricación de semis.

El Capítulo 2 describe algunos de los factores que influyen sobre las emisiones de dioxinas. Las técnicas utilizadas para la eliminación de dioxinas en este sector incluyen la postcombustión, la manipulación y enfriamiento controlado de gases y la eliminación eficaz de polvo; también se utiliza la absorción con carbón activado.

3.2.2.3.5 Dióxido de azufre

Las fuentes más significativas de dióxido de azufre son las etapas de tostación, fundición y conversión de la producción primaria de cobre con concentrados de sulfuro [tm 24, DFIU 1991]. Cabe esperar emisiones fugitivas, que se recogen en diversas formas [tm 124, DFIU Cu 1999]. También puede haber emisiones de dióxido de azufre de la etapa de secado del concentrado (principalmente del combustible utilizado en el quemador) y de las etapas de refinado primario en las que el cobre blíster contiene de un 0,03% a un 0,1% de azufre disuelto. La concentración en el gas es normalmente muy baja, y por lo general se utiliza un lavado simple de los gases si es necesario.

Si no se aplica tostación parcial y fundición con calcinación para producir mata en unidades separadas debido al uso de un material de alimentación especial, la tostación de concentrados de cobre se realiza simultáneamente con la fundición. El uso de hornos cerrados para fundición permite una recogida eficaz del dióxido de azufre. Todas las fundiciones de la UE utilizan enriquecimiento con oxígeno, que produce una elevada concentración de dióxido de azufre. Esto permite por lo tanto minimizar los volúmenes de gases de escape y reducir el tamaño del sistema de tratamiento de gases, incluida la planta de ácido sulfúrico. Niveles muy elevados de enriquecimiento de oxígeno pueden aumentar la concentración de trióxido de azufre en los gases que pasan a la planta de ácido. Esta mayor cantidad de trióxido de azufre en el gas del horno es absorbido en los lavadores y aumenta la cantidad de ácido diluido para tratamiento, otros usos o desecho. Para convertir los gases se utilizan plantas de ácido sulfúrico de contacto de 4 o 5 pasadas. En algunos casos, se utilizan plantas de contacto simple si el contenido de dióxido de azufre es bajo (< 6%), de lo contrario se utilizan plantas de doble contacto [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Si es necesario, puede producirse dióxido de azufre líquido con parte del dióxido de azufre contenido en el gas.

La etapa de conversión de mata también produce una concentración significativa de dióxido de azufre. Hay dos problemas potenciales cuando se utilizan convertidores de alimentación en

discontinuo como convertidores Pierce-Smith o similares. Primero, la recogida de gas no es totalmente eficaz, y pueden hacerse las mismas observaciones que para el polvo. En segundo lugar, la concentración de dióxido de azufre en los gases varía considerablemente según la etapa de conversión y puede causar problemas en los sistemas de eliminación de dióxido de azufre a menos que estén diseñados específicamente para tener en cuenta esta variación. Estos gases se mezclan con los gases de concentración mayor y constante producidos por la fundición primaria para mantener la operación autotérmica de la planta de ácido sulfúrico. El uso de varios convertidores en una operación secuencial en fase que combine los gases de escape puede también reducir este efecto.

Procesos continuos como el proceso Mitsubishi y el proceso de Fundición/Conversión Flash Kennecott - Outokumpu mantienen una concentración elevada y constante de dióxido de azufre y no precisan transferencias con cuchara [tm 67, Kennecott 1997; tm 73, Mitsubishi 1993]. En consecuencia, los volúmenes de gas que se producen son menores. Esto significa que la concentración de dióxido de azufre es mayor en el gas efluente, pero la masa es mucho menor, al menos durante la manipulación, limpieza y enfriamiento del gas. En la planta de contacto, la relación SO_2/O_2 debe ajustarse, y diluir la concentración de SO_2 al mínimo tolerable.

Tras recuperar el calor y limpiar en PEs el SO_2, el gas de las etapas de fundición se convierte a trióxido de azufre (SO_3). Las plantas de ácido sulfúrico en la Industria Europea del Cobre tienen una eficacia de conversión indicada del 99,5 al 99,8% (excluido arranque, etc.) [tm 92, Copper Expert group 1998]. Una cantidad muy pequeña de SO_3 no se absorbe y se emite junto con el SO_3 residual [tm 124, DFIU Cu 1999]. Durante el arranque y la parada, puede haber ocasiones en las que se emitan gases diluidos. Estos episodios deben determinarse para cada instalación particular, y muchas empresas han hecho considerables mejoras en el control de proceso para reducir estas emisiones. La altura de la chimenea utilizada para los gases de la planta de ácido tiene normalmente en consideración estos factores con el fin de reducir el impacto sobre el entorno local.

El dióxido de azufre puede también estar presente en los gases producidos durante las etapas de fundición secundaria, debido al contenido de azufre del combustible o de las materias primas. En algunos casos se utilizan lavadores para eliminar el SO_3, y en un caso concreto los gases de un horno eléctrico (y un convertidor de Co/Pb) se desvían a una planta de ácido de ácido sulfúrico de un convertidor de cobre primario cuando hay presentes determinadas materias primas.

3.2.2.3.6 Oxidos de nitrógeno

Las etapas de producción del cobre se basan normalmente en temperaturas elevadas, aunque también se asocian con el uso de oxígeno. Esto reduce la presión parcial de nitrógeno en la llama y reduce la formación de óxido de nitrógeno, siempre que no haya nitrógeno presente en las zonas muy calientes. Los niveles típicos indicados para la emisión de óxidos de nitrógeno para cobre secundario son del orden de 50 a 500 mg/Nm^3 según el horno y el tipo de operación. Para NO_x, el uso de procesos de gran eficacia (ej. Contimelt) requiere el establecimiento de un equilibrio local entre el consumo energético y el valor alcanzado.

Los óxidos de nitrógeno de los procesos primarios son absorbidos principalmente en el ácido sulfúrico producido. Los óxidos de nitrógeno no son por lo tanto un aspecto medioambiental grave en la instalación.

3.2.2.3.7 Resumen de emisiones a la atmósfera

Tabla 3.11: Emisiones específicas a la atmósfera de algunos procesos primarios y secundarios [tm 124, DFIU Cu 1999; UK Chemical Release Inventory 1998; tm 160 Winter Cu 1999]

Tipo de	Polvo, g/t de metal producido	Dióxido de azufre, g/t de metal producido	Cu, g/t de metal producido	Pb, g/t de metal producido	As, g/t de metal producido
Cu primario	160 – 1.000	6.600 – 16.000	30 – 250	7 – 35	3 – 20
Cu secundario	100 – 1.000	500 – 3.000	8 – 100	10 – 60	0,5 –– 5
Taller de fusión, Fabricación de semis			1 – 3,5	0,1 – 1	0,01 – 0,2
Producción de alambrón	20 – 500	10 – 50	12 – 260		

Tabla 3.12: Emisiones alcanzables en un proceso de fabricación de semis [tm 124, DFIU Cu 1999]

Unidad de proceso		Polvo mg/Nm³	CO mg/Nm³	TCO mg/Nm³
Taller de fusión	Horno eléctrico	< 10		< 20
	Horno rotatorio	< 10		< 50
	Horno de cuba (ASARCO)	< 10	< 100*	< 20
Taller de laminación				< 50
Fresado		< 10		

Nota *) Con postcombustión según el tipo de alimentación (contenido de aceite/comp. orgánicos).

Tabla 3.13: Emisiones específicas de un proceso de fabricación de semis [tm 124, DFIU Cu 1999]

Unidad de proceso		Polvo g/t	CO g/t	TCO g/t	PCDD/F µg/t (I-TEQ)
Taller de fusión	Horno eléctrico	< 70	-	< 80	< 5
	Horno rotatorio	< 50	-	< 11	< 10
	Horno de cuba (ASARCO)	< 12			< 10
	sin postcombustión		< 10.000		
	con postcombustión		< 45	< 9	
Taller de laminación		-		< 100	
Fresado		< 20			

Nota *) Postcombustión según el tipo de alimentación (contenido de aceite/comp. orgánicos).

3.2.2.4 Emisiones al agua

Los procesos pirometalúrgicos utilizan cantidades significativas de agua de refrigeración (los sistemas de refrigeración se tratan en el Capítulo 2 y en un BREF horizontal separado sobre sistemas de refrigeración). En la tabla siguiente se muestran otras fuentes de agua de proceso. De estas fuentes pueden emitirse al agua sólidos en suspensión, compuestos metálicos y aceites.

En una serie de instalaciones, el agua de refrigeración y el agua residual tratada, incluida el agua de lluvia, se reutilizan o reciclan a los procesos [tm 210, Copper Expert Group 1999]. Las fuentes potenciales y la importancia de las emisiones al agua se muestran en la tabla siguiente y se tratan más adelante en esta sección.

Tabla 3.14: Importancia de las emisiones potenciales al agua de los procesos de producción de cobre

Fuente de Emisión	Sólidos en Suspensión	Compuestos Metálicos	Aceite
Drenaje Superficial	•••	••	•••
Agua de Refrigeración para enfriamiento directo	•••	•••	•
Agua de Refrigeración para enfriamiento indirecto	•	•	
Agua de Granulación	•••	••	
Lixiviación (si no es un circuito cerrado)	•••	•••	•
Decapado	••	•••	•••
Sección de Tanques (si no es un circuito cerrado)	•••		
Sistemas de Lavado	•••	•••	

Nota. ••• más significativo……..• menos significativo.
Los circuitos de lixiviación y los circuitos abiertos en las secciones de tanques no se utilizan en la UE.

3.2.2.4.1 Sólidos en suspensión y compuestos metálicos

Su emisión puede proceder de distintas etapas del proceso, la más importante puede ser las aguas residuales y enjuagues de las operaciones de decapado. Las técnicas para tratar las emisiones de las áreas de manipulación y almacenamiento de materias primas se cubren en el Capítulo 2, y la aplicación de tales técnicas se utiliza para evitar y minimizar las emisiones. El agua superficial puede provenir de la lluvia o de la humidificación del material almacenado para evitar la formación de polvo.

Las fuentes potenciales de sólidos en suspensión y compuestos metálicos son los sistemas de refrigeración, granulación y lixiviación. En general estos sistemas son cerrados y se recircula el agua, o son sin contacto.

En las secciones de tanques, líneas de decapado y lavadores también se producen aguas de lavado, electrolitos consumidos y efluentes de proceso. Estos efluentes contienen cantidades significativas de compuestos metálicos en solución y se tratan junto con las soluciones sangradas de los sistemas cerrados de refrigeración y granulación antes de su evacuación al agua [tm 28, WRC 1993]. Pueden producirse fugas en los sistemas, y se requieren sistemas de control para las conducciones y tanques de almacenamiento, y en concreto para las conducciones fuera de la planta y en casos en se encuentren en zonas sin sistema de recogida. Los procesos de tratamiento de aguas residuales se describen en el Capítulo 2, y el método utilizado depende de los contaminantes presentes, el destino del agua tratada y la normativa medioambiental local.

Tabla 3.15: Ejemplo del contenido de metales en diversas aguas residuales tras su tratamiento [tm 124, DFIU Cu 1999]

	Caudal	Componentes principales [mg/l]					
	[m³/a)	Cu	Pb	As	Ni	Cd	Zn
Agua de proceso	72.000	0,01-0,2	0,001-0,04	0,01-0,1	0,004-0,15	0,0001-0,1	0,01-0,2
Agua superficial	322.000	0,01-0,4	0,005-0,2	0,003-0,07	0,002-0,4	0,0002-0,1	0,03-0,4
Agua de enfriamiento directo	11.300.000	0,01-0,25	0,001-0,1	0,001-0,1	0,002-0,06	0,0001-0,003	0,02-0,5
Agua de refrigeración (total)	82.000.000						

Nota: La tabla hace referencia a un complejo de fundición / refinería de cobre primario/secundario situado en un río cerca del mar, que produce 370.000 toneladas de cátodo de Cu al año.

Tabla 3.16: Cargas anuales evacuadas al agua de una planta de producción de semis de cobre [tm 124, DFIU Cu 1999]

Sustancia	Valor kg/a
Cu	11
Ni	3
Zn	25
Pb	1
Cr	1
As	0,01
Cd	0,01
Hg	0,01
Sn	1

Note. Evacuación de efluentes 35.000m³/a.

En todos los procesos se producen lodos, que normalmente se envían para su desecho controlado, y en algunos casos se devuelven a la fundición para recuperar la fracción metálica.

3.2.2.4.2 Aceite

Puede estar presente en las materias primas secundarias y puede ser arrastrado por el agua desde las áreas de almacenamiento. Las técnicas empleadas para el almacenamiento se tratan en la sección 2. Se utilizan ceras y aceites en los procesos de recubrimiento y trefilado asociados con la producción de barras y otras formas, y su presencia se tiene en cuenta para evitar la contaminación del agua.

3.2.2.5 Subproductos, residuos de proceso y desechos

Algunos productos intermedios generados durante la producción de cobre pueden estar incluidos en la Lista de Desechos Peligrosos (Resolución del Consejo 94/904/CEE) que se

incluye en la sección 2.10.1. No obstante, la mayoría de estas sustancias contienen cantidades recuperables de cobre y otros metales no férreos y por consiguiente se utilizan como materias por derecho propio; por ejemplo, la escoria de la producción de estaño a partir de casiterita es la principal fuente de tantalio y niobio. Los polvos de combustión de todas las fuentes pueden también reutilizarse en el proceso de fundición y, para evitar la formación de polvo durante su manipulación, deben manipularse con cuidado, normalmente en sistemas especialmente diseñados, o venir ya pretratados para los requisitos de proceso ulteriores. Algunos recubrimientos de hornos pueden también reutilizarse como masa de sangrado o en el proceso, y pueden incorporarse en la escoria. En otros casos, los revestimientos se desechan.

Tabla 3.17: Productos intermedios, subproductos y residuos de la producción de cobre

Fuente de Proceso	Productos Intermedios, Subproductos, Residuos	Uso final
Sistemas de eliminación	Polvos de Filtro. Compuestos de mercurio. Catalizadores y ácido consumidos. Lodos de ácido sulfúrico. Acido diluido.	Materia prima para Cu (devuelta a fundición), Pb, Zn y otros metales. Materia prima para Hg. Industria Química. Neutralización Otros usos, como lixiviación, descomposición para SO_2
Fundición	Escoria Revestimientos de hornos	Al horno de escorias u otro proceso de separación – reciclaje interno. Recuperación o desecho
Convertidor	Escoria	A fundición – reciclaje interno.
Horno de escorias	Escoria	Abrasivo, material de construcción
Horno de refinado (ánodos)	Escoria	A fundición – reciclaje interno.
Sección de tanques	Sangrado de electrolito Restos de ánodos Lodo anódico	Sales de Ni , Recuperación de Cu, recuperación de ácido u otro uso. Reciclaje interno: Convertidor (enfriamiento) u horno de ánodos. Recuperación de metales preciosos.
Fusión/Fundición	Escorias y escorias superficiales	Materias primas para la recuperación de metales.
General	Aceites	Recuperación de aceite.
Hidrometalurgia	Electrolito consumido	Lixiviación.
Producción de semis	Soluciones de decapado ácido y enjuagues.	Desecho si tiene un bajo contenido de metales no férreos, o venta para recuperación de metales.
Producción de alambrón	Soluciones de decapado ácido (si se aplican).	Recuperación en células electrolíticas separadas.

Los residuos destinados a desecho se mantienen el mínimo y consisten principalmente en limos ácidos de las plantas de ácido sulfúrico que se tratan y se envía para desecho, o revestimientos de hornos, algunos de los cuales no pueden ser recuperados en el proceso. En algunos casos se producen restos del proceso de escoria del horno de fundición o convertidor por flotación, estos restos se desechan in situ o en la mina si está cerca.

La tabla superior muestra los posibles usos de los residuos de proceso. Muchos de los residuos se utilizan como materias primas para la producción de otros metales, o como materiales reciclados dentro de la ruta de producción de cobre [tm 210, Copper Expert Group 1999]. Las

siguientes tablas muestran ejemplos de las cantidades de residuos, productos intermedios y subproductos generados por los procesos primario y secundario.

Tabla 3.18: Ejemplo de la cantidad de residuos producidos por una instalación compleja primaria y secundaria [tm 124, DFIU Cu 1999]

Unidad de proceso	Residuo de subproductos	Cantidad [t/a]	Uso / Opción de tratamiento
Planta primaria: Producción anual de cátodos: cobre primario 220.000 t/a;			
Horno de fundición flash	Polvo	100.000	Uso interno en horno de fundición flash.
	Escoria	400.000	Proceso ulterior en horno eléctrico
Horno eléctrico	Polvo	400	Uso externo para la producción de Zn/Pb
	Escoria	400.000	Uso externo como material de construcción
Convertidor de cobre	Polvo	4.000	Reciclaje interno a horno de fundición flash u horno eléctrico (planta sec.)
	Escoria	150.000	Uso interno en el horno de fundición flash.
Horno de ánodos	Polvo	200	Uso interno en el horno de fundición flash.
	Escoria	20.000	Uso interno en el convertidor de cobre
Planta de ácido sulfúrico	Acido sulfúrico	656.000	Subproducto para venta
Planta secundaria: Producción anual de cátodos: cobre secundario 150.000 t/a.			
Horno eléctrico	Polvo	10.000	Subproducto para la venta para recuperar Zn
	Escoria	40.000	Uso externo como material de construcción
Convertidor	Polvo	400	Proceso ulterior en horno eléctrico
	Escoria	10.000	Proceso ulterior en horno eléctrico
Proceso Contimelt	Polvo	1.000	Uso interno en horno de fundición flash/horno eléctrico
	Escoria	2.000	Uso interno en el convertidor de cobre
Convertidor de chatarra/Planta de aleación de Sn/Pb	Polvo	1.000	Proceso ulterior en Planta de aleación de Sn/Pb
	Escoria	2.000	Uso interno en horno eléctrico
Otros:			
Electrólisis	Limo anódico (peso húmedo)	3.000	Uso interno en la planta química para la recuperación de metales preciosos y Se, Te, Pb
	Solución final	35.000 m^3	Uso interno en la planta química para la producción de sulfato de níquel, As_2O_3,H_2SO_4
Planta de tratamiento de aguas residuales de proceso	Lodo (peso húmedo)	1.500	Desecho como residuo peligroso
General	Chatarra de electrodomésticos	400	

Tabla 3.19: Ejemplo de la cantidad de residuos producidos por una instalación secundaria [tm 124, DFIU Cu 1999]

Unidad de proceso	Residuo de subproductos	Cantidad [t/a]	Uso / Opción de tratamiento
Alto horno	Escoria	30.000 – 35.000	Venta como material de construcción
	Oxido de la cámara de postcombustión, caldera y enfriador	700 – 800	Uso interno en alto horno
	Oxido de filtro	1.000 – 1.300	Uso externo para recuperar Zn, Pb etc
Convertidores	Escoria	17.000 – 19.000	Uso interno en alto horno
	Oxido de la cámara de postcombustión	250 – 300	Uso interno en alto horno
	Oxido del enfriador	100	Uso interno en alto horno
	Residuos	300	Uso interno en alto horno
	Oxido de filtro	3.500 – 3.700	Uso externo para recuperar Zn, Pb etc
Horno de ánodos	Residuos de cobre anódico	7.000 – 8.000	Uso interno en el alto horno
	Oxido de filtro	150	Uso interno en el alto horno
	Residuos del horno	200	Uso interno en el alto horno
Electrólisis	Limo anódico	360	Uso externo
	Sulfato de níquel	700	Uso externo
General	Chatarra de electrodomésticos	n.d.	

Nota. Producción anual de 60.000 t/a de cátodo.

Las escorias contienen distintas cantidades de cobre y muchas se reutilizan o tratan para recuperar el contenido de material. El tratamiento de escorias se realiza frecuentemente en un proceso térmico para producir una escoria inerte.

Tabla 3.20: Composición de algunas escorias de fundición de cobre antes del tratamiento de limpieza de escorias [tm 124, DFIU Cu 1999]

Componente	Horno de Fundición	Convertidor Pierce-Smith	Escoria combinada tras limpieza de escorias en horno eléctrico
	[% en peso]		
Cobre	1 – 2.5	3 – 5	0.3 - 0.8
Hierro (total)	38 - 45	40 - 45	40 - 43
Sílice	30 - 33	25	28 – 32
Magnetita	4 - 18	25	< 2

Muchas de las escorias producidas por los procesos de tratamiento de escorias contienen niveles muy bajos de metales lixiviables y son estables. Con frecuencia se venden como productos para las industrias de abrasivos y de la construcción, ya que tienen excelentes propiedades mecánicas, en ocasiones superiores a las de los minerales naturales en competencia. Los aceites de las diversas fuentes dentro del proceso pueden recuperarse.

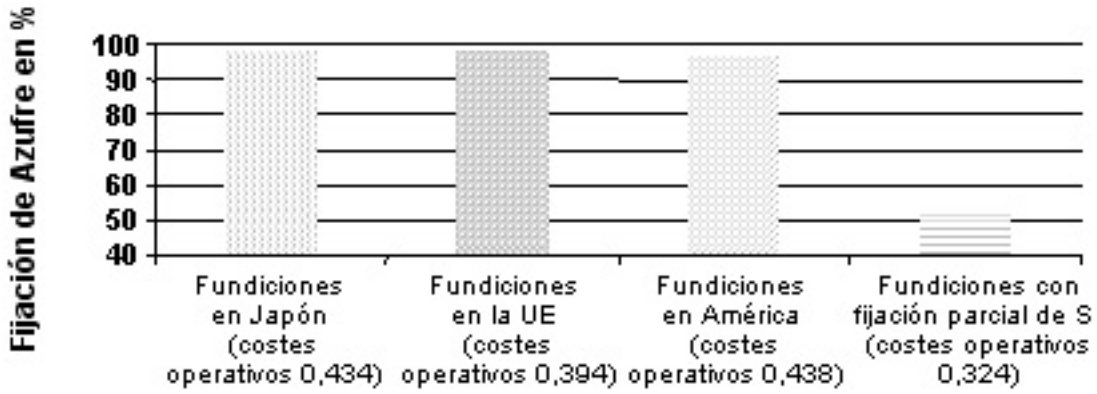
3.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de las emisiones y residuos, así como técnicas para la reducción del consumo global de energía. Todas ellas están disponibles comercialmente. Se facilitan ejemplos para demostrar las técnicas, que ilustran un alto nivel de comportamiento medioambiental. Las técnicas que se dan en los ejemplos dependen de la información facilitada por la industria, los Estados Miembros Europeos y la Oficina Europea de PCIC. Las técnicas generales descritas en el Capítulo 2 sobre "procesos comunes" son aplicables en gran medida a los procesos en este sector e influyen en el modo en que se controlan y utilizan los procesos principales y asociados.

El control de los parámetros operativos de los hornos y la prevención de las emisiones fugitivas de los hornos y de los procesos de sangrado y vertido es también importante. Las técnicas aplicadas por otros sectores son también aplicables, particularmente las relativas al uso de sistemas de recuperación de azufre.

Las técnicas apropiadas en cada centro concreto están fuertemente influenciadas por las materias primas a procesar, y en particular el tipo y la variabilidad del concentrado o de las materias primas secundarias pueden ser cruciales para la elección del proceso. A nivel mundial, algunas operaciones tienen una sola fuente especializada de materia prima, pero la mayoría de plantas de Europa compran concentrado en el mercado abierto y necesitan mantener flexibilidad para poder procesar una gama de materias primas. Análogamente, el estándar de los sistemas de recogida y mantenimiento utilizados en todo el mundo en la industria reflejan las normativas de calidad medioambiental locales, regionales o de largo alcance, y la comparación directa del comportamiento medioambiental de las combinaciones de procesos es por consiguiente difícil. No obstante, es posible juzgar cómo puede comportarse un proceso particular con un equipo de eliminación moderno y apropiado [tm210, Copper Expert Group 1999].

Tabla 3.21: Fijación media de azufre frente a coste operativo en /kg alcanzado por fundiciones de todo el mundo



Nota. Fijación de azufre: Japón 98.6%; Europa 98.3%; América 96.8%; Otros 52%. (Costes basados en 1 = 1.06 $ (16-6-99)).
Fuente: Brook Hunt 1998 CRU Copper Studies 1997.

Utilizando el grado de fijación de azufre como ejemplo, la tabla superior ilustra los efectos sobre el comportamiento medioambiental y los logros de las instalaciones europeas. La tabla muestra que puede conseguirse una buena fijación de azufre en la UE dentro de los límites económicos. Esto se muestra en términos de costes operativos directos para plantas con tecnología de proceso moderna y comparable pero con variaciones en el sistema de eliminación.

3.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales

3.3.1.1 Materias primas primarias

Las materias primas son concentrados, fundentes y combustibles. Aspectos importantes son la prevención de fugas de polvo y materiales húmedos, la recogida y tratamiento de polvo y líquidos y el control de los parámetros de entrada y de operación de los procesos de manipulación y alimentación.

Los aspectos específicos de este grupo son:

- La naturaleza potencialmente peligrosa de algunos concentrados y fundentes (ej. caliza) significa que los sistemas cerrados de almacenamiento, manipulación y tratamiento son las técnicas a considerar en estos casos. El polvo generado por algunas operaciones de trituración de escoria significa que la recogida y la eliminación pueden ser aplicables para este proceso. De forma similar, el agua de granulación de escoria puede requerir sedimentación u otro tratamiento antes de su evacuación.

- Los concentrados se mezclan con fundentes para producir una alimentación bastante constante, por lo que la práctica general de muestreo y análisis para caracterizar los concentrados, así como el análisis de los concentrados individuales por separado para poder preparar una mezcla óptima para fundición son técnicas a considerar.

- La preparación de mezclas de alimentación en plantas de mezcla de materiales o mediante sistemas de dosificación con sistemas de pesaje como transportadores con báscula o sistemas de pérdida de peso son técnicas a considerar. Forman una mezcla tipo sandwich con la correa de extracción. La mezcla final y la homogeneización tiene lugar en los sistemas de transporte y secado. Se utilizan transportadores cerrados o sistemas de transferencia neumática. Pueden usarse secadores rotatorios de gas caliente o de lecho fluidizado, secadores flash o de serpentín de vapor, estos últimos utilizan el calor residual de otras partes del proceso, siempre que el balance de calor lo permita. El secado y la etapa asociada de eliminación de polvo dependen por lo tanto de condiciones específicas del centro de producción, como la fiabilidad del suministro de vapor. Los filtros de tejido o cerámicos consiguen mejores eficacias de eliminación de polvo que los PEs.

- En algunos casos, el material puede tener una temperatura de ignición entre 300 y 400° C, pero este factor puede tratarse de diversas formas. Por ejemplo, el contenido de oxígeno de los gases en un secador de aire caliente es bajo, y la temperatura operativa se controla hasta una nivel tolerable máximo, principalmente mediante mezcla con aire frío; también puede usarse nitrógeno, por lo que la inflamación espontánea no será problema en estos casos. De forma similar, los secadores de serpentín de vapor pueden mantener una temperatura baja en el concentrado y un caudal de aire bajo, lo que puede conseguir el mismo efecto. Existen otras técnicas que se utilizan asimismo para evitar la inflamación espontánea. La detección de calor o de chispas permite identificar los puntos calientes, y estos dispositivos se utilizan para activar el enfriamiento con nitrógeno. Todas estas técnicas son técnicas a considerar, según el centro de producción.

- El almacenamiento del ácido producido durante el proceso en tanques de doble pared situados en recintos químicamente resistentes es otra de las técnicas a considerar. El tratamiento de los lodos ácidos de la planta de ácido sulfúrico y de los ácidos diluidos de los sistemas de lavado depende de las normativas locales de proceso o desecho, a menos que exista una aplicación local para el material. Los lodos anódicos y otros residuos que contienen metales destinados a la recuperación externa deben almacenarse en bidones u otro recipiente adecuado según el material.

EJEMPLO 3.01 SISTEMA DE RECEPCION Y MUESTREO DE MATERIAS PRIMAS.

Descripción: Sistema de recepción y muestreo de concentrado. Area cerrada de descarga de vehículos, sistema de transferencia cerrado y muestro computerizado. Zona de almacenaje y mezcla cerrada, transportadores cerrados.

Principales beneficios medioambientales: Prevención de polo fugitivo. Alimentación definida para el proceso.

Datos operativos: No disponibles, pero las indicaciones visuales son que la calidad es muy alta.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo. Reducción del uso de energía, reducción de las emisiones principales.

Economía: No hay datos disponibles, pero puede concluirse por la práctica común que estas técnicas son viables económicamente. Aumenta la eficacia de producción.

Aplicabilidad: La mayoría de procesos primarios.

Plantas de referencia: Actualmente en uso en instalaciones en España, Bélgica y Alemania.

Bibliografía: [tm 106, Farrell 1998]

3.3.1.2 Materias primas secundarias

Existe una gran variedad de materias primas secundarias utilizadas para la producción secundaria, que van desde polvo a grandes elementos. El contenido de cobre varía para cada tipo de material, así como el contenido de otros metales y contaminantes. Los materiales pueden clasificarse atendiendo a su grado de contenido de cobre (bajo, medio, alto). Las técnicas empleadas para el almacenamiento, manipulación y pretratamiento varían según el tamaño de material y el grado de contaminación. Estos factores varían de un centro a otro, y las técnicas descritas en el Capítulo 2 son técnicas a considerar. Los aspectos específicos del centro aplicables a este grupo son:

- El almacenamiento de polvos finos en recintos cerrados o en envases cerrados.
- El almacenamiento de materias primas secundarias que contengan componentes solubles en agua a cubierto.
- El almacenamiento de los materiales no polvorientos y no solubles en montones en lugares abiertos, y los elementos grandes individualmente en lugares abiertos.
- Los elementos grandes, como terrones de escoria, metal (ampollas, etc.) puede dañar las superficies de cemento, causando grietas escondidas; en cada caso específico se decidirá la técnica empleada.

Con frecuencia se utilizan etapas de pretratamiento para eliminar componentes orgánicos como aislantes de cables y restos de placas de circuito impreso, así como para separar otros metales como estaño o plomo.

- Las técnicas de fresado y desbaste con buena extracción y eliminación de polvo son técnicas a considerar. El polvo fino que se produce puede tratarse para recuperar metales preciosos, y se utilizan técnicas de separación neumática u otras técnicas de separación por densidades.
- Las técnicas criogénicas son también técnicas a considerar para hacer que las fundas de los cables se hagan frágiles y se separen más fácilmente.
- Los procesos térmicos para eliminación de revestimientos y aceites son asimismo técnicas

a considerar e incluyen una etapa de postcombustión para destruir los compuestos orgánicos en el gas de escape.
- Los polvo finos deben almacenarse y manipularse de modo que se evite la emisión de polvo. A menudo se mezclan y aglomeran para proporcionar una alimentación consistente al horno.

Tabla 3.22: Técnicas de almacenamiento, manipulación y pretratamiento a considerar para cobre

Materia prima	Almacenamiento	Manipulación	Pretratamiento	Comentarios
Carbón o coque.	Almacenes cubiertos, silos.	Transportadores cubiertos si no forma polvo. Neumática.		
Fuel oil y otros aceites.	Tanques o bidones en recintos aislados.	Conducciones seguras o sistema manual.		
Fundentes. Si forman polvo	Abierto sobre suelos de cemento o similares. Cerrado (silo) si es necesario.	Transportadores cerrados con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla con concentrados u otros materiales.	
Concentrados.	Cerrado a menos que no forme polvo.	Cerrada con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla con transportadores. Secado.	
Productos de cobre: cátodos, alambrón, palanquillas y conglomerados.	Zona abierta de cemento o almacenaje cubierto.			
Polvo fino.	Cerrado.	Cerrada con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla, Aglomeración.	
Polvo grueso (materia prima o escoria granulada)	Almacenes cubiertos.	Cargadora mecánica.	Eliminación de aceite si es necesario.	Recogida de aceite si es necesario.
Terrones (materia prima o escoria).	Abierto	Cargadora mecánica.		Recogida de aceite si es necesario.
Elementos enteros	Almacenes abiertos o cubiertos.	Cargadora mecánica.		Recogida de aceite si es necesario.
Virutas	Almacén cubierto.	Vagonetas de carga.	Secado o eliminación de aceite.	Recogida de aceite si es necesario.
Cable.	Abierto.	Cargadora mecánica.	Eliminación de fundas.	
Placas de circuito.	Almacenes cubiertos.	Cargadora mecánica.	Trituración + separación por densidades.	El contenido de plástico puede aportar calor.
Residuos de proceso para recuperación.	Abierto, cubierto o cerrado según la formación de polvo.	Depende de las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.
Residuos para desecho (ej. revestimientos de horno)	Almacenes abiertos, cubiertos o cerrados, o herméticos (bidones) según el material.	Depende de las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.

3.3.2 Procesos de fundición primaria

Los procesos de fundición de cobre practicados en la UE son [tm 92, Copper Expert Group 1998]:

- Fundición flash Outokumpu con un elevado enriquecimiento con oxígeno para fundición de concentrado normal de cobre en mata. Conversión de mata en convertidores Pierce-Smith para producir cobre blíster. Limpieza de escoria en horno eléctrico o por flotación.
- Tostación parcial de concentrados en un horno de tostación de lecho fluidizado, fundición en horno eléctrico a mata. Conversión de mata en convertidores Pierce-Smith para producir cobre blíster. Limpieza de escoria por volatilización. Las materias primas procesadas contienen zinc y un poco de plomo, además de cobre.
- Fundición y conversión a cobre blíster de materias primas primarias y secundarias que contienen plomo/cobre y algo de zinc en un horno ISA Smelt. Producción de plomo mediante limpieza de escoria en alto horno.

Todas éstas son técnicas a considerar.

El horno flash Outokumpu produce una mata de alta calidad que facilita y simplifica el proceso de conversión.

En algunos casos, el horno puede producir cobre blíster directamente sin etapa de conversión. El uso del horno flash Outokumpu de este modo se caracteriza por la producción de cobre blíster en un paso de fundición utilizando concentrados específicos con bajo contenido de hierro o concentrados de muy alta calidad (baja producción de escoria) [tm 137, Cu Expert Group 1998]. Por ejemplo, este proceso se utiliza en Polonia para producción directa de cobre blíster a partir de concentrado con bajo contenido de hierro.

El proceso de fundición flash Outokumpu incluye recuperación de calor en forma de vapor y electricidad, así como la recogida y recuperación del óxido de azufre en forma de ácido sulfúrico. La vida de los revestimientos del horno es de unos 5 a 10 años (según distintos factores, como el tamaño del horno, el ritmo de producción, los parámetros operativos aplicados, etc.)

Además de lo anterior, se utilizan muchos otros hornos para la etapa de fundición a nivel mundial [tm 137, Copper Expert Group 1998], algunos de los cuales también pueden considerarse. El uso del horno de reverbero para concentrados de cobre primario no se incluye como técnica a considerar.

Hay una distinción entre estos procesos, ya que dos de los procesos, Mitsubishi y Kennecott/Outokumpu, combinan las etapas de fundición y conversión. El proceso Mitsubishi utiliza tres hornos interconectados con flujo gravitatorio del material fundido entre los hornos. El proceso Kennecott/Outokumpu utiliza un proceso de granulación y molturación de mata entre los hornos de fundición y de conversión flash, por lo que las operaciones de las unidades están desligadas.

Todos los hornos mencionados han sido descritos anteriormente y se detallan en la tabla siguiente, que resume las ventajas y desventajas de los diversos procesos.

Tabla 3.23: Resumen de los hornos de Fundición Primaria de Cobre

Horno	Capacidad Aplicadax1000 t/n	Recogida de Gas	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Proceso de fundición:					
Fundición flash Outokumpu	~ 150 a 370 (principalmente 200 a 300)	Horno cerrado	Alta velocidad de fundición. Mata de alta calidad. Larga vida del revestimiento del horno.	Inversión comparativamente mayor pero menor coste operativo.	Se dispone de un amplio conocimiento del proceso.
Eléctrico (con tostación parcial)	~ 40 a 220	Horno cerrado	Primario y secundario. Compacto.	Proceso de dos etapas.	
ISA Smelt	~ 170 a 230	Con campana	Primario y secundario. Alta velocidad de fundición. Variedad de combustibles.	Requiere un sedimentador para separar mata y escoria.	La alimentación húmeda puede aumentar los volúmenes de gas.
Noranda y El Teniente (para 1 unidad)	~ 120 a 150 / y 70 a 190	Con campana	Compactos. Bajo coste.	Vida del revestimiento del horno ~ 2 años-	Los procesos se desarrollan rápidamente y su estado mejorará con el tiempo.
Inco Flash (incandescencia)	~ 120 a 200	Horno cerrado	Alta velocidad de fundición. Mata de alta calidad.	Autógeno, usa el 100% de O_2 , lo que ofrece un margen operativo reducido.	
Contop	~ 120	Horno cerrado	Alta eliminación de Bi y Zn.	Baja productividad.	Sólo una planta.
Proceso Vanyucov	~ 100 o más	Con campana	Similar a Noranda		Demasiado pocos datos para evaluar.
Proceso Baiyin	~ 70	Con campana	Similar a Noranda. Horno dividido para ofrecer un sedimentador integral.		Demasiado pocos datos para evaluar.
Proceso continuo acoplado					
Mitsubishi	~ 120 a 240	Horno cerrado	Puede también fundir chatarra comprada y anódica. Alta velocidad de fundición. Sin transferencia con cuchara.	Alguna limitación de alimentación. Funcionamiento acoplado con efecto sobre la eficacia de toda la línea. Contenido de azufre del cobre blíster.	3ª planta en construcción.
Proceso continuo no acoplado					
Fundición Flash Kennecott/ Outokumpu y proceso de conversión	~ 300	Horno cerrado	Acumulación variable de mata molturada. Sin transferencia con cuchara.	Coste de inversión comparativamente mayor pero costes menores operativos directos.	2ª planta encargada. Unico concepto de proceso con operación desacoplada de las unidades. Operación en distintos centros posible.

3.3.3 Eliminación de dióxido de azufre

El dióxido de azufre producido durante las etapas de fundición y conversión puede tener un grave impacto medioambiental y es eliminado de los gases en una planta de ácido sulfúrico o mediante recuperación de dióxido de azufre. Los diversos procesos utilizados para la eliminación de dióxido de azufre se describen en el Capítulo 2 de este documento. El proceso utilizado depende de los mercados locales para dióxido de azufre líquido, por lo general se emplea conversión a ácido sulfúrico [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Existen varios factores específicos para la industria del cobre. Todas estas técnicas son técnicas a considerar en la determinación de las MTD.

El uso de enriquecimiento con oxígeno en fundiciones de cobre produce un elevado contenido de dióxido de azufre en los gases del horno de fundición. Aunque posteriormente se diluye a un 14% de SO_2 para conversión. La reducción del volumen de gas permite un ahorro considerable en el tamaño de las conducciones, los ventiladores y la planta de eliminación [tm 140, Finland Cu 1999; tm 107, Ullmanns 1996]. El otro factor presente con una elevada concentración de gas es el potencial de utilizar el exceso de calor presente en el gas, particularmente tras las etapas de catálisis, que son fuertemente exotérmicas; no obstante, ello puede reducir la flexibilidad para aceptar variaciones en el caudal y la composición del gas. La dilución del gas antes mencionada debe también proporcionar suficiente oxígeno para el proceso catalítico.

El otro factor que afecta el contenido de dióxido de azufre es el contenido variable de los gases del convertidor de cobre, que se describe arriba. Esta variación del contenido de SO_2 significa que debe tenerse en cuenta el diseño de la planta de ácido en las etapas de lavado y transferencia de calor, así como en la elección del catalizador. Como se ha indicado anteriormente, la selección de catalizadores es ahora mayor, y los catalizadores dopados con óxido de cesio pueden mejorar el comportamiento.

El comportamiento de una planta de ácido metalúrgica depende del rendimiento de la sección de limpieza de gases. Si el sistema de limpieza no es bastante eficaz en la eliminación de impurezas del gas de entrada, el comportamiento de la sección de contacto se deteriorará. Aunque el diseño de los sistemas de limpieza húmeda de gases puede variar ampliamente, todos ellos tienen los siguientes requisitos y características en común:

- Los contaminantes sólidos deben ser eliminados, dando una calidad del gas final de < 1 mg sólido/Nm^3 (ópticamente limpio).
- El contenido de trióxido de azufre del gas debe reducirse al nivel de 15 - 25 mg/Nm^3.
- Los fluoruros y cloruros deben ser eliminados para evitar daños en el enladrillado de la torre de salida y el catalizador del convertidor.
- El gas debe enfriarse a una temperatura satisfactoria para el balance de agua de la planta. La temperatura depende de la concentración de SO_2 del gas y de la concentración del ácido producido. Un gas con un 4 - 6% de SO_2 requiere un enfriamiento a temperaturas por debajo de 30 ºC, mientras que un gas con un contenido de SO_2 claramente por encima del 10% puede tolerar temperaturas de gas de unos 35 - 40 °C, en la producción de ácido de una calidad del 98.5%.

El índice de conversión del dióxido de azufre en trióxido de azufre se indica generalmente para estos procesos, y puede ser del orden del 99,5 al 99,9% para los gases producidos de la fundición y conversión primaria de cobre. No obstante, existen varios factores que influyen sobre el índice de conversión y deben tenerse en cuenta a nivel local. Estos factores son:

- Limpieza del gas de entrada para reducir el empobrecimiento del catalizador, ej. la eliminación de mercurio según el contenido de la alimentación.
- Concentración y consistencia del gas de entrada. Los gases de mayor concentración y las

concentraciones más consistentes de SO_2 tienen a permitir la obtención de mayores eficacias de conversión. Esto es debido en parte a la mayor eficacia de enfriamiento entre pasadas que puede conseguirse cuando hay menos variaciones en la concentración.
- Elección del catalizador. Los catalizadores dopados con óxido de cesio tienen a aumentar los índices de conversión siempre que se controlen los otros factores para evitar su empobrecimiento. Los cambios rutinarios de catalizador pueden permitir efectuar mejoras en el catalizador durante el mantenimiento, pero para ser totalmente efectivas deben ir acompañadas de mejoras en otras áreas.
- Temperatura correcta del gas de entrada, contenido de oxígeno y balance de agua (ver arriba).
- Ajuste efectivo de las condiciones del gas, en particular la temperatura, entre las pasadas por el catalizador.

Los índices de conversión varían por consiguiente con el tiempo, y los valores en estado estacionario pueden inducir a error; no obstante, los siguientes ejemplos ilustran los resultados que pueden conseguirse en plantas bien diseñadas que trabajen con distintas características del gas de entrada.

EJEMPLO 3.02 PLANTA DE ACIDO SULFURICO CON DISTINTAS CONDICIONES DE GAS DE ENTRADA

Descripción: Sección de limpieza y lavado de gas. 3 líneas de planta de ácido sulfúrico Lurgi de doble contacto, 4 y 5 pasadas, catalizador moderno. Acido diluido para neutralización, ~ 12 – 15 m^3/h con un 5% de H_2SO_4, así como descomposición térmica del sangrado ácido con una mayor concentración de ácido (~ 50%) .

Principales beneficios medioambientales: Alto índice de conversión de dióxido de azufre. Se consigue más de un 99,6% con una instalación reciente.

Datos operativos:

Tabla 3.24: Datos operativos de una planta de ácido sulfúrico que opera en distintas condiciones de gases de entrada

Componente	Valores Medidos
Volumen de gas de escape:	320.000 Nm^3/h
SO_x	100 – 1.100 mg/Nm^3
SO_3	20 – 40 mg/Nm^3
NO_x (como NO_2)	20 – 45 mg/Nm^3
Cl- (como HCl)	2 – 7 mg/Nm^3
F- (como HF)	1 – 4 mg/Nm^3
Media de polvo residual:	< 2 mg/Nm^3
Rango de polvo residual :	1 – 7 mg/Nm^3
Rango de componentes:	
Cd	< 0.01 – 0.02 mg/Nm^3
Hg	< 0.01 – 0.07 mg/Nm^3
Tl	< 0.01 – 0.02 mg/Nm^3
As	< 0.01 – 0.1 mg/Nm^3
Se	< 0.01 – 0.02 mg/Nm^3
Sb	< 0.01 – 0.03 mg/Nm^3
Pb	< 0.01 – 0.15 mg/Nm^3
Cu	< 0.01 – 0.09 mg/Nm^3
PCDD/PCDF	0.001 – 0.01 ng ITE/Nm^3

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las emisiones principales de dióxido de azufre, recuperación del calor de los gases y del desarrollado durante la conversión.

Economía: 55 millones de € instalado para 1 línea de planta de ácido. Ver también apéndice sobre costes.

Aplicabilidad: Gases de escape de fundición primaria (Concentración de SO_x > 6%; combinación con los gases de escape de la fundición secundaria si es posible). Estas características pueden también aplicarse a la mayoría de instalaciones existentes.

Plantas de referencia: Actualmente utilizada por una planta en Alemania.

Bibliografía:- [tm 124, DFIU Cu 1999; tm 210, Copper Expert Group 1999].

EJEMPLO 3.03 PLANTA DE ACIDO SULFURICO QUE OPERA EN CONDICIONES IDEALES

Descripción: Planta de ácido sulfúrico de doble contacto, catalizador moderno de cesio, 4 pasadas. Proceso Químico IPA 3:1 de Monsanto Enviro

Principales beneficios medioambientales: Máxima recuperación de dióxido de azufre.

Datos operativos: Tratamiento de los gases combinados FSF y FCF con un 30 –40% de SO_2, diluido al 14% en la entrada de la planta de contacto con un caudal medio anual de 171300 Nm^3. Se consigue una conversión de hasta un 99,9%. La planta se basa en una alimentación con una concentración elevada y constante de dióxido de azufre, limpieza sofisticada de gas y enfriamiento entre pasadas, así como catalizador dopado con Cs. La emisión de dióxido de azufre en el gas de salida (como promedio anual) es de alrededor de 150 mg/Nm^3.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las emisiones principales de dióxido de azufre, recuperación de energía.

Economía: No se ha evaluado, pero el proceso ha sido instalado recientemente y funciona de forma económica.

Aplicabilidad: Caso específico para condiciones ideales de alimentación de gas.

Plantas de referencia: En funcionamiento una planta en EE.UU.

Bibliografía: [tm 140, Finland Cu 1998].

El otro factor importante cuando se usan gases de elevada concentración en una planta de ácido sulfúrico es el contenido de SO_2 residual en los gases de escape. La mayoría de plantas europeas consiguen una eficacia de conversión del orden del 99,5 al 99,8% y con una concentración de entrada de un 8.4, 10, 11 o 13% de SO_2 en la planta de contacto. El % de conversión excluye el periodo durante las operaciones de arranque y parada, así como los episodios de emergencia.

3.3.4 Procesos de fundición secundaria

La diversidad de materiales secundarios y la variación en su contenido de cobre y grado de contaminación ha llevado al desarrollo de una gama de hornos de fundición para materiales secundarios [tm 137 Copper Expert Group 1998]. En Europa, los hornos Mini Smelter, ISA Smelt, TBRC y de arco eléctrico sumergido cerrado se utilizan para una amplia gama de materiales. Todos ellos son técnicas a considerar según el tipo de materia prima.

El Mini Smelter se utiliza para materias primas secundarias y escoria, utilizando hierro y chatarra con alto contenido de hierro como reductor. El convertidor se utiliza para el tratamiento de cobre negro con contenido de hierro de los hornos de fundición y para la fundición de chatarra de aleación. El horno de reverbero con solera se utiliza para refinar el cobre de convertidor y la chatarra con elevado contenido de cobre.

La Tabla 3.24 ofrece un resumen de las ventajas y desventajas de los hornos de fundición secundaria para materiales de alimentación de baja calidad.

Algunas de las técnicas descritas en el Capítulo 2 son aplicables a la extracción y eliminación de vapores, así como a los sistemas de control utilizados por estos hornos. Estas técnicas no son utilizadas rutinariamente por todas las instalaciones en el momento actual. El sistema de control de proceso del alto horno se considera adecuado para el desarrollo, y su posible inclusión está sujeta a este factor.

Los gases de las fundiciones secundarias normalmente contienen poco o no contienen dióxido de azufre siempre que se eviten las materias sulfurosas, pero pueden contener cantidades significativas de los metales más volátiles como plomo, zinc, etc.. También pueden contener COVs, dioxinas, CO y polvo, por lo que las etapas de eliminación de las fundiciones secundarias incluyen refrigeración por gas (con recuperación de calor/energía), postcombustión para destruir el carbono orgánico y las dioxinas, separación de partículas gruesas si es necesario y filtros de tejido. Los polvos recogidos se reciclan para recuperar estos metales.

EJEMPLO 3.04 DESTRUCCION DE DIOXINAS

Descripción: Inyección de oxígeno en la parte superior del alto horno. El proceso en cuestión no tiene espacio para la instalación de un sistema de postcombustión. Existen ciertas restricciones en el grado de mezcla de gases conseguido, pero el rendimiento general es aceptable. Pueden desarrollarse sistemas de control para el sistema.

Principales beneficios medioambientales: Destrucción de dioxinas. Destrucción de CO y otros compuestos de carbono.

Datos operativos: Se consigue un nivel de dioxinas < 0,5 ng/Nm3 TEQ.

Efectos sobre otros medios: En general efecto positivo: Reducción de las emisiones principales. Coste energético de producción de oxígeno.

Economía: No disponible, pero la técnica es una modificación de bajo coste y opera viablemente.

Aplicabilidad: La mayoría de altos hornos con parte superior caliente y tal vez otros procesos.

Plantas de referencia: Actualmente en uso en plantas de Alemania.

Bibliografía: [tm 124, DFIU Cu 1999].

Tabla 3.25: Resumen de los hornos de fundición secundaria

Horno	Rango de Capacidad	Requisitos de Recogida de Gases y Elliminación	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Alto Horno	~150 a 200 toneladas al día por horno.	Semicerrado. Enfriamiento*, postcombustión y limpieza del gas (filtro de tejido).	Material de baja calidad.	Falta de desarrollo del control de proceso.	Mejora en el control de proceso para inclusión. El ritmo de producción depende del tipo de alimentación y del contenido de cobre.
Horno de Arco Eléctrico Sumergido	Para un horno de 8 MVA: Velocidad de fundición de 8 - 25 toneladas por hora	Cerrado. Postcombustión, enfriamiento y limpieza** del gas.	Establecido para chatarra informática. Bajo volumen de gas.	Algunas restricciones de alimentación.	El CO formado se quema en el horno para proporcionar calor. El ritmo de producción depende del tipo de alimentación, del contenido de cobre y de la capacidad nominal del horno.
Mini Smelter		Cerrado. Enfriamiento y limpieza del gas (filtro de tejido).	Alta velocidad de fundición. Compacto.	Algunas restricciones de alimentación.	
TBRC	Hasta ~ 40 a 70 toneladas por hornada	Cerrado. Enfriamiento y limpieza del gas (filtro de tejido).	Gama de material. Alta velocidad de fundición. Compacto. Rotación.	Caro.	
ISA Smelt	~ 30.000 a 40.000 toneladas al año.	Campanas. Enfriamiento* y limpieza** del gas	Gama de material. Alta velocidad de fundición.	En desarrollo.	No ha sido probado para material de baja calidad en condiciones reductoras. En fase de prueba para proceso en discontinuo de material con azufre, producción y conversión de mata.
Convertidor	~15 a 35 toneladas por hornada por convertidor.	Con campana. Enfriamiento y limpieza** del gas (filtro de tejido).			Para el tratamiento de cobre negro de hornos de fusión y fundición de aleaciones de cobre.
Horno de cuba con solera	~ 250 t/d	Cerrado y con campana, postcombustión, enfriamiento y limpieza (filtro de tejido)	Uso para fundición y refinado de metal, buena eficacia energética.	Algunas restricciones de alimentación.	Refinado al fuego de chatarra de alta calidad, cobre anódico y blíster.

Tabla 3.25: Resumen de los hornos de fundición secundaria *(continuación)*

Proceso Contimelt	50 – 100 t/h	Postcombustión (horno de reducción), WHB, limpieza (filtro de tejido).	Alta velocidad de producción, alto rendimiento energético.	Algunas restricciones de alimentación.	Refinado al fuego de chatarra de alta calidad, cobre anódico y blíster.
Horno de reverbero con solera	~ 250 a 400 toneladas al día	Semicerrado y con campana, enfriamiento *, postcombustión y limpieza (filtro de tejido)	Uso para conversión y refinado.	Cierre. Algunas restricciones de alimentación.	Puede usar toberas junto con el sistema inclinable. Refinado al fuego de chatarra de alta calidad y cobre blíster.

Nota: *) Si el nivel de temperatura es lo bastante alto, puede considerarse la recuperación del calor residual; para limpieza en filtros de tejido es necesario un enfriamiento ulterior.

**) En las plantas de la UE, el gas de escape puede contener dióxido de azufre durante ciertas campañas y por lo tanto se trata en un lavador o se envía a un planta de ácido en esos periodos.

3.3.5 Conversión

3.3.5.1 Convertidores de cobre primario

La etapa de conversión utilizada en Europa es el convertidor Pierce-Smith (o similar). También es comúnmente utilizado en e resto del mundo [tm 92, Copper Expert Group 1998]. Este tipo de convertidor tiene un nivel de rendimiento muy robusto y eficiente. Es capaz de realizar un alto nivel de tratamiento metalúrgico y puede usarse para volatilizar los metales incluidos plomo y zinc, que pueden recuperarse. El calor generado durante el proceso está también disponible para fundir chatarra de cobre (ej. chatarra de ánodos), y este factor es una ventaja importante. Presenta la desventaja de que se basa en la alimentación y transferencia de material mediante cuchara, vagoneta o molde.

Esto es una fuente potencial de vapores fugitivos que contienen polvo, metales y dióxido de azufre. La cuchara o vagoneta utilizada para alimentación puede interferir con la colocación eficaz de las campanas de recogida de vapores. Una buena operación del convertidor se basa por lo tanto en el uso de campanas de recogida de vapores primarios o secundarios durante la carga y vertido para recoger el máximo posible de vapores fugitivos. Los polvos, fundentes, carburantes, chatarra, etc. pueden añadirse a través de la campana. Los controles automáticos pueden evitar el soplado durante los periodos en los que el convertidor se abre o se vuelve a cerrar.

Estos procesos y las técnicas para el control y la recogida de vapores son adecuados para uso con instalaciones nuevas y existentes, y son técnicas a considerar.

En el mundo se utilizan otros procesos en convertidores [tm 137 Copper Expert Group 1998], que también son técnicas a considerar. Las etapas de conversión que se utilizan en los procesos continuos de fundición/conversión flash Mitsubishi y Outokumpu/Kennecott no requieren transferencia mediante cuchara y por consiguiente eliminan esta fuente de vapores secundarios. No obstante, estos dos procesos requieren todavía algún sistema de recogida de vapores en las artesas y tomas de sangrado, y el proceso de conversión flash depende de la molturación y manipulación de la mata del horno y de la mata de granulación de la escoria de conversión. De todos modos, estos procesos son inherentemente más limpios, y el control de emisiones no se basa tanto en el mantenimiento y el cuidado del operario. En el horno de conversión Mitsubishi, la mata fluye a un baño de cobre fundido y reacciona, formando escoria y metal; debido a esta reacción, el cobre blíster que sale del horno convertidor y entra en el horno de ánodos tiene un alto contenido de azufre. Los gases de escape tienen por lo tanto un contenido comparativamente mayor de dióxido de azufre y precisan la eliminación del SO_2 en la etapa de refinado al fuego.

Los gases recogidos de los ciclos de conversión se enfrían, limpian y envían a un sistema de recuperación de azufre. Como se ha indicado anteriormente, el contenido de SO_2 de los gases de

la operación del convertidor es variable entre el 6 y el 12%; a lo largo del ciclo de conversión, los gases se mezclan con los gases concentrados de la etapa de fundición. Los procesos de conversión continuos tienen concentraciones elevadas y constantes de SO_2 y por consiguiente permiten utilizar sistemas comparativamente menores de manipulación, limpieza y enfriamiento de gases, así como etapas menores de conversión de azufre.

El horno ISA Smelt se utiliza asimismo en un proceso combinado de fundición en discontinuo y conversión de mata de cobre/plomo a cobre blíster.

Tabla 3.26: Resumen de convertidores para producción primaria y secundaria de cobre

Convertidor	Rando de Capacidad	Recogida de Gas	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Convertidores en discontinuo					
Pierce-Smith (o similar)	~ 100 a 250 (primario) y ~ 15 a 35 (secundario) toneladas por carga de cobre	Campanas primarias y secundarias.	Tecnología simple y probada. Fusión de ánodos y otras chatarras. Robusto y flexible. Buen rendimiento metalúrgico. Volatilización de algunos metales incluidos.	Se basa en transferencias con cuchara.	Amplio conocimiento del proceso disponible. Utilizado en producción primaria y secundaria. Se utiliza carga a través de la campana.
Hoboken	~ 50 – 100 toneladas por carga de cobre	Sifón para la recogida de gas primario.	Recogida del gas más fácil.	Bloqueos en cuello de cisne. Transferencia con cuchara.	Principalmente primario. Se usa también para conversión de cobre/plomo.
TBRC	~ 40 – 70 toneladas por carga de cobre	Cerrado.	Fundición secundaria de chatarra.		Uso en producción secundaria.
ISA Smelt	~40.000 toneladas al año	Campanas, enfriamiento y limpieza del gas.			Primario y secundario. No ha sido probado generalmente. En el momento presente se aplica para conversión en discontinuo de mata de Cu/Pb.
Convertidores integrados.					
Mitsubishi	Hasta ~ 240.000 toneladas al año de cobre	Cerrado.	Alto contenido en SO_2.	Arreglos difíciles en las plantas existentes. Acoplado con el proceso de fundición.	Primario sólo. Realiza el tratamiento adicional de chatarra de Cu. Puede ser aplicable a otros hornos de fundición.
Kennecott/ Outokumpu	~ 300.000 toneladas al año de cobre	Cerrado.	Alta concentración de SO_2. Acumulación variable de mata.	Fusión de chatarra de ánodos todavía no disponible. Hasta la fecha sólo se ha aplicado en una fundición, y hay una segunda en construcción.	Primario sólo.

3.3.5.2 Convertidores de cobre secundario

Como se ha indicado [tm 137, Copper Expert Group 1998], la etapa de conversión más común para producción secundaria utiliza el convertidor Pierce-Smith (o similar), el horno TRBC y el ISA Smelt. El TRBC, cuando se utiliza como convertidor, es compacto y normalmente totalmente cerrado, lo que permite la recogida de los vapores secundarios. En el convertidor se realizan adiciones de chatarra de aleación e cobre. También se agrega carbón para el balance de calor y para la separación de elementos como zinc y estaño por volatilización en condiciones reductoras. Las mismas observaciones son aplicables a los sistemas de recogida de vapores que se utilizan en la producción de cobre primario. Un buen funcionamiento del convertidor se basa pues en el uso de campanas de recogida de vapores primarias y secundarias durante la carga y el vertido, para recoger el máximo posible de vapores fugitivos; los polvos como fundentes y el carburante pueden agregarse a través de la campana. Los controles automáticos pueden evitar el soplado durante los periodos en los que el convertidor se abre. Los gases de conversión de los procesos secundarios de cobre secundario se tratan mediante enfriamiento del gas (con recuperación de calor/energía si es practicable), separación de partículas gruesas y eliminación de dióxido de azufre si es necesario, así como filtros de tejido.

Estos procesos y las técnicas para el control y la recogida de vapores son adecuados para uso en instalaciones nuevas y existentes, y son técnicas a considerar.

3.3.6 Refinado al fuego

El refinado al fuego se ha descrito anteriormente. Los hornos rotatorios, los hornos de reverbero con solera, los hornos de cuba con solera y el proceso Contimelt son todos técnicas a considerar para fundiciones primarias y secundarias. Incluyen adiciones de gas mediante toberas o lanzas. El horno de cuba con solera y el proceso Contimelt están diseñados para alimentación sólida. El horno de reverbero con solera admite cobre sólido y fundido, y el horno rotatorio admite principalmente alimentación de cobre fundido. La alimentación de cobre fundido requiere normalmente el uso de transferencia de mediante cuchara para el llenado, y deben considerarse algunas emisiones fugitivas como problemas potenciales en este punto. Las adiciones de chatarra a los hornos de refinado pueden dar origen a vapores fugitivos, y debe evitarse la chatarra contaminada con material orgánico. La velocidad de adición de chatarra puede controlarse.

Los sistemas de recogida de vapores se utilizan para los hornos de refinado a la llama, el sistema de eliminación variará según el material empleado. El gas y los vapores del horno se recogen, se llevan a postcombustión durante la etapa de reducción, se enfrían y limpian en filtros de tejido o lavadores. Según el arrastre de azufre del convertidor, será necesario eliminar el dióxido de azufre, por ejemplo mediante lavado cáustico. Por ejemplo, al refinar cobre blíster del horno de conversión Mitsubishi, los gases de escape pueden tener un contenido comparativamente mayor de dióxido de azufre y requieren la eliminación de SO_2.

La recuperación de calor del gas de escape del horno de refinado es una técnica a considerar en las unidades que funden material sólido a velocidades altas.

El moldeo de cobre fundido desde el horno de ánodos a una rueda de moldeo o moldeadora continua son técnicas a considerar.

Los procesos y las técnicas para el control, recogida de vapores y eliminación de dióxido de azufre son adecuadas para uso con instalaciones nuevas y existentes.

3.3.7 Electro-refinado

Los procesos de electro-refinado que incluyen dimensiones de célula optimizadas (espaciado, tamaño de la célula, etc.), y utilizan cátodos en bruto de acero inoxidable u hojas de inicio de cobre son técnicas a considerar. Para las secciones de tanques existentes, el gasto de la conversión a cátodos preformados de acero inoxidable puede no ser apropiado, por lo que en estos casos se utilizarán hojas de inicio de cobre. La recogida y desprendimiento mecanizados (y automatizados), así como una detección de cortocircuitos más sofisticada son también técnicas a considerar según la escala de operación.

La recogida de cobre de soluciones comporta la recuperación electrolítica, y en estos casos se desprenden gases en el ánodo que pueden producir una neblina ácida. La recogida y eliminación de estas neblinas es una técnica a considerar.

Los sistemas de desagüe cerrados de las secciones de tanques y la recirculación de todas las soluciones recogidas, la recuperación de limos y el sangrado de electrolitos son asimismo técnicas a considerar.

3.3.8 Procesos de tratamiento de escorias

En el proceso existen diversas fuentes de escoria. Las técnicas a considerar dependen de la fuente, pero básicamente las escorias de fundición y algunas escorias de convertidor pueden tratarse en hornos de tratamiento de escorias (eléctricos) si se agrega carbón y se elimina el cobre de la escoria para producir mata y escoria limpia. Algunas escorias ricas en cobre como la escoria de convertidor pueden devolverse al horno de fundición o pueden enfriarse lentamente y separar una fracción rica en cobre, por ejemplo en una unidad de flotación de concentrado. La limpieza de escoria mediante la inyección de carbón en el baño de escoria utilizando un horno rotatorio es también una técnica a considerar, y la vaporización y recirculación de escorias a la primera etapa del horno de fundición (etapa de reducción o fundición de mata) son asimismo técnicas a considerar.

La escoria desprovista de cobre tiene un contenido muy bajo de metal lixiviable y tiene varias propiedades útiles que permiten su uso en ingeniería civil y como medio de granallado. El uso o reciclaje de escorias y el reciclaje de polvos de filtro se considera parte del proceso.

3.3.9 Procesos hidrometalúrgicos

El tratamiento hidrometalúrgico del óxido de cobre y de minerales de sulfuro de baja calidad no se practica en Europa actualmente, pero puede tener usos futuros, por ejemplo en una mina. El proceso básico descrito anteriormente y en el Capítulo 2 puede tener diversas variantes, según las características del material. Deben consultarse los informes de referencia [tm 130, Chadwick 1994; tm 137, Cu Expert Group 1998].

Dado que los procesos hidrometalúrgicos comportan etapas de lixiviación, extracción con disolventes y electrólisis, debe considerarse el desecho adecuado de los materiales lixiviados, así como la contención de los mezcladores y sedimentadores de extracción con disolventes. Las técnicas discutidas en el Capítulo 2 para evitar las emisiones al agua, por ejemplo mediante sistemas de desagüe de contención son relevantes, así como las técnicas para recuperar COVs y para el uso de disolventes benignos.

3.3.10 Estaño y otros metales

Los procesos discutidos anteriormente como técnicas disponibles se consideran todos ellos como técnicas a considerar en la determinación de las MTD. Los materiales de alimentación

específicos influirán sobre la elección final del proceso. Las técnicas discutidas en el Capítulo 2 deben también considerarse en conjunción con estos procesos.

3.3.11 Alambrón de cobre

Los procesos discutidos anteriormente como técnicas disponibles se consideran todos ellos como técnicas a considerar en la determinación de las MTD. Debe considerarse el uso de controles avanzados en los quemadores de un horno de cuba para optimizar la combustión y mantener niveles mínimos de CO mientras se mantiene la calidad del producto.

3.3.12 Lingotes, tubos y productos semiacabados

Los materiales de alimentación específicos y los productos finales influirán sobre la elección del proceso, y serán aplicables los factores discutidos en el la sección sobre alambrón. Si se utilizan aleaciones de cobre en el proceso, la temperatura de fusión debe controlarse, cualquier vapor producido durante la fusión y moldeo debe ser controlado eficazmente y tratarse en un filtro de tejido, pudiendo recuperarse ZnO del vapor. Las técnicas para el control de temperatura y de proceso tratadas en el Capítulo 2 deben asimismo considerarse en conjunción con estos procesos.

3.1.13 Recogida y eliminación de vapores/gases

Las técnicas de recogida y eliminación de gases discutidas en la sección 2.7 y 2.8 de este documento son técnicas a considerar para las diversas etapas de proceso involucradas en la producción de cobre, etc.

La identificación de cualquier contaminación orgánica de las materias primas secundarias es un aspecto particularmente importante a considerar para poder usar la combinación más apropiada de pretratamiento, horno y sistema de eliminación con el fin de evitar las emisiones fugitivas y destruir las dioxinas y otros componentes orgánicos en el gas de escape.

El uso de campanas secundarias es también una técnica a considerar, y el uso de sistemas inteligentes para la programación de la recogida de vapores puede reducir la demanda energética de estos sistemas. Existen varios aspectos específicos de cada centro aplicables, algunos de los cuales se tratan en la sección 3.3.1.1 de este capítulo. El diseño de sistemas de campanas debe tener en cuenta el acceso para la carga y otras operaciones del horno, y el modo en que cambia la fuente de los gases de proceso durante el ciclo de proceso. Esencialmente, las tecnologías de proceso discutidas en este capítulo, en combinación con sistemas de eliminación apropiados, permiten dar respuesta a las demandas de la protección medioambiental más estricta.

Tabla 3.27: Métodos de eliminación a considerar

Fuente	Componente en el gas de escape	Método de Tratamiento
Mala combustión materias orgánicas en la alimentación.	CO, COV, dioxinas	Control de proceso, postcombustión, inyección de carbón activado.
Azufre en el combustible o materia prima	Dióxido de azufre	Sistema de lavado húmedo o semiseco, inyección de cal.
Condiciones de combustión	NO_x	Control de proceso, uso correcto del oxígeno. Reducción catalítica.
Horno y manipulación de materias fundidas	Polvo Vapor de óxidos metálicos	Lavador y/o filtro de tejido.

EJEMPLO 3.05 TRATAMIENTO PROGRAMADO DE VAPORES SECUNDARIOS

Descripción: Tratamiento de los vapores secundarios y gases de ventilación mediante absorción de SO_2 y filtro de tejido.

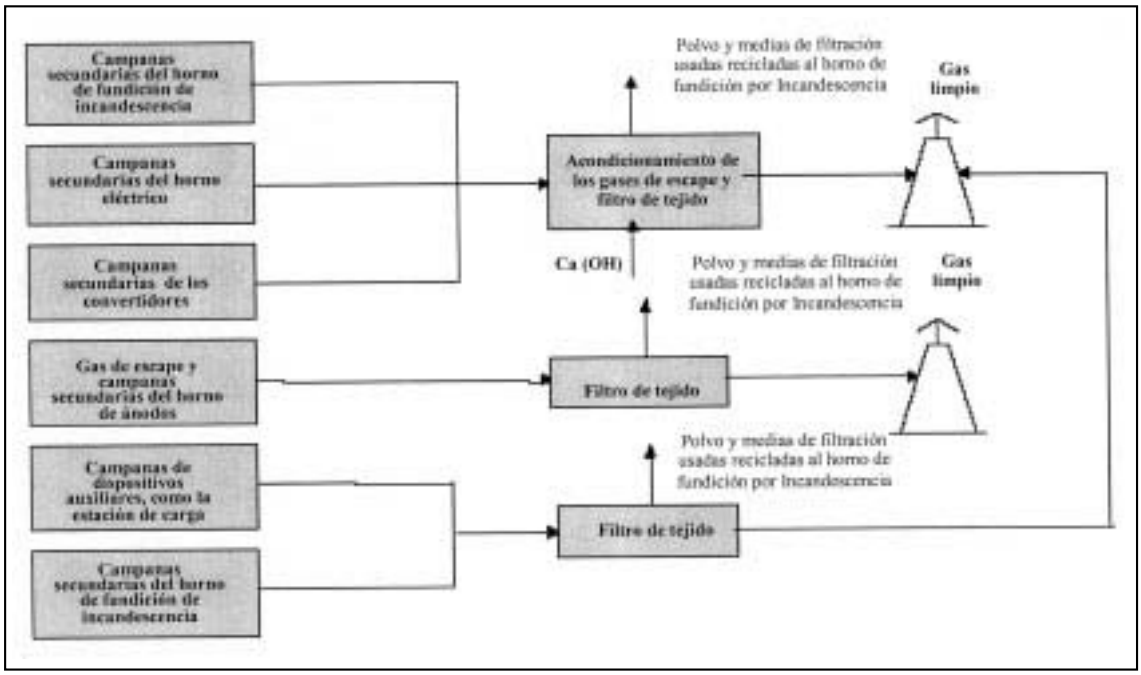


Figura 3.12: Esquema general del sistema.

Tabla 3.28: Datos operativos del sistema

Gases secundarios de la zona de ventilación:	Campanas secundarias del convertidor, campanas de hornos de limpieza de escorias, gases de escape de hornos eléctricos de limpieza de escorias, sistemas de ventilación de los hornos de incandescencia, hornos de ánodos, manipulación y preparación del material rechazado.
Condiciones de entrada:	
Volumen nominal máximo:	580.000 Nm^3/h
Variación de volumen:	~ 350.000 a 550.000 Nm^3/h
Absorbente para eliminación de SO_2:	Cal apagada
Contenido medio de polvo y absorbente:	1.500 mg/Nm^3
Rango de polvo:	1 – 5 g/Nm^3
Rango de entrada de SO_2:	100 – 1.500 mg/Nm^3
Condiciones de salida:	
Variación de volumen:	~ 350.000 a 550.000 Nm^3/h
Polvo residual medio:	< 2 mg/Nm^3
Rango de polvo residual:	1 - 7 mg/Nm^3
Rangos de componentes:	
Cd	< 0.01 – 0.1 mg/Nm^3
As	< 0.01 – 0.8 mg/Nm^3
Ni	< 0.01 – 0.3 mg/Nm^3
Se	< 0.01 –0.9 mg/Nm^3
Sb	< 0.01 – 0.5 mg/Nm^3
Cu	< 0.02 – 2 mg/Nm^3
Absorción de azufre	~50 a 70 %

La instalación utiliza un sistema de 3 campanas secundarias además de la campana principal. Estas campanas pueden ir conectadas a la planta de ácido sulfúrico (campana 1) o al sistema de limpieza secundario (campanas 3 y 3). Durante las operaciones de llenado y vertido, las campanas individuales se mueven mediante un sistema motorizado a las posiciones que aseguran una eficacia de recogida óptima. A continuación se muestra el esquema de las campanas del convertidor:

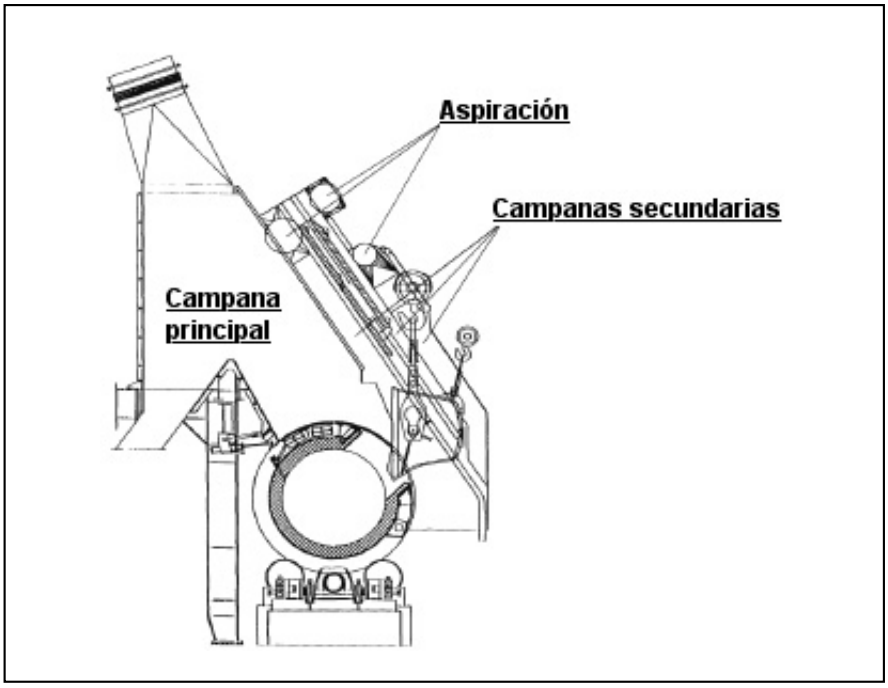


Figura 3.13: Sistema programado de captura de vapores secundarios [tm 201, Velten 1999].

Principales beneficios medioambientales: Recogida y tratamiento de las emisiones fugitivas. Minimización del uso de energía.

Datos operativos: Se consigue una captura del 99% de los vapores.

Tabla 3.29: Rendimiento de las mejoras de captura de vapores secundarios

	Emisión de polvo kg/a	
	Antes de la recogida adicional de gases secundarios (1992)	**Después de la recogida adicional de gases secundarios (1996)***
Producción de ánodos t/a	220.000	325.000
Emisiones fugitivas:		
Total Fundición	66.490	32.200
Línea de Techo Fundición	56.160	17.020
Emisiones controladas (Fundición primaria):		
Fundición/planta de ácido	7.990	7.600
Chimenea de campanas secundarias	2.547	2.116

Nota. * Las emisiones tras una inversión de 10 millones de Euros indican una mejora en la captura de gases fugitivos y en el sistema de tratamiento. Energía adicional = 13,6 GWh/a

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción en el uso de energía en comparación con la captura de aire de ventilación total, así como reducción de las emisiones principales.

Economía: 23 millones de DM para un sistema completo, incluyendo campanas, conducciones y controles. Consumo de energía 13,6 GWh/a. Ver asimismo apéndice sobre datos de costes.

Aplicabilidad: La mayoría de procesos de conversión. Aplicable a una serie de hornos, como El Teniente y Noranda.

Plantas de referencia: Alemania.

Bibliografía: [tm 161, Petersen 1999]; [tm 92, Cu Expert Group 1998].

EJEMPLO 3.06 RECOGIDA DE GASES DE VENTILACION EN LA LINEA DE TECHO

Descripción: Sistema de recogida de vapores laterales del convertidor para tratar los gases de ventilación. Todos los gases de ventilación se recogen en la línea de techo y son tratados para eliminar el polvo, los metales y el dióxido de azufre.

Principales beneficios medioambientales: Recogida de emisiones fugitivas de los flancos de la nave del horno de fundición/convertidor con una producción de 170.000 t/a ánodos; los gases se tratan en combinación con los gases del secador. Es posible una eliminación limitada de SO_2 con el sistema actual utilizando precipitadores electrostáticos (PEs).

Tabla 3.30: Tratamiento de gases tras su captura por la línea extracción de techo

Emisiones		Punto de emisión	
	Captura primaria 200.000 Nm^3/h	**Captura secundaria 1.000.000 Nm^3/h**	**Fugitivas**
Dióxido de azufre	523 t/a	2.242 t/a	147 t/a

Efectos sobre otros medios: Efecto global positivo: Muy intensivo desde el punto de vista energético pero con reducción de las emisiones totales.

Economía: No está disponible, pero 2 plantas operan de forma viable.

Aplicabilidad: La mayoría de procesos de conversión.

Plantas de referencia: Suecia, Finlandia.

Bibliografía: [tm 140, Finland Cu 1999]; [tm 106, Farrell 1998].

El uso de campanas para sangrado y moldeo es también una técnica a considerar. Los vapores de sangrado consisten en vapores de la inyección de oxígeno, polvo de perforación, vapores de los trozos de metal vaporizados si se utiliza una pistola de sangrado, y vapores de todas las superficies de metal y escoria expuestas. Estos vapores consisten principalmente en óxidos de los metales involucrados en el proceso de fundición.

Los gases del horno que se recogen están normalmente muy calientes y se utiliza enfriamiento o recuperación de energía para evitar daños en el equipo de eliminación. La

conversión a ácido sulfúrico o la producción de dióxido de azufre es la técnica para cobre primario. Los filtros de tejido y/o lavadores se emplean para cobre secundario, y para las etapas de secado y refinado al fuego, los métodos de lavado o de desulfurización de gas seco para eliminar las concentraciones bajas de dióxido de azufre son técnicas a considerar.

Los dos ejemplos siguientes ilustran el uso de sistemas de postcombustión, enfriamiento, neutralización y filtración.

EJEMPLO 3.07 POSTCOMBUSTION, ENFRIAMIENTO DE GASES Y FILTRO DE TEJIDO

Descripción: Cámara de postcombustión y tratamiento de gas que incluye tratamiento con coque/cal seguido de filtro de tejido. Sistema de postcombustión utilizado para un alto horno que produce 15.200 t/a de cobre negro. Volumen de gas 32.000 Nm^3/h.

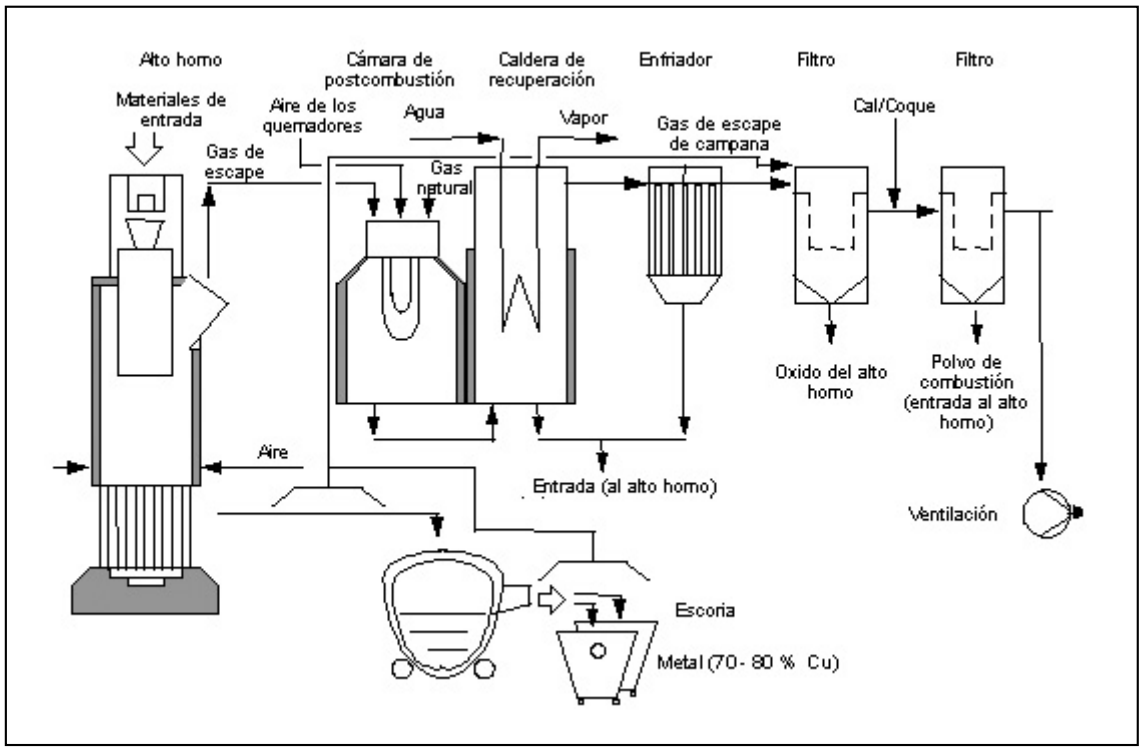


Figura 3.14: Esquema general de un sistema de postcombustión.

Principales beneficios medioambientales: Destrucción de dioxinas. Destrucción de CO y otros compuestos de carbono.

Datos operativos: Dioxinas < 0,1 ng/Nm^3 TEQ.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las emisiones principales. Recuperación de otros metales.

Economía: Coste instalado del sistema de postocombustión y del filtro de tejido: ~ 1,5 millones €. Ver también Apéndice sobre costes.

Aplicabilidad: La mayoría de altos hornos, aplicable a otros hornos con los mismos requisitos de enfriamiento de gases y eliminación de CO, SO_2 y polvo.

Plantas de referencia: Se utiliza en plantas en Austria y Alemania.

Bibliografía: [tm 124, DFIU Cu 1999], [tm 160, Winter Cu 1999], [tm 226, VDI 2102 1999].

EJEMPLO 3.08 ENFRIAMIENTO DE GAS Y FILTRO DE TEJIDO

Descripción: Sistema de enfriamiento de gas y filtro de tejido. Incorpora adición de cal si hay presencia de dióxido de azufre en los gases.

Principales beneficios medioambientales: Tratamiento de los gases de los hornos de conversión y de refinado al fuego para eliminar el polvo y otros metales.

Datos operativos: Polvo - 1 - 3 mg/Nm^3. Cu+Pb+Zn < 0.2 mg/Nm^3.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción eficaz de polvo y metales. Recuperación de Zn, Pb, etc.

Economía: No está disponible pero hay operaciones viables establecidas. Proceso similar en el Apéndice sobre costes.

Aplicabilidad: La mayoría de hornos de conversión y de ánodos. Aplicable a secadores.

Plantas de referencia: Se utiliza en una planta en Austria.

Bibliografía: [tm 160, Winter Cu 1999].

3.3.14 Control y gestión de procesos

Los principios de control y gestión de procesos, como el uso de sistemas ISO 9000 discutido en el Capítulo 2, son aplicables a los procesos de producción utilizados en este Grupo. Algunos de los hornos y procesos pueden mejorar mediante la adopción de muchas de estas técnicas. El control de temperatura de los hornos utilizados para la fusión de aleaciones de cobre es una técnica a considerar. La formación de los operarios, la existencia de instrucciones operativas y los sistemas de gestión para la puesta en practica de estos factores son vitales. También deben tenerse en consideración sistemas para mantenimiento preventivo cuando estén justificados o sean necesarios.

3.3.15 Aguas residuales

Se trata de un aspecto específico de cada centro de producción, los sistemas de tratamiento existentes se consideran de un alto nivel de calidad. Todas las aguas residuales deben tratarse para eliminar los metales disueltos y sólidos. Las técnicas indicadas en el Capítulo 2 son las técnicas a considerar. En una serie de instalaciones, el agua de refrigeración y las aguas residuales tratadas incluida el agua de lluvia se reutilizan o reciclan en los procesos. El agua superficial, si se recoge y mantiene separada, debe ser tratada mediante sedimentación y/o ajuste del pH antes de su evacuación.

EJEMPLO 3.09 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Descripción: Tratamiento de ácido diluido de la planta de ácido sulfúrico, y de diversas aguas ácidas con cal y sulfato de hierro.

Principales beneficios medioambientales: Mínima evacuación de aguas residuales, reducción en el consumo de agua.

Datos operativos:

Tabla 3.31: Datos operativos para el tratamiento de ácido diluido

Condiciones de Entrada:	
Caudal:	35 m^3/h
Contenido:	
H_2SO_4	60 g/l
Cu	2.100 mg/l
Hg	15 mg/l
As	2.200 mg/l
Pb	2.600 mg/l
Ni	7 mg/l
Cd	110 mg/l
Sólidos en suspensión	200 mg/l
Agua efluente*:	
Caudal	31.2 m^3/h
pH	9.5
Cu	0.2 – 0.5 mg/l
Hg	0.05 mg/l
As	0.1 mg/l
Pb	0.2 mg/l
Ni	0.5 mg/l
Cd	0.1 mg/l
Lodo de yeso: – Cantidad:	6 – 7 t/h
– Composición	40 – 50 % de humedad
	~ 30 – 35 % $CaSO_4$
	~ 1 % As (como compuesto de arsénico)
	~ 1 % Cu
	~ 1 – 2 % Fe
	~ 0.01 % Hg
	~ 1 % Pb
	~ < 0.1 % N1
	~ < 0.1 % Cd

* Los datos de diseño tienen en cuenta las variaciones en el efluente.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las principales emisiones al agua, posible reutilización de aguas residuales y lodos.

Economía: Coste del equipo 2,5 millones de €, coste instalado 4,5 a 5,2 millones €.

Electricidad 200kw. Lechada de cal (10%); 15 m^3/h. H_2SO_4 (10%); 0,8 m^3/h. $FeSO_4$. $7H_2O$; 80 kg/h

Aplicabilidad: La mayoría de sistemas de proceso de aguas.

Plantas de referencia: Proyecto en construcción en la UE.

Bibliografía: - [tm 210, Cu Expert Group 1999].

EJEMPLO 3.10 TRATAMIENTO Y REUTILIZACION DE AGUAS RESIDUALES

Descripción: Sistema de recogida y tratamiento de efluentes de aguas superficiales y de proceso. Incluye tratamiento con NaHS seguido de sedimentación y filtro de arena. El agua se reutiliza en el proceso y para el riego de los almacenes.

Principales beneficios medioambientales: Mínima evacuación de agua, reducción en el consumo de agua.

Datos operativos: Se consigue la máxima reutilización de agua. Evacuación 110000 m^3/a.

Tabla 3.32: Datos operativos para un sistema de tratamiento con NaHS

Componente	Agua de proceso de cobre secundario tras tratamiento con NaHS, sedimentación y filtración con arena
Cu mg/l	0,04
Pb mg/l	0,04
Ni mg/l	0,07
Zn mg/l	0,13
As mg/l	< 0,01
Cd mg/l	0,004
Sólidos en suspensión mg/l	1,0

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las principales evacuaciones al agua, reaprovechamiento del agua.

Economía: No disponible, pero se halla en funcionamiento y es económicamente viable.

Aplicabilidad: Reutilización del agua de lluvia para regar la zona de chatarra.

Plantas de referencia: Bélgica.

Bibliografía: - [tm 106, Farrell 1998].

EJEMPLO 3.11 TRATAMIENTO DE AGUA DE REFRIGERACION

Descripción: Tratamiento del agua de enfriamiento directo aplicada en un sistema de moldeo de ánodos.

Principales beneficios medioambientales: Mínima evacuación de agua residual, reducción en el consumo de agua.

Datos operativos:

Tabla 3.33: Datos operativos para un sistema de tratamiento de agua

Tipo de tratamiento	Sedimentación, ajuste del pH y precipitación	
Agua sin tratar: Cantidad:	~ 350.000 m^3/a	
Componentes principales:	Antes del tratamiento	En el efluente
pH		8.5-9.5
mg/l Cu,	< 30	0.01-0.25
mg/l Pb,	< 2.5	0.001-0.1
mg/l As	< 2.0	0.001-0.1
mg/l Ni	< 0.5	0.002-0.06
mg/l Cd,	< 0.01	0.0001-0.003
mg/l Zn	< 1.1	0.02-0.5

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo: Reducción de las evacuaciones principales al agua.

Economía: No disponible, pero el sistema funciona de forma viable.

Aplicabilidad: Reutilización del agua de lluvia para regar la zona de chatarra.

Plantas de referencia: Se utiliza en una planta en Alemania.

Bibliografía: - [tm 210, Cu Expert Group 1999].

3.3.16 Residuos de proceso

Las técnicas disponibles relativas a la recuperación de metales de los residuos y la minimización de residuos para desecho final son técnicas a considerar.

3.4 Mejores Técnicas Disponibles

Para la comprensión de esta sección y de su contenido, se llama la atención del lector al prefacio de este documento, y en particular a la sección quinta del prefacio: “Cómo entender y utilizar el presente documento”. Las técnicas y niveles asociados de emisiones y/o consumos, o rangos de niveles, presentados en esta sección han sido determinados mediante un proceso iterativo que comporta los siguientes pasos:

- Identificación de los aspectos medioambientales claves del sector.
- Examen de las técnicas más relevantes para tratar estos aspectos clave.
- Identificación de los mejores niveles de comportamiento medioambiental, sobre la base de los datos disponibles en la Unión Europea y en todo el mundo.
- Examen de las condiciones en las que se consiguen estos niveles de comportamiento, como costes, efectos sobre otros medios o razones principales de la puesta en práctica de estas técnicas.
- Selección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y de los niveles asociados de emisión y/o consumo para este sector en un sentido general, todo ello de acuerdo con el Artículo 2(11) y el Anexo IV de la Directiva.

La evaluación experta por parte de la Oficina Europea de IPPC y el Grupo Técnico de Trabajo (TWG) ha desempeñado un papel clave en cada uno de estos pasos y el modo en que aquí se presenta la información.

Sobre la base de estas técnicas de evaluación, y en la medida de lo posible, en este capítulo se presentan niveles de emisiones y consumos, asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles, que se consideran apropiados para el sector en su conjunto y en muchos casos reflejan el funcionamiento real de algunas instalaciones del sector. Cuando se presentan niveles de emisiones o consumos “asociados con las mejores técnicas disponibles”, debe entenderse que ello significa que tales niveles representan el comportamiento medioambiental que podría preverse como resultado de la aplicación, en este sector, de las técnicas descritas, teniendo en cuenta el equilibrio de costes y ventajas inherente a la definición de las MTD. No obstante, no son valores límite de consumo o emisión ni deben entenderse como tales. En algunos casos puede ser técnicamente posible conseguir mejores niveles de emisiones o consumos, pero debido a los costes involucrados o por la consideración de efectos sobre otros medios, no se consideran apropiados como mejor técnica disponible para el sector en su conjunto. No obstante, tales niveles pueden ser considerados justificados en casos más específicos en los que existan motivos especiales de puesta en práctica.

Los niveles de emisiones y consumos asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles deben ser contemplados en el contexto de las condiciones de referencia que se especifiquen (ej. periodos de promedio).

El concepto de "niveles asociados con las MTD" arriba descrito debe distinguirse del término "nivel obtenible" utilizado en otros lugares de este documento. Cuando un nivel se describe como "obtenible" usando una técnica particular o una combinación de técnicas, debe entenderse que significa que se puede esperar conseguir el nivel a lo largo de un periodo de tiempo sustancial en una instalación o proceso bien mantenido y gestionado mediante tales técnicas.

Cuando se hallan disponibles, se facilitan datos relativos a costes junto con las técnicas presentadas en el capítulo anterior. Estos dan una indicación aproximada de la magnitud de los costes involucrados. No obstante, el coste real de la aplicación de una técnica dependerá mucho de la situación específica relativa, por ejemplo, a los impuestos, tasas y características técnicas de la instalación en cuestión. No es posible evaluar con detalle estos factores específicos de cada centro de producción. En ausencia de datos relativos a costes, las conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas se extraen a partir de observaciones de las instalaciones existentes.

La intención es que las mejores técnicas disponibles generales de este capítulo sean un punto de referencia en relación al cual se juzgue el comportamiento presente de una instalación o se estudie una propuesta de una nueva instalación. De este modo servirán de ayuda en la determinación de las condiciones apropiadas "basadas en las mejores técnicas disponibles" para la instalación, o en el establecimiento de reglamentos de aplicación general conforme al Artículo 9(8). Esta previsto que las nuevas instalaciones puedan diseñarse para tener un comportamiento igual o incluso mejor que los niveles generales para las mejores técnicas disponibles aquí presentados. También se considera que las instalaciones existentes podrían moverse hacia los niveles generales para las mejores técnicas disponibles o incluso mejorarlos, con arreglo a la aplicabilidad técnica y económica de las técnicas en cada caso.

Aunque los BREFs no establecen normas de cumplimiento legal, tienen por finalidad facilitar información que sirva de referencia a la industria, los Estados miembros y el público acerca de los niveles obtenibles de emisiones y consumos al utilizar las técnicas especificadas. Los valores límite apropiados para cualquier caso específico deberán determinarse teniendo en cuenta los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales.

Las Mejores Técnicas Disponibles están influenciadas por una serie de factores de este subsector y se requiere una metodología de examen de las técnicas. El enfoque utilizado se detalla a continuación.

- En primer lugar, la elección del proceso depende en gran medida e las materias primas disponibles par un centro en particular. Los factores más significativos son la composición, la presencia de otros metales incluidos, la distribución de sus tamaños (incluido el potencial para formar polvo) y el grado de contaminación por compuestos orgánicos. Básicamente puede haber materias primas primarias disponibles de una o varias fuentes, materias primas secundarias de distinta calidad o una combinación de materias primas primarias y secundarias.

- En segundo lugar, el proceso debe ser adecuado para ser usado con los mejores sistemas de recogida y eliminación de gases disponibles. Los procesos de recogida y eliminación de vapores empleados dependerán de las características de los procesos principales, por ejemplo algunos procesos evitan las transferencias con cuchara y son por consiguiente más fáciles de cerrar. Otros procesos pueden tratar materiales reciclados con más facilidad y por consiguiente reducen el mayor impacto medioambiental evitando el desecho.

- Por último, se han tenido en consideración los aspectos del agua y los desechos, en particular la minimización de residuos para desecho y el potencial para utilizar los residuos y el agua en el mismo proceso o en otros procesos. La energía utilizada por los procesos y la eliminación es otro factor que se tiene en consideración en la elección de procesos.

La elección de la MTD en un sentido general es por lo tanto complicada y depende de los factores anteriores. Los requisitos variables significan que la MTD está influenciada principalmente por las materias primas disponibles en el centro de producción y la productividad requerida de la planta. Existen ventajas para algún proceso primario que sea capaz de aceptar algunos materiales secundarios.

Los siguientes puntos resumen la metodología recomendada utilizada en este trabajo:

- ¿Es el proceso probado y fiable industrialmente?
- ¿Existen limitaciones en el material inicial que puede procesarse? ej. : En la fundición primaria, algunos procesos son adecuados para concentrado "limpio", y otros para fundición de materiales complejos.
- El tipo de alimentación y otros metales contenidos en la misma (ej. Pb, Zn) influye en la selección del proceso.
- ¿Hay restricciones a nivel de producción? ej.: Un nivel superior demostrado o una productividad mínima requerida para que el proceso sea económico.
- ¿Pueden aplicarse al proceso las técnicas más recientes y eficaces de recogida y eliminación?
- ¿Pueden las combinaciones de procesos y sistemas de eliminación obtener los niveles de emisiones más bajos? Las emisiones asociadas se indican más adelante.
- ¿Existen otros aspectos como la seguridad relacionados con los procesos?

En el momento presente, diversas combinaciones de procesos y sistemas de eliminación podían utilizarse con el máximo estándar medioambiental y cumplir los requisitos de las MTD. Los procesos varían en la productividad que puede alcanzarse y los materiales que pueden emplearse, por lo que se incluyen varias combinaciones. Todos los procesos potencian al máximo la reutilización de residuos y minimizan las emisiones al agua. La economía de los procesos varía. Algunos necesitan operar a una productividad elevada para conseguir una operación económica, mientras otros no pueden alcanzar productividades altas.

Las técnicas de recogida y eliminación utilizadas con estos procesos se trataron en el Capítulo 2 y en las técnicas a considerar en la determinación de las MTD en este capítulo, y si se aplican en combinación con el proceso metalúrgico producen un alto nivel de protección medioambiental.

Como se ha indicado en el prefacio general de este documento, esta sección propone técnicas y emisiones que se consideran compatibles con las MTD en general. La finalidad es proporcionar indicaciones generales de los niveles de emisiones y consumos que pueden considerarse como un punto de referencia apropiado de un comportamiento basado en las MTD. Esto se hace indicando los niveles alcanzables en rangos aplicables por lo general a plantas nuevas tanto nuevas como modernizadas. Las instalaciones existentes pueden tener factores, como limitaciones de espacio o altura, que impidan la plena adopción de las técnicas.

El nivel varía asimismo con el tiempo según el estado del equipo, su mantenimiento y el control de proceso de la planta de eliminación. La operación del proceso de origen influye también en el rendimiento, ya que es probable que existan variaciones en la temperatura, el volumen de gas e incluso en las características del material a lo largo de un proceso o carga. Las emisiones alcanzables son por lo tanto sólo una base a partir de la cual puede juzgarse el comportamiento real de la planta. La dinámica del proceso y otros aspectos específicos del centro

deben tenerse en consideración a nivel local. Los ejemplos dados en la sección sobre técnicas a considerar en la determinación de las MTD indican las concentraciones asociadas con algunos procesos existentes [tm 137 Cu Expert Group 1998].

3.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales

Las conclusiones extraídas para las Mejores Técnicas Disponibles para las etapas de manipulación y almacenamiento de materiales se detallan en la sección 2.17 de este documento, y son aplicables a los materiales de este capítulo. Estas técnicas son:

- El uso de sistema de almacenamiento de líquidos los contenga en recintos impermeables y con capacidad para contener al menos el volumen del tanque de almacenamiento más grande del recinto. Existen diversos reglamentos dentro de cada unos de los Estados Miembros, que deben cumplirse según proceda. Las zonas de almacenamiento deben estar diseñadas de modo que las fugas de las partes superiores de los tanques y de los sistemas de suministro queden recogidas y contenidas dentro del recinto. El contenido del tanque debe indicarse y deben utilizarse las alarmas asociadas. El uso de suministro planificados y de sistemas de control automático para evitar un llenado excesivo de los tanques de almacenamiento.

- El ácido sulfúrico y otras sustancias reactivas deben también almacenarse en tanques de doble pared o tanques colocados en recintos químicamente resistentes de la misma capacidad. El uso de sistemas de detección de fugas y de alarmas es una medida razonable. Si existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la zona de almacenamiento debe ser impermeable y resistente al material almacenado.

- Los puntos de suministro deben estar contenidos dentro del recinto para recoger los derrames de materias. Debe practicarse la devolución por ventilación de los gases desplazados al vehículo de suministro para reducir las emisiones de COVs. También debe estudiarse el uso del cierre automático de la conexiones de suministro para evitar derrames.

- Las materias incompatibles (como las sustancias oxidantes y orgánicas) deben estar separadas y utilizarse gases inertes para los tanques o zonas de almacenamiento si es necesario.

- El uso de interceptadores de aceites y sólidos si es necesario para el desagüe de las áreas de almacenamiento abiertas. El almacenamiento de materiales que puedan emitir aceite en zonas recubiertas de cemento que tengan curvas u otros dispositivos de contención. El uso de métodos de tratamiento de efluentes para las especies químicas almacenadas.

- Cintas transportadoras y conductos de transferencia situados en lugares seguros y abiertos por encima del suelo, de modo que las fugas puedan detectarse de forma rápida y puedan evitarse los daños derivados de vehículos y otros equipos. Si se utilizan conducciones soterradas, su curso puede estar documentado y marcado, adoptándose sistemas de excavación seguros.

- El uso de depósitos bien diseñados y robustos para gases a presión (incluidos gases a baja presión) con control de la presión de los tanques y de los conductos de suministro para evitar rupturas y fugas. Deben utilizarse monitores de gas en zonas confinadas y cerca de los tanques de almacenamiento.

- Cuando sea necesario, pueden usarse sistemas herméticos de suministro, almacenamiento y distribución para materiales polvorientos, así como silos. Pueden usarse naves

completamente cerradas para el almacenamiento de materiales polvorientos con el fin de no tener que utilizar dispositivos de filtración especiales.

- Pueden usarse agentes sellantes (como melazas y PVA) cuando procesa y sea compatible con el fin de reducir la tendencia de los materiales a formar polvo.
- Cuando sea necesario, pueden usarse transportadores cerrados con equipos de extracción y filtración bien diseñados y robustos en los puntos de suministro, silos, sistemas de transferencia neumática y puntos de transferencia de transportadores, para evitar la emisión de polvo.
- El material no polvoriento e insoluble puede almacenarse en superficies herméticas con desagüe y recogida de desagües.
- Las virutas, virutas de torno y otros materiales aceitosos deben almacenarse a cubierto para evitar que el aceite sea arrastrado por el agua de lluvia.
- Deben usarse sistemas de transporte racionalizados para minimizar la formación y transporte de polvo dentro del centro de producción. Las aguas de lluvia que arrastren el polvo deben recogerse y tratarse antes de su evacuación.
- El uso de sistemas de lavado de las ruedas y de la carrocería o de otros sistemas de limpieza de los vehículos empleados para suministrar o manipular materiales polvorientos. Las condiciones locales, como la posible formación de hielo, pueden influir en el método empleado. Pueden usarse campañas planificadas para la limpieza de las carreteras.
- Pueden adoptarse sistemas de control de stocks y de inspección para prevenir derrames y detectar fugas.
- Pueden incorporarse sistemas de muestreo y análisis al sistemas de manipulación y almacenamiento de materiales con el fin de determinar la calidad de la materia prima y el método de proceso. Estos sistemas deben estar diseñados y operados al mismo alto estándar de calidad que los sistemas de manipulación y almacenamiento.
- Las áreas de almacenamiento para reductores, como carbón, coque o virutas de madera deben supervisarse para detectar posibles incendios causados por ignición espontánea.
- El uso de buenas prácticas de diseño y construcción, así como de un mantenimiento adecuado.

A continuación se reproduce la tabla de resumen de manipulación y almacenamiento de materiales.

Tabla 3.34: Resumen de técnicas de manipulación y almacenamiento para cobre

Materia prima	Almacenamiento	Manipulación	Pretratamiento	Comentarios
Carbón o coque.	Almacenes cubiertos, silos.	Transportadores cubiertos si no forma polvo. Neumática.		
Fuel oil y otros aceites.	Tanques o bidones en recintos aislados.	Conducciones seguras o sistema manual.		
Fundentes. Si forman polvo	Abierto sobre suelos de cemento o similares. Cerrado (silo) si es necesario.	Transportadores cerrados con recogida de polvo. Neumática. Cerrada con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla con concentrados u otros materiales.	
Concentrados.	Cerrado a menos que no forme polvo.	Cerrada con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla con transportadores. Secado.	
Productos de cobre: cátodos, alambrón, palanquillas y conglomerados.	Zona abierta de cemento o almacenaje cubierto.			
Polvo fino.	Cerrado.	Cerrada con recogida de polvo. Neumática.	Mezcla, Aglomeración.	
Polvo grueso (materia prima o escoria granulada)	Almacenes cubiertos.	Cargadora mecánica. Cargadora mecánica.	Eliminación de aceite si es necesario.	Recogida de aceite si es necesario.
Terrones (materia prima o escoria).	Abierto			Recogida de aceite si es necesario.
Elementos enteros	Almacenes abiertos o cubiertos.	Cargadora mecánica.		Recogida de aceite si es necesario.
Virutas.	Almacén cubierto.	Vagonetas de carga.	Secado o eliminación de aceite.	Recogida de aceite si es necesario.
Cable.	Abierto.	Cargadora mecánica.	Eliminación de fundas.	
Placas de circuito.	Almacenes cubiertos.	Cargadora mecánica.	Trituración + separación por densidades.	El contenido de plástico puede aportar calor.
Residuos de proceso para recuperación.	Abierto, cubierto o cerrado según la formación de polvo.	Depende de las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.
Residuos para desecho (ej. revestimientos de horno)	Almacenes abiertos, cubiertos o cerrados, o herméticos (bidones) según el material.	Depende de las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.

3.4.2 Selección de procesos

No es posible concluir que un solo proceso de producción pueda aplicarse a este grupo de metales. Las técnicas para las siguientes etapas de proceso se consideran como MTD para las materias primas disponibles.

3.4.2.1 Fundición primaria de cobre

Teniendo en consideración estos factores, las siguientes combinaciones, utilizadas con las técnicas apropiadas de recogida y eliminación, se consideran como MTD para la producción de cobre.

- Los procesos continuos de Mitsubishi y Outokumpu/Kennecott se consideran como MTD para la etapa de fundición y conversión en la producción primaria de cobre. Aunque en este momento el sistema Outokumpu/Kennecott procesa sólo materias primas primarias, el sistema Mitsubishi también trata materias primas secundarias y chatarra de cobre, pero puede tener una mayor emisión de dióxido de azufre del horno de ánodos. Estos procesos utilizan hornos cerrados, no dependen de la transferencia con cuchara de la mata fundida y otros materiales, y por consiguiente son inherentemente más limpios. La recogida y tratamiento de los vapores de las etapas de granulación y de las artesas sigue siendo una fuente potencial, así como la fusión separada de chatarra (anódica) cuando se requiere. Estos procesos tienen distintos costes de inversión, costes de explotación y capacidades, y la elección final depende de las condiciones locales, como la materia prima disponible y la productividad deseada.

- Puede obtenerse un comportamiento medioambiental similar, utilizando mezclas de concentrados de diversas fuentes, utilizando el Horno de Fundición Flash Outokumpu. Para productividades más bajas, el horno ISA Smelt ha sido utilizado en minas. Estos hornos se utilizan en combinación con el convertidor Pierce-Smith (o similar).

- La combinación de tostación parcial en un horno de tostación de lecho fluidizado, la fundición de mata en horno eléctrico y el convertidor Pierce-Smith ofrecen ventajas para el tratamiento de materiales de alimentación complejos que permiten la recuperación de otros metales contenidos en el concentrado como zinc y plomo.

- El uso del Horno de Fundición Flash Outokumpu para la fundición directa de cobre blíster utilizando concentrados específicos con un bajo contenido de hierro o concentrados de muy alta calidad (baja producción de escoria).

Para alcanzar un alto estándar medioambiental, la etapa de conversión de los procesos no continuos, es decir, el convertidor Pierce-Smith o similar, debe estar equipada con sistemas avanzados de recogida de gases primarios y secundarios. Los sistemas de campanas deben estar diseñados para permitir el acceso para las transferencias con cuchara al tiempo que mantienen una buena recogida de vapores. Esto puede conseguirse mediante el uso de un sistema de control inteligente para adaptarse a las emisiones de vapores automáticamente a medida que se producen durante el ciclo, sin la penalización del alto consumo de energía que supone un funcionamiento en continuo. Un ejemplo se muestra en las técnicas a considerar en la determinación de las MTD. El ciclo de soplado del convertidor y el sistema de recogida de vapores deben estar controlados automáticamente para evitar el soplado mientras el convertidor se abre. Las adiciones de materiales a través de la campana o toberas deben utilizarse si es posible. Esta combinación ofrece potencialmente una mayor flexibilidad, permite el uso de materias primas primarias y secundarias y utiliza el calor generado por el proceso de conversión para la fusión de chatarra.

Los convertidores Noranda y El Teniente y los hornos Contop listados como técnicas a considerar pueden también conseguir el mismo comportamiento medioambiental arriba detallado. Actualmente se utilizan con estándares medioambientales bajos pero, con buenos sistemas de recogida y eliminación de gases, estos procesos pueden ofrecer ventajas en eficacia energética, coste, productividad y facilidad de incorporación a instalaciones ya existentes. El horno flash INCO puede asimismo tener ventajas pero trabaja con oxígeno al 100%, lo que produce un margen operativo estrecho.

Tabla 3.35: Fundiciones primarias de cobre consideradas como MTD

Técnica Aplicada	Materias primas	Técnicas de Eliminación	Comentarios
Fundición flash Outokumpu/ Convertidor Pierce-Smith	Concentrado y chatarra de cobre	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Concepto de fundición estándar con un alto grado de madurez, flexibilidad y calidad medioambiental en combinación con técnicas de eliminación adecuadas. Capacidades probadas hasta 370.000 t/a de cobre.
Tostación parcial en Horno Eléctrico/ Convertidor Pierce-Smith	Concentrados normales y complejos, material secundario de baja calidad, chatarra de cobre.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Concepto de proceso probado, capacidad probada hasta 220.000 t/a de cobre. Para recuperación de zinc, el proceso se combina con volatilización de escoria.
Proceso en continuo Mitsubishi.	Concentrado y chatarra de cobre.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Hasta la fecha dos plantas en funcionamiento y dos más en construcción. Capacidades probadas hasta 240.000 t/a de cobre.
Fundición flash Outokumpu - Kennecott /Proceso de Conversión flash	Concentrado.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Esta combinación sólo está en uso en una planta con una sola fuente de material de alimentación, capacidad (convertidor flash) ~ 300.000 t/a cobre. Una segunda planta en construcción sobre una base similar.
Horno ISA Smelt / Convertidor Pierce-Smith	Concentrado y secundarias.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Dos plantas en funcionamiento. Capacidades probadas hasta 230.000 t/a de cobre.
Proceso Noranda y El Teniente / Convertidor Pierce-Smith	Concentrado de cobre, chatarra de cobre (Noranda)	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	El Teniente se utiliza ampliamente en Sudamérica, principalmente para concentrados de una sola fuente. Capacidades probadas hasta 190.000 t/a de cobre.
Contop / Convertidor Pierce-Smith	Concentrado de cobre.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Sólo una planta. Potencial de materiales de alimentación complejos. Capacidad alcanzada: 120.000 t/a de cobre.
Horno flash Inco/ Convertidor Pierce Smith	Concentrado de cobre.	Gas de proceso: Planta ácida. Técnicas de recogida y limpieza de vapores; Plantas de tratamiento de agua.	Hasta ahora se utiliza en plantas principalmente con concentrados de una sola fuente. Capacidades probadas hasta 200.000 t/a de cobre.

La información disponible para los procesos Baiyin y Vanyucov es limitada Por el momento no permite realizar una evaluación con respecto a su potencial como MTD [tm 137, Copper Expert Group 1998].

Los gases de los procesos de fundición y conversión primaria deben tratarse para eliminar el polvo y los metales volátiles, para recuperar calor o energía, y el dióxido de azufre debe convertirse en ácido sulfúrico en una planta de ácido sulfúrico de doble contacto diseñada de acuerdo con las técnicas a considerar en la determinación de las MTD. La producción de dióxido de azufre líquido en combinación con una planta de contacto para convertir el dióxido de azufre residual en ácido se considera MTD si existe un mercado local para el material.

3.4.2.2 Fundición secundaria de cobre

Para la producción de cobre a partir de materias primas secundarias, la variación en el material de alimentación y el control de calidad debe tenerse en consideración a nivel local, lo que influirá sobre la combinación de hornos, pretratamiento y sistemas asociados de recogida y eliminación a utilizar. Los procesos que se consideran como MTD son los Altos Hornos, el horno Mini-Smelter, TBRC, horno de Arco Eléctrico Sumergido cerrado, ISA Smelt, y convertidor Pierce-Smith.

El horno de arco eléctrico sumergido es una unidad cerrada y por consiguiente es inherentemente más limpio que los otros, siempre que el sistema de extracción de gases esté adecuadamente diseñado y dimensionado. En el momento actual, el horno eléctrico se utiliza asimismo para materias primas secundarias que contienen azufre, y durante estas operaciones se conecta a una planta de ácido sulfúrico. El volumen de gas producido se indica que es menor que en los otros hornos [tm 92, Cu Expert Group 1998], por lo que el tamaño de la planta de eliminación podría ser también menor.

Para chatarra de cobre de alta calidad sin contaminación orgánica, el horno de reverbero con solera, el horno de cuba con solera y el proceso Contimelt se consideran como MTD en conjunción con sistemas adecuados de recogida y eliminación.

3.4.2.3 Conversión primaria y secundaria

La etapa de conversión que puede utilizarse con estos hornos es una cualquiera de las técnicas detalladas como técnicas a considerar. Si se utilizan convertidores operados de forma discontinua como los convertidores Pierce-Smith (o similares), deben usarse con un cierre total o con sistemas eficaces de recogida de vapores primarios o secundarios.

Esto puede conseguirse mediante el uso de un sistema de control inteligente para adaptarse a las emisiones de vapores automáticamente a medida que se producen durante el ciclo, sin la penalización del alto consumo de energía que supone un funcionamiento en continuo. En la figura 3.1.3 se muestra un ejemplo. El ciclo de soplado del convertidor y el sistema de recogida de vapores deben estar controlados automáticamente para evitar el soplado mientras el convertidor se abre. Las adiciones de materiales a través de la campana o toberas deben utilizarse si es posible. Esta combinación ofrece potencialmente una mayor flexibilidad, permite el uso de materias primas primarias y secundarias y utiliza el calor generado por el proceso de conversión de mata para chatarra.

El horno ISA Smelt puede operar en discontinuo. La fundición se realiza en una primera etapa, seguida de la conversión de mata a cobre blíster o tras fundición secundaria en condiciones reductoras, para la oxidación del hierro, y la eliminación de zinc o estaño en una segunda etapa se considera asimismo como MTD.

Tabla 3.36: Fundiciones secundarias de cobre consideradas como BAT

Técnica Aplicada	Materias primas	Técnicas de Eliminación	Comentarios
Alto Horno	Material de óxidos.	Postcombustión, enfriamiento* y limpieza** de gases (filtro de tejido)	Alta eficacia energética. Capacidad normal 150 - 250 t/d.
Mini Smelter (Totalmente cerrado).	Secundarias incl. Fe, Pb y Sn	Enfriamiento y limpieza de gases (filtro de tejido)	Integrado con el proceso secundario TBRC.
TBRC (Totalmente cerrado).	Secundarias (la mayoría de calidades).	Enfriamiento y limpieza de gases (filtro de tejido)	Etapa de conversión: TBRC (Totalmente cerrado). Capacidad hasta 70 toneladas/carga.
Horno de Arco Eléctrico Sumergido Cerrado.	Secundarias incl. Sn y Pb (excepto calidades muy bajas).	Postcombustión, enfriamiento y limpieza** de gases Enfriamiento* y	Etapa de conversión: Pierce-Smith (con recogida de vapores primaria y secundaria). Capacidad hasta 25 t/h de velocidad de fusión.
ISA Smelt. (No probado para material de baja calidad en condiciones reductoras).	Secundarias (la mayoría de calidades).	limpieza de gases** Postcombustión,	Etapa de conversión: Pierce-Smith o Hoboken (con recogida de vapores primaria y secundaria). Capacidad para material sulfuroso ~40000 t/a.
Horno de reverbero con solera.	Secundarias (calidades altas). Cobre blíster, cobre negro.	enfriamiento y limpieza de gases (filtro de tejido) ** Postcombustión,	Utilizado para refinado al fuego y fundición de calidades altas de material secundario.
Horno de cuba con solera.	Secundarias (calidades altas). Cobre blíster, cobre negro.	enfriamiento y limpieza de gases (filtro de tejido) ** Postcombustión (horno	Utilizado para fusión y refinado al fuego.
Contimelt	Secundarias (calidades altas). Cobre blíster.	de reducción), WHB y limpieza (filtro de tejido) ** Enfriamiento y	Utilizado para fusión y refinado al fuego.
Convertidor Pierce-Smith (o similar).	Chatarra de aleación de cobre, cobre negro de alto horno.	limpieza** de gases (filtro de tejido).	Capacidad para volatilizar otros metales. Capacidad 15 - 35 toneladas/carga.

Nota. *) Si el nivel de temperatura es suficientemente alto, puede considerarse recuperación de calor; para limpieza en filtros de tejido se requiere un enfriamiento ulterior.

**) El gas de escape puede contener dióxido de azufre durante ciertas temporadas y puede tratarse en un lavador o planta de ácido en esos periodos.

3.4.2.4 Otros procesos y etapas de proceso

La aplicación de la metodología arriba descrita para las otras etapas de proceso ofrece la siguiente conclusión.

Los otros procesos considerados para MTD son:

- El secado de concentrado, etc. en secadores de tambor con combustión indirecta y secadores de incandescencia.

- El tratamiento de escoria mediante limpieza de escorias, volatilización de escorias, trituración/molturación y flotación de escorias.
- Refinado al fuego mediante hornos rotatorios o de reverbero basculantes. Moldeo de ánodos en moldes preformados o en una moldeadora continua.
- Refinado electrolítico de cobre mediante tecnología de cátodo permanente convencional o mecanizada.
- Los procesos hidrometalúrgicos descritos en 3.1.1.2 se consideran como MTD para minerales de óxido y para minerales de sulfuro de cobre de baja calidad libres de complejos y metales preciosos. Las técnicas están emergiendo con rapidez.
- Los procesos para la producción de alambrón, semis, etc. mediante los procesos Southwire, Contirod, Properzi y Secor, Upcast (moldeo por gravedad), conformación por inmersión, colada continua y procesos similares, forman la base de las MTD para la producción de dichos materiales, siempre que se consiga un alto estándar de eliminación.
- Los procesos para la producción de lingotes, estaño, etc. que se describen como técnicas a considerar, forman la base de MTD para la producción de dichos materiales, siempre que se consiga un alto estándar de eliminación.

La técnica particular utilizada depende de las materias primas y otras instalaciones disponibles en la instalación o en sus proximidades.

3.4.3 Recogida y eliminación de gases

Las Mejores Técnicas Disponibles para sistemas de tratamiento de gases y vapores son las que utilizan enfriamiento y recuperación de calor si es práctico antes de la limpieza. Son aplicables filtros de tejido con materiales modernos de alto rendimiento en una estructura bien construida y mantenida. Incluyen sistemas de detección de ruptura de bolsa y métodos de limpieza en línea. El tratamiento de gases para la etapa de refinado al fuego puede incluir una etapa de eliminación de dióxido de azufre y/o postcombustión si se considera necesario para evitar problemas de calidad del aire a nivel local, regional o remoto.

Los sistemas de recogida de vapores siguen la mejor práctica descrita en las técnicas detalladas anteriormente en este capítulo y en la sección 2.7. La producción de vapores de las materias primas secundarias puede minimizarse mediante la elección del horno y de los sistemas de eliminación. Algunas materias primas están contaminadas con materia orgánica y pueden pretratarse entes de la fundición para minimizar la producción de vapores.

Los sistemas de recogida de vapores utilizados pueden explotar los sistemas de horno cerrado y pueden diseñarse para mantener una depresión en el horno que evite las fugas y emisiones fugitivas. Deben emplearse sistemas que mantengan la hermeticidad del horno o instalar campanas. Ejemplos de ellos son las adiciones de material a través de la campana, vía toberas o lanzas, y el uso de válvulas rotatorias robustas en los sistemas de alimentación.

Tabla 3.37: Resumen de los métodos de eliminación de los componentes en los gases de escape

Etapa de Proceso	Componentes en el gas de escape	Opciones de eliminación
Manipulación de materias primas	Polvo y metales.	Correcto sistema de almacenamiento, manipulación y transferencia. Recogida de polvo y filtro de tejido.
Pretratamiento térmico de materias primas	Polvo y metales. Compuestos orgánicos* y monóxido de carbono.	Pretratamiento correcto. Recogida de gas y filtro de tejido. Operación del proceso, postcombustión y correcto enfriamiento de gases.
Fundición primaria	Polvo y metales. Dióxido de azufre. Hg.	Operación de proceso y recogida de gases, limpieza de gases seguido de enfriamiento/limpieza final de gases y planta de ácido sulfúrico o recuperación de dióxido de azufre (normalmente seguida de planta de ácido sulfúrico). Si hay mucho en el material inicial: Eliminación tras la limpieza de SO_2.
Fundición secundaria	Polvo y metales. Compuestos orgánicos* y monóxido de carbono. Dióxido de azufre.**	Operación de proceso y recogida de gases, enfriamiento y limpieza con filtro de tejido. Operación de proceso, postcombustión si es necesario y enfriamiento correcto de los gases. Lavado si es necesario.
Conversión primaria	Polvo y metales. Dióxido de azufre.	Operación de proceso y recogida de gases, limpieza de gases seguido de planta de ácido sulfúrico.
Conversión secundaria	Polvo y vapor o compuestos metálicos. Compuestos orgánicos. * Monóxido de carbono.*** Dióxido de azufre.**	Operación de proceso y recogida de gases, enfriamiento y limpieza con filtro de tejido. Operación de proceso, postcombustión si es necesario y enfriamiento correcto de los gases. Lavado si es necesario.
Refinado al fuego	Polvo y metales. Compuestos orgánicos.* Monóxido de carbono.*** Dióxido de azufre.**	Operación de proceso y recogida de gases, enfriamiento y limpieza con filtro de tejido o lavador. Operación de proceso, postcombustión (si es necesario durante el poling) y enfriamiento correcto de los gases. Lavado si es necesario.
Fusión y moldeo	Polvo y metales. Compuestos orgánicos. * Monóxido de carbono.	Operación de proceso y recogida de gases, enfriamiento y limpieza con filtro de tejido. Operación de proceso, postcombustión si es necesario y enfriamiento correcto de los gases.
Moldeo de ánodos y granulación de escorias	Vapor de agua.	Lavador húmedo o eliminador de nieblas si es necesario.
Procesos pirometalúrgico y de tratamiento de escoria	Polvo y metales. Monóxido de carbono. Dióxido de azufre.	Operación de proceso y recogida de gases, enfriamiento y limpieza con filtro de tejido. Postcombustión si es necesario. Tratamiento para eliminación.

Nota. * Las materias orgánicas incluyen COVs indicados como carbono total (excluido CO) y dioxinas, el contenido exacto depende de las materias primas utilizadas. ** Puede haber dióxido de azufre si se utilizan materias primas o combustibles que contienen azufre. El monóxido de carbono puede estar producido por una mala combustión, por la presencia de compuestos orgánicos, o deliberadamente para minimizar el contenido de oxígeno. *** Para procesos en discontinuo, CO sólo al inicio de la inyección **** CO sólo cuando no hay postcombustión.

La recogida de vapores secundarios es cara y consume mucha energía, pero es necesaria en el caso de alguno convertidores en discontinuo y para la ventilación de las tomas de sangrado, artesas, etc. El uso de sistemas inteligentes capaces de adaptar la extracción de vapores al origen y la duración de los vapores permite una mayor eficacia energética.

La tabla 3.37 resume las opciones consideradas como MTD para procesos de eliminación para los componentes que pueden estar presentes en los gases de escape. Puede haber algunas variaciones que influyan sobre la gama de componentes o el estado físico de algunos componentes, como el tamaño y propiedades físicas del polvo producido; estas variaciones deben evaluarse localmente.

3.4.3.1 Emisiones a la atmósfera asociadas con el uso de las MTD

Las emisiones a la atmósfera incluyen las emisiones capturadas/eliminadas de las diversas fuentes, más las emisiones fugitivas o no capturadas de dichas fuentes. Los modernos sistemas de eliminación con una buena operación producen la eliminación de contaminantes, y la información disponible en el momento presente indica que las emisiones fugitivas pueden ser la máxima contribución a las emisiones totales a la atmósfera.

a) Para cobre primario, las emisiones totales a la atmósfera se basan en las emisiones de:
   – La recepción, almacenamiento, mezcla y muestreo de materiales.
   – Los hornos de fundición, conversión y refinado al fuego y el moldeo de ánodos con la transferencia asociada de metal y sistema de manipulación y limpieza de gases calientes.
   – El horno de limpieza de escoria, la granulación de escorias y el sistema de manipulación de escorias.
   – La sección de enfriamiento y limpieza húmeda de gases y la planta de ácido sulfúrico.
   – La refinería electrolítica de cobre.

b) Para cobre secundario, las emisiones totales a la atmósfera se basan en las emisiones de:
   – La recepción, almacenamiento, mezcla y muestreo de materiales.
   – Los hornos de fundición, conversión y refinado al fuego y el moldeo de ánodos con la transferencia asociada de metal y sistema de manipulación y limpieza de gases calientes.
   – El sistema de manipulación de escorias.
   – La refinería electrolítica de cobre.

c) Para alambrón de cobre, las emisiones totales a la atmósfera se basan en las emisiones de:
   – Los hornos de fusión, refinado (si se aplica) y retención con el sistema asociado de manipulación y limpieza de gases calientes.
   – La maquinaria de moldeo, el tren de laminación de alambrón y el equipo auxiliar.

d) Para la fabricación de semis y producción de lingotes de cobre, las emisiones totales a la atmósfera se basan en las emisiones de:
   – La recepción y almacenamiento de materiales.
   – Los hornos de fusión, refinado y retención/moldeo con el sistema asociado de manipulación y limpieza de gases calientes y transferencia con cuchara.
   – La maquinaria de moldeo, las unidades de fabricación y el equipo auxiliar.

Las emisiones fugitivas pueden ser muy significativas y deben evaluarse localmente. Pueden predecirse por la eficacia de captura de los gases de los hornos, y pueden estimarse mediante controles (ver sección 2.7).

Las siguientes tablas resumen las emisiones capturadas asociadas con el uso de las mejores técnicas disponibles para las emisiones recogidas.

Tabla 3.38: Emisiones a la atmósfera de la fundición y conversión primaria asociada con el uso de las MTD en el sector del cobre

Contaminante	Rango asociado con el uso de las MTD	Técnicas que pueden usarse para alcanzar estos niveles	Comentarios
Corrientes de gas ricas en SO_2 (> 5%)	Factor de conversión > 99,7%	Planta de ácido sulfúrico de doble contracto (El contenido de SO_2 del gas de salida depende de la concentración del gas de entrada). Un eliminador de neblinas puede ser apropiado para la eliminación final de SO_3.	Se alcanzarán niveles muy bajos de los otros contaminantes del aire debido al tratamiento intensivo de los gases antes de la planta de contacto (lavado húmedo, PE húmedo y, si es necesario, eliminación de mercurio) para asegurar la calidad del H_2SO_4 producido.

Nota. Emisiones recogidas solamente.
Las emisiones asociadas se indican como medias diarias basadas en un a monitorización continua durante el periodo operativo. En casos en los que la monitorización continua no es practicable, el valor será el promedio a lo largo del periodo de muestreo. En cuanto al sistema de eliminación empleado, las características del gas y el polvo se tendrán en cuenta en el diseño del sistema, y se utilizará la temperatura correcta. Se ha conseguido un factor de conversión > 99,9% en una planta con una alimentación elevada y constante de dióxido de azufre, sistema sofisticado de limpieza de gases y enfriamiento entre pasadas.

Pueden producirse gases de menor concentración en los procesos metalúrgicos complejos utilizados para producir cobre, plomo y metales preciosos. Los datos se facilitan en los capítulos relativos al plomo y los metales preciosos.

Tabla 3.39: Emisiones a la atmósfera de los procesos hidrometalúrgicos y de recuperación electrolítica asociados con el uso de las MTD en el sector del cobre

Contaminante	Rango asociado con el uso de las MTD	Técnicas que pueden usarse para alcanzar estos niveles	Comentarios
Neblinas ácidas	< 50 mg/Nm^3	Eliminador de neblinas, lavador húmedo.	Un eliminador de neblinas o lavador húmedo permite la reutilización del ácido recogido.
COVs o disolventes como	< 5 - 15 mg/Nm^3	Contención, condensador, filtro de carbono o biofiltro.	

Nota. Emisiones recogidas solamente.
Las emisiones asociadas se indican como medias diarias basadas en una medición continua durante el periodo operativo. En casos en los que la medición continua no sea practicable, el valor será la media a lo largo del periodo de muestreo. En cuanto al sistema de eliminación empleado, las características del gas y el polvo se tendrán en cuenta en el diseño del sistema, y se utilizará la temperatura correcta.

En los procesos de refinado electrolítico no se producen neblinas ácidas.

Tabla 3.40: Emisiones a la atmósfera de la fundición y conversión secundaria, refinado al fuego primario y secundario, limpieza y fusión de escorias en horno eléctrico, asociadas con el uso de las MTD en el sector del cobre

Contaminante	Rango asociado con el uso de las MTD	Técnicas que pueden usarse para alcanzar estos niveles	Comentarios
Polvo	1 - 5 mg/Nm^3	Filtro de tejido.	Las características del polvo varían con las materias primas y tienen efecto sobre el valor alcanzado. Los filtros de tejido de alto rendimiento pueden alcanzar niveles bajos de metales pesados. La concentración de metales pesados está ligada a la concentración de polvo y la proporción de metales en el polvo.
SO_2	< 50 - 200 mg/Nm^3	Lavador alcalino semiseco y filtro de tejido. Lavador alcalino o alcalino doble con cal, hidróxido magnésico e hidróxido sódico. Combinaciones de sodio o alúmina/sulfato de aluminio en combinación con cal para regenerar el reactivo y formar yeso.	Los posibles efectos sobre otros medios del uso de energía, aguas residuales y residuos sólidos, junto con la capacidad para reutilizar los productos de lavado, influirán en la técnica utilizada.
NO_x	< 100 mg/Nm^3 < 100-300 mg/Nm^3	Quemador bajo en NO_x. Quemador oxiacetilénico.	Los valores más elevados están asociados con el enriquecimiento con oxígeno para reducir el uso energético. En estos casos, el volumen de gas y la masa de las emisiones se reduce.
Total carbono orgánico como C	< 5 - 15 mg/Nm^3 < 5 - 50 mg/Nm^3	Postcombustión. Combustión optimizada.	Pretratamiento del material secundario para eliminar los recubrimientos orgánicos si es necesario.
Dioxinas	< 0,1 - 0,5 ng TEQ/Nm^3	Sistema de eliminación de polvo de alta eficacia (ej. filtro de tejido), postcombustión seguida de enfriamiento rápido con agua.	Hay otras técnicas disponibles (ej. adsorción sobre carbón activado: filtro de carbón o mediante inyección con cal/carbón). Se requiere el tratamiento de un gas limpio y exento de polvo para conseguir niveles bajos.

Nota. Emisiones recogidas solamente.
Las emisiones asociadas se indican como medias diarias basadas en una medición continua durante el periodo operativo. En casos en los que la medición continua no sea practicable, el valor será la media a lo largo del periodo de muestreo. En cuanto al sistema de eliminación empleado, las características del gas y el polvo se tendrán en cuenta en el diseño del sistema, y se utilizará la temperatura correcta. Para la eliminación de SO_2 o de carbono total, la variación en la concentración del gas sin tratar durante los procesos en discontinuo puede afectar el rendimiento del sistema de eliminación. Por ejemplo, las "inyecciones de aire" del convertidor producirá, concentraciones máximas de gas sin tratar, y en consecuencia el número de ciclos al día influirá sobre el rango asociado (indicado como media diaria), un efecto similar puede observarse con otras etapas de proceso en discontinuo. Las concentraciones máximas en el gas tratado pueden ser de hasta 3 veces el rango indicado. Para NOx, el uso de procesos de alta eficacia (ej. Contimelt) requiere el establecimiento de un equilibrio a nivel local entre el uso de energía y el valor alcanzado.

Tabla 3.41: Emisiones al aire de sistemas de recogida de vapores secundarios y procesos de secado asociados con el uso de las MTD en el sector del cobre

Contaminante	Rango asociado con el uso de las MTD	Técnicas que pueden usarse para alcanzar estos niveles	Comentarios
Polvo	1 - 5 mg/Nm^3	Filtro de tejido con inyección de cal (para recogida de SO_2/protección de los filtros).	La recirculación de polvo puede utilizarse para protección del tejido/captura de partículas finas. La concentración de metales pesados está ligada a la concentración de polvo y la proporción de metales en el polvo.
SO_2	< 500 mg/Nm^3 < 50 - 200 mg/Nm^3	Filtro de tejido con inyección de cal seca en un gas frío. Lavador alcalino húmedo para recogida de gases calientes (de los gases del secador tras la eliminación del polvo).	Hay efectos sobre otros medios potencialmente significativos si se usan sistemas de lavado húmedos o semisecos con un gas frío.
Dioxinas	< 0,1 - 0,5 ng TEQ/Nm^3	Filtro de tejido con inyección de cal para protección de los filtros.	Se requiere el tratamiento de un gas limpio y exento de polvo para conseguir niveles bajos.

Nota. Emisiones recogidas solamente.
Las emisiones asociadas se indican como medias diarias basadas en una medición continua durante el periodo operativo. En casos en los que la medición continua no sea practicable, el valor será la media a lo largo del periodo de muestreo. En cuanto al sistema de eliminación empleado, las características del gas y el polvo se tendrán en cuenta en el diseño del sistema, y se utilizará la temperatura correcta.

El contenido de metales del polvo varía entre procesos. Además, para hornos similares hay variaciones significativas en el contenido de metales debido al uso de diversos tipos de materias primas y al uso de los hornos para separar elementos menores para su ulterior recogida y enriquecimiento para proceso ulterior. Por consiguiente no es muy preciso detallar las concentraciones especificas alcanzables para todos lo metales emitidos a la atmósfera en este documento.

Se trata de un aspecto específico de cada centro de producción, pero la tabla siguiente da una cierta indicación de los efectos sobre los contenidos de metales en el polvo que se observarán localmente.

Tabla 3.42: Contenido de metales de algunos polvos de diversos procesos de producción de cobre

Componente	Polvo de PE de horno de fundición de concentrado a mata	Polvo de alto horno	Polvo de convertidor de chatarra	Polvo de PE de convetidor de mata	Polvo de horno eléctrico de limpieza de escorias	Polvo de horno de ánodos
Pb%	0,1 – 5	5 – 40	5 – 30	2 – 25	2 – 15	2 – 20
Zn%	0,1 – 10	20 – 60	25 – 70	5 – 70	25 – 60	5 – 40
Sn%	0,1 – 1	0,2 – 5	1 – 20	0,1 – 4		
Cu%	5 – 30	2 – 12	2 – 15	10 – 25	0,5 – 2,5	15 – 25
As%	0,1 – 4					0,5 – 10
Ni%	0,1 – 1	0,1 – 1		0,1 – 1		

Algunos metales tienen compuestos tóxicos que pueden emitirse de los procesos, y que deben reducirse para cumplir las normativas específicas de calidad del aire local, regional o remoto. Se considera las concentraciones bajas de metales pesados están asociadas con el uso de modernos sistemas de eliminación de alto rendimiento como filtro de tejido con membrana, siempre que la temperatura operativa sea correcta y las características del gas y del polvo se tengan en consideración en el diseño.

3.4.4 Aguas residuales

Se trata de un aspecto específico de cada centro de producción, los tratamientos existentes se consideran de un estándar elevado. Todas las aguas residuales se tratan para eliminar los sólidos y los aceites/alquitranes, los gases ácidos absorbidos (ej. dióxido de azufre, HCl) deben ser reutilizados si es posible o neutralizarse en caso necesario. Las fuentes de las emisiones al agua son:

a) Para cobre primario y secundario, las emisiones totales al agua se basan en:
   - El sistema de tratamiento o granulación de escoria.
   - La refinería electrolítica de cobre con el circuito de purificación de electrolito y sección de lixiviación del limo anódico.
   - Sistema de tratamiento de aguas residuales y agua superficial.
   - El ácido sulfúrico diluido del enfriamiento y la limpieza del SO_2 gas en combinación con el tratamiento de aguas residuales.

b) Para producción de alambrón, semis y lingotes de cobre, las emisiones totales al agua se basan en:
   - El sistema de tratamiento de aguas residuales.

En la sección anterior de técnicas a considerar en la determinación de las MTD, se dan ejemplos del tratamiento de aguas residuales aplicado en diversos procesos, y que para las aguas de proceso comprende el tratamiento con precipitantes de hidróxido o sulfuro según los metales contenidos, seguido de sedimentación y, si es necesario, filtración. Los ejemplos muestran las concentraciones asociadas con estos procesos. A continuación se muestra el comportamiento asociado con el tratamiento correcto del agua residual.

Tabla 3.43: Rango de concentraciones de metales asociadas de una serie de corrientes de aguas residuales de la producción de cobre

	Principales componentes [mg/l]					
	Cu	**Pb**	**As**	**Ni**	**Cd**	**Zn**
Agua de refrigeración de proceso o enfriamiento directo	<0,1	<0,05	<0,01	<0,1	<0,05	<0,15

Nota: Las emisiones al agua asociadas se basan en una muestra aleatoria cualificada o en una muestra compuesta sobre 24 horas. El grado de tratamiento del agua residual depende de su origen y de los metales contenidos en la misma.

3.4.5 Residuos de proceso

El uso o reciclaje de escorias, limos y polvos de filtro se considera como parte de los procesos. Los procesos de producción en este sector han sido desarrollados por la industria para potenciar al máximo la reutilización de la mayoría de los residuos de proceso de las unidades de producción, o para enriquecer los elementos menores en una forma que permita su uso en otros procesos de producción de metales no férreos.

Tabla 3.44: Posibles usos de los productos intermedios, subproductos y residuos de la producción de cobre

Fuente de Proceso	Productos Intermedios, Subproductos, Residuos	Uso Final
Sistemas de eliminación	Polvos de filtro. Compuestos de mercurio. Catalizadores y ácido consumidos. Lodos de ácido sulfúrico. Acido diluido.	Materia prima para Cu (devuelto a fundición), Pb, Zn y otros metales. Materia prima para Hg. Industria Química. Lodo de neutralización para desecho. Descomposición para recuperación de SO_2, recuperación neutralización (lodo para desecho), otros usos, ej. como medio de lixiviación.
Fundición	Escoria Revestimientos de horno	Al horno de escoria u otro proceso de separación - reciclaje interno. Recuperados o desechados.
Convertidor	Escoria	A fundición – reciclaje interno.
Horno de escoria	Escoria	Abrasivo, material de construcción.
Horno de refinado (ánodos)	Escoria	A fundición – reciclaje interno.
Sección de Tanques	Sangrado de electrolito	Sales de Ni, recuperación de Cu, recuperación de ácido u otro uso.
Fusión/fundición	Escoria y escoria superficial	Materia prima para recuperación de metales.
General	Aceites	Recuperación de aceite.
Hidrometalurgia	Electrolito consumido	Lixiviación.
Producción de semis	Soluciones de decapado ácido y enjuagues.	Desecho como residuo si el contenido de metales no férreos es bajo, o venta para recuperación de metales.
Producción de alambrón	Soluciones de decapado ácido (si se aplican).	Recuperación en célula electrolítica separada.

La cantidad de residuos y subproductos obtenidos depende en gran medida de las materias primas, en particular del contenido de hierro de los materiales primarios, el contenido de otros metales no férreos en los materiales primarios y secundarios y la presencia de otros componentes como sílice, etc. Las emisiones al suelo son por consiguiente muy específicas del centro de producción y de los materiales, y dependen de los factores discutidos anteriormente. Por consiguiente, no es posible producir una tabla típica realista de las cantidades asociadas con el uso de las MTD sin detallar la especificación de las materias primas, que sólo puede considerarse a nivel local. Los principios de MTD incluyen la prevención y minimización de desechos, así como la reutilización de residuos cuando resulte práctico. La tabla 3.44 indicada ofrece un resumen de los posibles usos de los residuos de los procesos empleados para la producción de cobre. Se trata de una lista no exhaustiva y además algunas opciones pueden no estar disponibles debido a la ausencia de instalaciones adecuadas.

3.4.6 Costes asociados con las técnicas

Se han recopilado datos de costes para gran diversidad de variaciones de procesos y sistemas de eliminación. Los datos de costes son muy específicos de los centros y dependen de numerosos factores, pero los márgenes indicados permiten realizar algunas comparaciones. Los datos se facilitan en un apéndice de este documento, con el fin de poder comparar los costes de los procesos y sistemas de eliminación en el conjunto de la industria de metalurgia no férrea.

3.5 Tecnologías Emergentes

- Se ha informado [tm 137 Cu Expert Group 1999] de que se están produciendo novedades en el desarrollo y la mejora de las técnicas de fundición en baño. La fundición en baño puede ofrecer instalaciones de bajo coste gracias a su potencial de altos índices de reacción en plantas modernas, en combinación con hornos cerrados o semicerrados. La fiabilidad de las plantas debe verificarse a largo plazo, y será necesario evaluar los datos de algunas instalaciones de China y Rusia que utilizan hornos Baiyin o Vanyucov cuando se hallen disponibles.

Tabla 3.45: Tecnología emergente de fundición en baño

Técnica	Comentarios
Fundición/conversión continua: Combinación de reactor Noranda y horno de conversión Mitsubishi	Deben esperarse los resultados de su puesta en funcionamiento en 1999 para su evaluación.
Convertidor en continuo Noranda	Deben esperarse los resultados de la puesta en funcionamiento para su evaluación.

- El horno ISA Smelt para reducción/oxidación no está probado industrialmente pero es una técnica emergente.

- El uso de procesos hidrometalúrgicos es también emergente, y son adecuados para minerales mixtos de óxidos y sulfuros que contengan concentraciones bajas de metales preciosos. Para facilitar la lixiviación, pueden usarse bacterias oxidantes de hierro y sulfuros. Se están desarrollando algunos procesos para tratamiento de concentrados y polvo basados en la lixiviación, como por ejemplo, procesos de lixiviación, extracción con disolventes o electro-recuperación (L:SX:EW) [tm 137, Cu Expert Group 1999; tm 56, Kojo 1998].

Algunos desarrollos en otros sectores industriales pueden verse también como técnicas emergentes para los procesos de producción de cobre. Algunos ejemplos concretos son:

- El uso de tejidos modernos para los filtros de bolsa significa que la mayor eficacia y robustez de los tejidos (y de los diseños de las estructuras de los filtros) pueden permitir una prolongación considerable de la vida de las bolsas, mejorando el rendimiento y reduciendo costes al mismo tiempo.

- La captura de emisiones fugitivas puede conseguirse en diversas formas. El uso de controles de registro inteligentes puede mejorar la captura de vapores y reducir los tamaños de los ventiladores y por consiguiente los costes. Las vagonetas o vagones de carga cerrados se utilizan con un horno de fundición secundaria de aluminio y reducen considerablemente las emisiones a la atmósfera, gracias a la contención de las mismas durante la carga.

4 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS PRIMARIAS O SECUNDARIAS

4.1 Técnicas y Procesos Aplicados

4.1.1 Aluminio primario

4.1.1.1 Producción de alúmina

La alúmina se produce a partir de bauxita en el proceso Bayer, bien establecido en la industria. Este proceso se realiza normalmente cerca de la mina, pero existen centros en Europa en los que la bauxita se convierte en alúmina en el mismo centro en que hay una fundición de aluminio o en refinerías independientes de alúmina.

El proceso global es estándar para todos los centros y utiliza sosa cáustica para extraer la alúmina de la bauxita a temperaturas y presiones elevadas en digestores. Se produce una lechada, que contiene aluminato sódico disuelto y una mezcla de óxidos metálicos denominada lodo rojo,

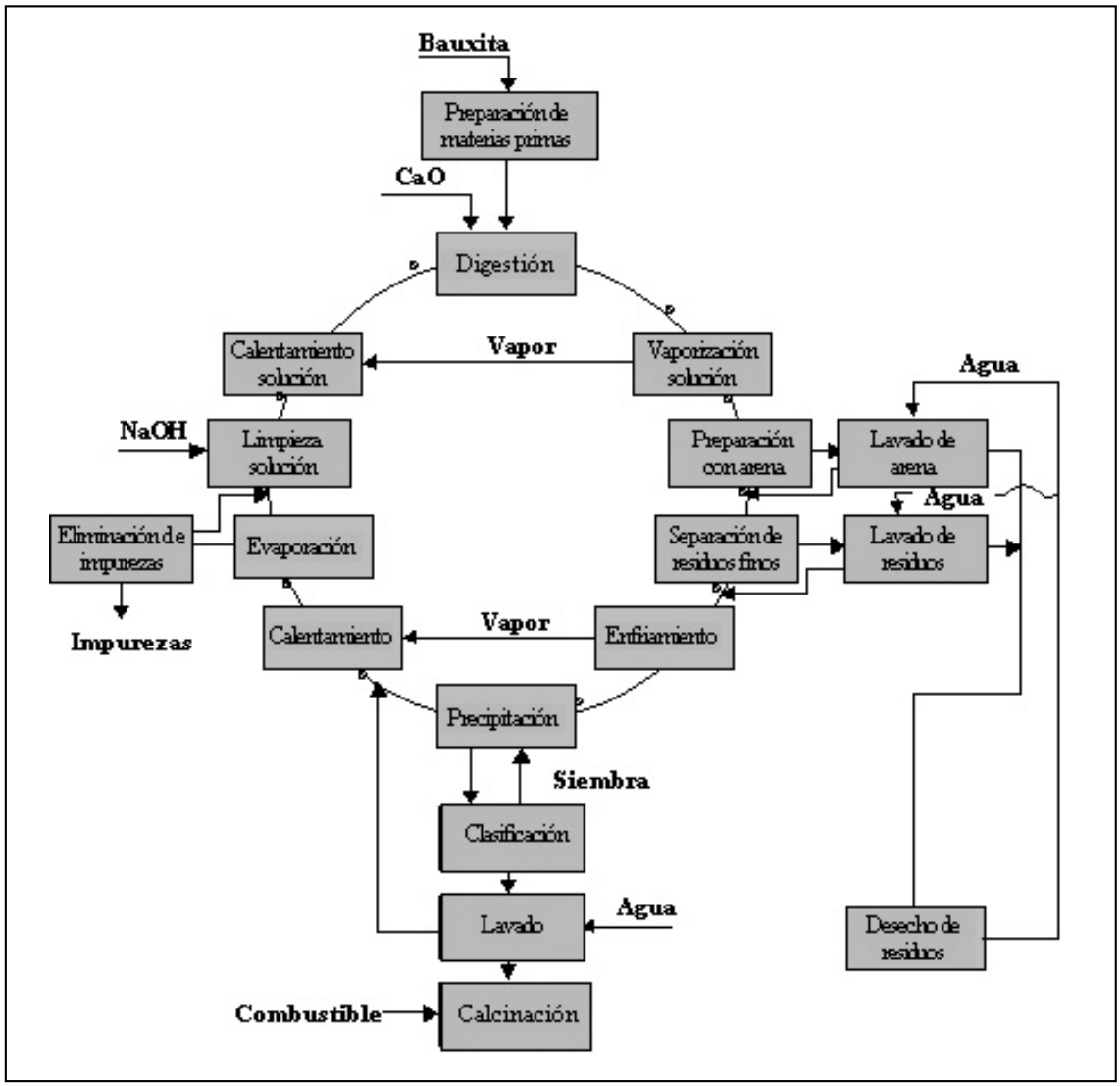


Figura 4.1: Producción de alúmina: Proceso Bayer.

que contiene aluminato sódico disuelto y una mezcla de óxidos metálicos que se extrae en espesadores. La solución de aluminato se enfría y se siembra con alúmina para cristalizar alúmina hidratada [tm 30, Irish EPA 1996]. Los cristales se calcinan y luego se calcinan en hornos de secado rotatorios o calcinadores flash de lecho fluidizado antes de su uso o expedición [tm 77, Al Expert Group 1998; tm 90 Al Expert Group 1998]. Puede haber presentes otros metales como el vanadio, que también pueden recuperarse de la solución.

Aunque el proceso básico es estándar en la industria, existen variaciones en el equipo empleado, en particular los digestores y calcinadores. Estas variaciones afectan principalmente la energía utilizada en el proceso [tm 77, Al Expert Group 1998]. Esto se muestra más adelante.

4.1.1.2 Producción de aluminio por electrólisis

El aluminio se produce a partir de materiales primarios mediante la reducción electrolítica de óxido de aluminio (alúmina) disuelto en un baño fundido principalmente de fluoruro de aluminio y sodio (criolita) a una temperatura de unos 960 °C [tm 6, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998].

Las células electrolíticas se componen de un cátodo de carbono, aislado mediante ladrillos refractarios dentro de una carcasa rectangular de acero, y un ánodo de carbono suspendido de una viga anódica eléctricamente conductora. Las células están conectadas en serie para formar una línea de reducción eléctrica (línea de crisol). Se hace pasar una corriente continua desde un ánodo de carbono, a través del baño, al cátodo y de ahí, a través de una barra colectora, a la siguiente célula [tm 6, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998].

Se agrega alúmina a las células para mantener un contenido de alúmina del 2 - 6% en el baño fundido, en las plantas modernas esto se realiza mediante adiciones controladas por ordenador. Se agregan compuestos de fluoruro para rebajar el punto de fusión del baño, permitiendo la operación de las células a baja temperatura. El fluoruro de aluminio (AlF_3) es el aditivo más común, ya que también neutraliza el óxido sódico presente como impureza en el material inicial de alúmina. La mayoría de células operan ahora con un contenido de AlF_3 en el baño considerablemente en exceso de la composición estequiométrica de la criolita, aunque las emisiones de fluoruro aumentan a medida que aumenta el exceso de AlF_3 en el baño [tm 6, HMIP Al 1993; tm 77 Al Expert Group 1998; tm 100, NL Al 1998].

El aluminio líquido se deposita en el cátodo en el fono de la célula, y el oxígeno se combina con el ánodo de carbono, para formar dióxido de carbono. Los ánodos de carbono se consumen por lo tanto de forma continua durante el proceso.

Los sistemas de células varían según el tipo de ánodo y el método utilizado para la alimentación de alúmina, como se ilustra en la figura 4.2 [tm 6 & 17, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998]. Existen dos tipos principales de células electrolíticas, de Søderberg y de Precocción.

a) Los ánodos de Søderberg se elaboran in situ a partir de una pasta de coque de petróleo calcinado y brea de alquitrán de hulla, que se cuece mediante el calor desprendido por el baño fundido. La corriente pasa al ánodo de Søderberg a través de clavijas de conexión que deben retirarse y volverse a conectar más arriba en el ánodo a medida que éste se consume. A medida que el ánodo se consume, baja más pasta por la carcasa del ánodo, lo que permite un proceso que no requiere el cambio de ánodos. Periódicamente se agrega alúmina a las células de Søderberg a través de orificios practicados rompiendo la costra de alúmina y electrolito solidificado que cubre el baño fundido. En las plantas más modernas se utilizan sistemas de alimentación automáticos en puntos concretos, lo que elimina la necesidad de romper regularmente la costra. En la parte inferior de la envoltura del ánodo se fija un faldón colector de gas para la recogida de gas. Los vapores se recogen y se combustionan en quemadores para reducir las emisiones de alquitranes y HAPs. Los gases de ventilación de la sala de crisoles también pueden recogerse y tratarse.

b) Los ánodos precocidos se fabrican con una mezcla de coque de petróleo calcinado y brea de alquitrán de hulla, que se moldea en forma de bloque y se cuece en una planta de ánodos separada. La planta de producción de ánodos es frecuentemente parte integral de la planta de aluminio primario y debe incluirse en la definición de dichas instalaciones, así como la contribución de la producción de ánodos a las emisiones totales. El Capítulo 12, Carbono y Grafito, cubre este proceso con mayor detalle. Los ánodos están suspendidos en las células mediante barras conectadas a vigas anódicas, que también sirven como conductor eléctrico. Los ánodos se bajan progresivamente a medida que se consumen, y son sustituidos antes de que las barras sean atacadas por el baño fundido. Los restos de los ánodos, que se denominan puntas de ánodos, se limpian de material del baño y se reciclan a través de la planta de ánodos.

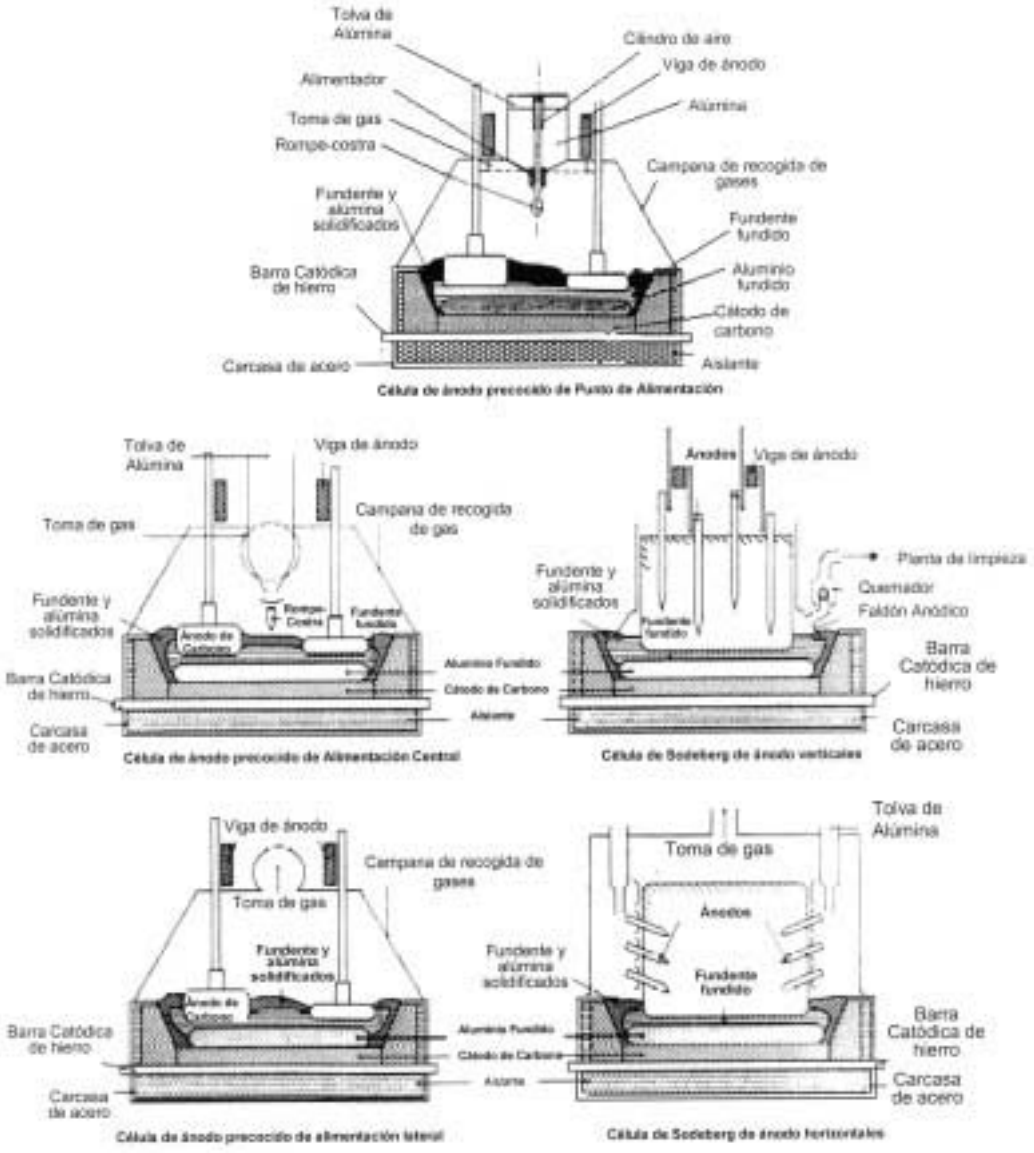


Figura 4.2: Células electrolíticas de aluminio primario.

Las células de precocción tienen normalmente 12 - 40 ánodos individuales, que se cambian a intervalos regulares. En una gran sala de crisoles, el cambio de ánodos es frecuente y comporta la retirada de las pantallas de cobertura de la célula. Aunque normalmente hay pocas fugas de la célula en la que se realiza el mantenimiento (según la capacidad del sistema de extracción), el

caudal de extracción global de las otras células se reduce. Esto produce un aumento de las emisiones fugitivas si se retiran varias cubiertas al mismo tiempo.

Las células de precocción pueden ser de dos tipos, según el modo en que se agrega alúmina.

- Las células de ánodos precocidos de alimentación lateral (SWPB), la alúmina se alimenta a las células después de romper la costra por su perímetro. Las campanas de recogida de gas situadas a lo largo de las células deben abrirse durante esta operación.

- Las células de ánodos precocidos de alimentación central (CWPB) se alimentan con alúmina tras romper la costra a lo largo de la línea central o en puntos seleccionados de la línea de la célula (alimentación por puntos). Estos métodos de alimentación pueden realizarse sin abrir las campanas de recogida de gas.

El sistema de recogida de gas extrae los gases de proceso a un sistema de extracción que utiliza lavadores secos de alúmina para eliminar y recuperar HF y fluoruros. El lavador también elimina los residuos de alquitrán, pero no elimina el dióxido de azufre. La alúmina que sale de los lavadores se limpia en filtros de bolsa o PEs y normalmente se alimenta directamente a las células. Los gases de ventilación de la sala de crisoles pueden recogerse y tratarse en un sistema de lavador húmedo.

El cátodo no se consume en el proceso, pero los cátodos se deterioran con el tiempo. Los bloques de carbono absorben electrolito, y al cabo de 5 - 8 años deben ser sustituidos debido a que se hinchan y se agrietan, lo que produce la penetración de electrolito y aluminio fundido en la barra conductora del cátodo y la carcasa de acero. Se forman pequeñas cantidades de cianuros mediante una reacción entre nitrógeno y carbono. El residuo de los cátodos se conoce como revestimiento de crisol consumido, y se utilizan diversas rutas de desecho y reciclaje para este material [tm 42, Ausmelt 1998; tm 77 Al Expert Group 1998; tm 100, NL Al 1998], que se describen más adelante en la sección 4.2.1.4.

El aluminio fundido se retira periódicamente de las células mediante sifón al vacío a crisoles. Los crisoles se transportan a la planta de moldeo y se vierte el aluminio en hornos de retención calentados. En estos hornos se agregan los metales de aleación y se mantiene la temperatura controlada. Las escorias superficiales formadas por la oxidación de aluminio fundido en la superficie de la mezcla fundida son retiradas, pudiendo usarse recipientes cerrados para minimizar la ulterior oxidación de las escorias superficiales, y también se utiliza atmósfera inerte de nitrógeno o argón [tm 106, Farrell 1998].

A lo largo de este capítulo, el término escorias superficiales hace referencia tanto a las escorias superficiales como a las escorias de fondo.

4.1.1.3 Refinado

En esta etapa, el metal es refinado para eliminar las impurezas como sodio, magnesio, partículas de óxido cálcico e hidrógeno. Esta etapa de refinado mediante la inyección de un gas en el metal fundido, normalmente en un reactor en línea. El gas de tratamiento utilizado varía según las impurezas: Se utiliza argón o nitrógeno para eliminar el hidrógeno y mezclas de cloro y argón o nitrógeno para eliminar las impurezas metálicas. También se emplea fluoruro de aluminio para eliminar el magnesio. El metal es luego filtrado antes de su moldeo.

En el horno de retención se efectúan asimismo ajustes en la aleación, mediante la adición del metal requerido (Si, Cu, Mg, Pb, Sn, Zn) o una aleación maestra del metal con aluminio (Ti, Cr, Fe, Mn, Ni) [tm 116, Secondary Al Expert Group 1998].

También se realizan otras adiciones para refinar el grano del metal, las más comunes son titanio o boruro de titanio.

En esta etapa se producen escorias superficiales, que son eliminadas de la superficie del metal fundido y se reciclan en la industria secundaria de aluminio.

4.1.1.4 Moldeo

Los planchones, perfiles o palanquillas se moldean en máquinas verticales de fundición directa en coquilla, que utilizan moldes de metal refrigerados por agua y una mesa de retención en la parte inferior de los moldes. La mesa desciende a medida que se forma el lingote. Otros métodos de moldeo incluyen el uso de moldes de metal (estáticos o con movimiento continuo) y el moldeo en continuo de láminas delgadas y de alambrón [tm 6, HMIP Al 1993]. En esta etapa se producen pequeñas cantidades adicionales de escorias superficiales, que son eliminadas de la superficie del metal fundido.

4.1.2 Aluminio secundario

4.1.2.1 Procesos de producción

La característica principal de la producción secundaria de aluminio es la diversidad de materias primas existentes y la variedad de hornos empleados [tm 116, ALFED 1998]. El tipo de materia prima y su pretratamiento se utiliza por consiguiente para determinar el mejor tipo de horno a utilizar para un tipo particular de chatarra, atendiendo a su tamaño, contenido de óxido y grado de contaminación entre otros [tm 145, Winter 1998]. Estos factores influyen asimismo sobre la elección de los fundentes asociados con el proceso, para potenciar al máximo la recuperación de aluminio [tm 2, HMIP Al 1993; tm 77 & 116, ALFED 1998]. La elección de la tecnología de proceso empleada varía de una planta a otra. El número de factores que influyen en la elección del proceso significa que existe la posibilidad de muchas estrategias viables que pueden utilizarse en circunstancias similares.

Los hornos rotatorios o de reverbero se utilizan para la fundición de una amplia gama de materias primas secundarias. Los hornos rotatorios pueden incorporar un mecanismo basculante que se afirma que reduce la cantidad de fundente requerida [tm 145, Winter 1998]. Los hornos de inducción y el proceso Meltower se utilizan para la fusión de calidades de aluminio más limpias. Los hornos de reverbero incluyen a menudo un pozo lateral. En ocasiones se utiliza un sistema de bombeo (mecánico o electromagnético) para transportar el metal fundido a través del pozo lateral y de un pozo de carga para facilitar la fusión de las partículas pequeñas. Las bombas electromagnéticas no tienen partes móviles y se basan en una inductancia externa para inducir la fuerza electromagnética, y se induce agitación en el pozo de carga y en el horno. También se utilizan otras bombas, que tienen partes internas resistentes al calor y "centrífugas" de metal [tm 145, Winter 1998].

Los hornos de reverbero pueden también usar una solera en pendiente en la zona de alimentación del metal, en la que pueden colocarse elementos que contengan grandes trozos de hierro. El aluminio se funde, desprendiéndolo del substrato de hierro, que permanece en la solera. Con ello se minimiza la contaminación de la mezcla fundida con hierro [tm 77, Al Expert Group 1998; tm 116, ALFED 1998]. En la sección 2.5.2 se da información sobre algunos de los hornos.

Las fuentes típicas de aluminio son chatarra de proceso, latas de bebidas usadas (LBUs), papeles de aluminio, extrusiones, chatarras comerciales, virutas, y metal laminado o moldeado antiguo. Además de esto, también se recupera aluminio de escorias superficiales y escorias salinas. Puede haber distintos contaminantes, lo que se tienen en cuenta en la elección del pretratamiento o en el diseño del horno [tm 77, Al Expert Group]. A veces, la chatarra se clasifica antes por tipos de aleaciones, con el fin de producir la aleación deseada con el mínimo de reproceso [tm 116, ALFED 1998; tm 121, Hoogovens 1998].

Las chatarras como LBUs y virutas son fuentes importantes de materiales de alimentación y pueden estar contaminadas. En ocasiones debe eliminarse el recubrimiento o el aceite de las mismas antes de su fusión, con objeto de mejorar la velocidad de fusión (y la eficacia térmica) y reducir el potencial de emisiones [tm 121, Hoogovens 1998; tm 122, ETSU 1998]. La fusión del material limpio puede ahorrar energía y reducir la producción de escorias superficiales. Los procesos de pretratamiento se detallan en la tabla 4.24.

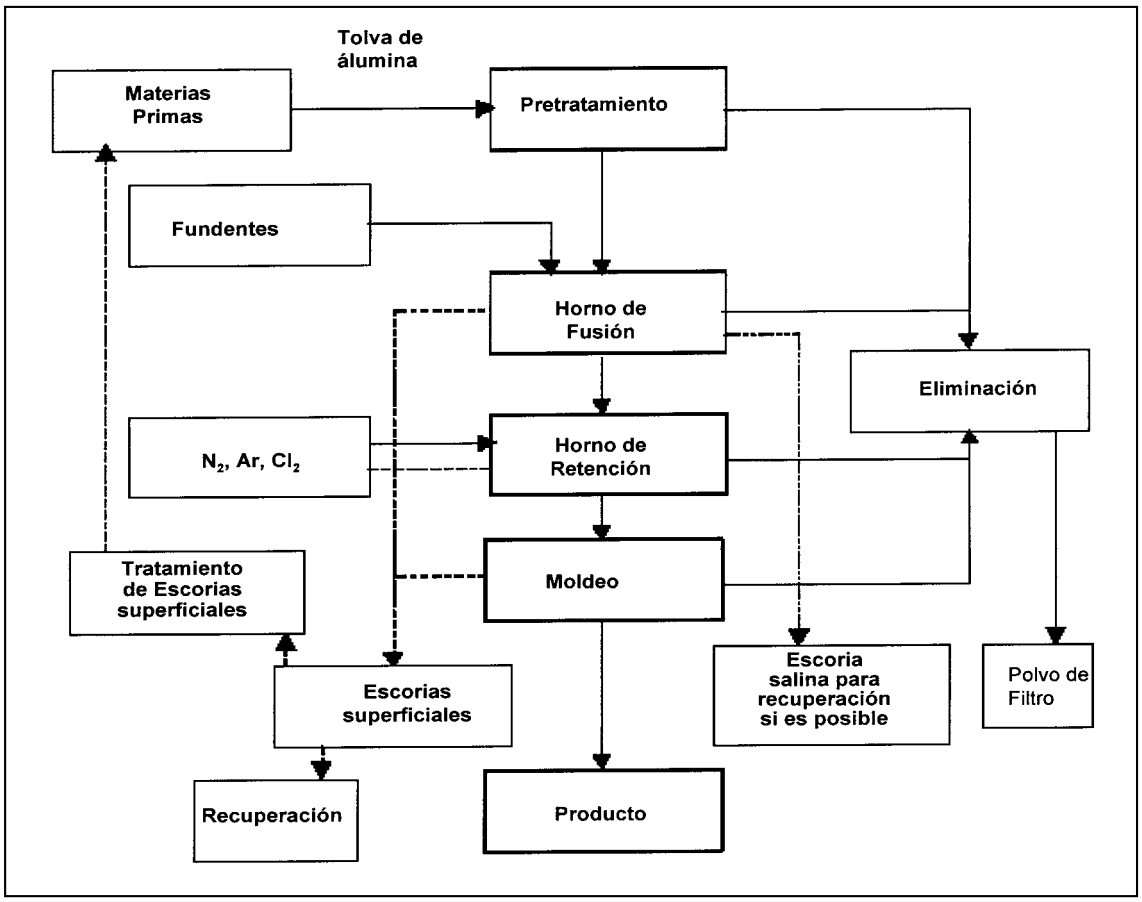


Figura 4.3: Proceso genérico de aluminio secundario.

En la industria secundaria se utiliza una serie de distintos fundentes para facilitar el proceso del metal n diversas formas. Un ejemplo es el uso de sal fundida (una mezcla de cloruros de sodio y potasio y algunos fluoruros) para evitar la oxidación y absorber las impurezas. Los gases de los hornos contienen cloruros y HCl producido a partir de la sal. También se utilizan fundentes refractarios y fluorados. La escoria salina se sangra después del metal. Existen variaciones en la cantidad de fundente salino utilizado, y esto depende del horno utilizado y del contenido de óxido de la materia prima. El pretratamiento del material de alimentación puede reducir el uso de sal a la mitad (Ejemplo 4.06). Se ha informado de que para un horno rotatorio estático se utilizan hasta 1,8 kg de sal por kg de componentes no metálicos, y < 0,5 kg por kg para un horno rotatorio basculante [tm 145, Winter 1998].

El uso de un horno de reverbero con un pozo de carga y sistema de bombeo puede aumentar el número de calidades de chatarra, incluso es posible fundir papel de aluminio y virutas pequeñas en estos hornos. También puede reducir la pérdida de metal por oxidación sin utilizar grandes cantidades de sal u otros fundentes [tm 121, Hoogovens 1998; tm 122 & 123 ETSU 1998].

4.1.2.2 Procesos de refinado y moldeo

El metal puede sangrarse desde el horno de fusión, donde se realizan adiciones de elementos de aleación, bien directamente a un sistema de moldeo, bien a través de un sistema de transferencia a un horno de retención (donde pueden hacerse otras adiciones de elementos de aleación). El metal es luego refinado en el horno de retención o en un reactor en línea, para eliminar los gases y otros metales, generalmente del mismo modo que el aluminio primario. El magnesio puede estar presente en el aluminio secundario y es posible que deba reducirse. El tratamiento del aluminio fundido con mezclas de cloro gas se utiliza para eliminar el magnesio, aunque también se usa fluoruro de aluminio y sodio y fluoruro de aluminio y potasio [tm 116, Al Expert Group 1998; tm 34, US EPA 1995]. Este último compuesto es un subproducto de algunas aleaciones maestras.

Los lingotes grandes, palanquillas y planchones se moldean del mismo modo que el aluminio primario, y también puede producirse una gama de lingotes más pequeños (por ejemplo, para suministrar a la industria del moldeo) en gran variedad de aleaciones según la aplicación final. También es posible transportar aluminio fundido por carretera, en contenedores especiales aislados térmicamente, a sus usuarios finales.

4.1.2.3 Escorias y escorias superficiales

El aluminio es fácilmente oxidable, y esto es un factor importante en los procesos de producción. La fusión de aluminio sin un fundente protector produce una capa de óxido conocida como escorias superficiales. Esta capa se elimina de la superficie antes del moldeo. Las escorias eliminadas de un horno contienen entre un 20% y un 80% de aluminio. Las escorias son tratadas a veces tan pronto como se extraen del horno, para reducir las emisiones y evitar la oxidación ulterior del metal presente. Entre los métodos se incluyen el enfriamiento con gas inerte, el prensado en caliente para eliminar el aluminio fundido y el enfriamiento en enfriadores especiales.

Las escorias superficiales frías se tratan mediante diversos procesos para recuperar el aluminio. Por ejemplo, mediante fundición en un horno rotatorio con fundente salino o utilizando técnicas de separación como la molturación y proceso para separar el óxido del metal [tm 116, ALFED 1998]. En este último caso, el metal puede volver a fundirse en los hornos pertinentes y la fracción fina puede seguirse procesando, por ejemplo reciclarse en la industria del acero o en el proceso de recuperación de escoria salina. Se ha documentado que la producción total de escoria salina y residuos se reduce, y el consumo energético es menor debido a la menor carga de material inerte en el horno [ALSA 1999].

Los hornos rotatorios se utilizan para recuperar aluminio de las escorias superficiales y de la fracción metálica generada en el tratamiento de las escorias superficiales. Normalmente se utiliza un fundente salino para facilitar este proceso, ya que la sal reduce la oxidación y promueve la eliminación de algunas impurezas (ej. Mg, Ca, Li). Existen varias instalaciones en las que puede recuperarse escoria salina mediante un proceso de lavado y cristalización. Los procesos pueden producir gránulos de aluminio reciclado y sal. Se reporta [tm 90, Al Experts 1998] que la fracción de óxidos metálicos (principalmente óxidos de aluminio, calcio y magnesio) puede seguir siendo procesada y lavada para producir óxido de aluminio fino que se vende a la industria del cemento.

4.1.2.4 Recuperación de escoria salina

Los bloques grandes de escoria salina se trituran a un tamaño manejable y se criba para recuperar los gránulos de aluminio metálico (normalmente hasta un 10%). El material finamente

triturado se disuelve luego en agua de modo que los cloruros pasan a la solución para producir salmuera, dejando el óxido de aluminio insoluble y las partículas metálicas más finas de aluminio, que normalmente no es reciclable económicamente como metal. En esta etapa del proceso se desprenden gases, que principalmente contienen amoníaco, metano, hidrógeno y fosfina. También existe el potencial de importantes emisiones de polvo durante las etapas de trituración. Es posible utilizar estos gases como combustible para otras partes del proceso [tm 116, ALFED 1998]. La salmuera se filtra, eliminando los óxidos insolubles, y la solución pasa luego a evaporación y cristalización, lo que permite recuperar los cloruros originales de sodio y potasio. Estos cloruros son luego reutilizados como fundente en el proceso de fusión.

Los óxidos metálicos residuales incluyen óxidos de calcio, magnesio y aluminio (hasta un 65% de Al_2O_3) y también contienen sulfatos, cloruros y nitratos [tm 206, TGI 1999]. En casos en los que existan posibles mercados para la fracción de óxidos, será necesario un lavado ulterior para reducir estos aniones a niveles manejables. La solución de salmuera del lavado puede ser devuelta a la etapa de disolución. Se ha señalado que en algunos casos es posible conseguir la recuperación completa de los materiales presentes en la escoria salina [tm 90, Al Experts 1998].

4.2 Niveles Actuales de Emisiones y Consumos

4.2.1 Aluminio primario

Además del CO_2, que está vinculado inherentemente al proceso, existen emisiones potenciales a la atmósfera de polvo, SO_2, HF, partículas con fluoruros, CO, PFCs y HAPs del sistema de extracción de gas del crisol y del sistema de ventilación de la sala de crisoles. Existen emisiones potenciales a la atmósfera de polvo, metales, cloruros y productos de combustión de los hornos de retención y tratamiento en la sección de moldeo [tm 6, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998].

Al agua/mar existen las posibles emisiones de partículas, SO_2, fluoruros y HAPs de los lavadores húmedos y de agua arrastrada por tormentas.

Las principales fuentes de desechos son los materiales de revestimientos de crisol consumidos (RCC).

Los HAPs emitidos al agua debe reportarse como los 6 compuestos en la lista de Borneff y los emitidos a la atmósfera como B(a)P [tm 29, PARCOM 1997; tm 128, Nordheim 1997].

La producción de ánodos se cubre, junto con la producción de grafito, en el Capítulo 12 de este documento. El uso de puntas de ánodo de la producción de aluminio como parte de las materias primas de entrada a este proceso aporta fluoruros.

4.2.1.1 Energía y otros aportes

Los aportes de material y energía al proceso son significativos. Se requieren unas 2 toneladas de bauxita para producir 1 tonelada de alúmina, que a su vez produce 0,53 toneladas de aluminio. Los ánodos de carbono se consumen, se utilizan aproximadamente de 0,4 a 0,45 toneladas de carbono por tonelada de aluminio producido. Los costes energéticos son también altos y pueden representar aproximadamente el 30% de los costes de producción.

La producción de alúmina requiere energía para la digestión y calcinación. El consumo energético está influenciado principalmente por el origen y la composición química de la bauxita, el tipo de digestores utilizados y el tipo de calcinadores empleados. El orden de energía utilizado en las plantas europeas es de 8,0 a 13,5 GJ por tonelada, con un valor medio de 11 GJ por

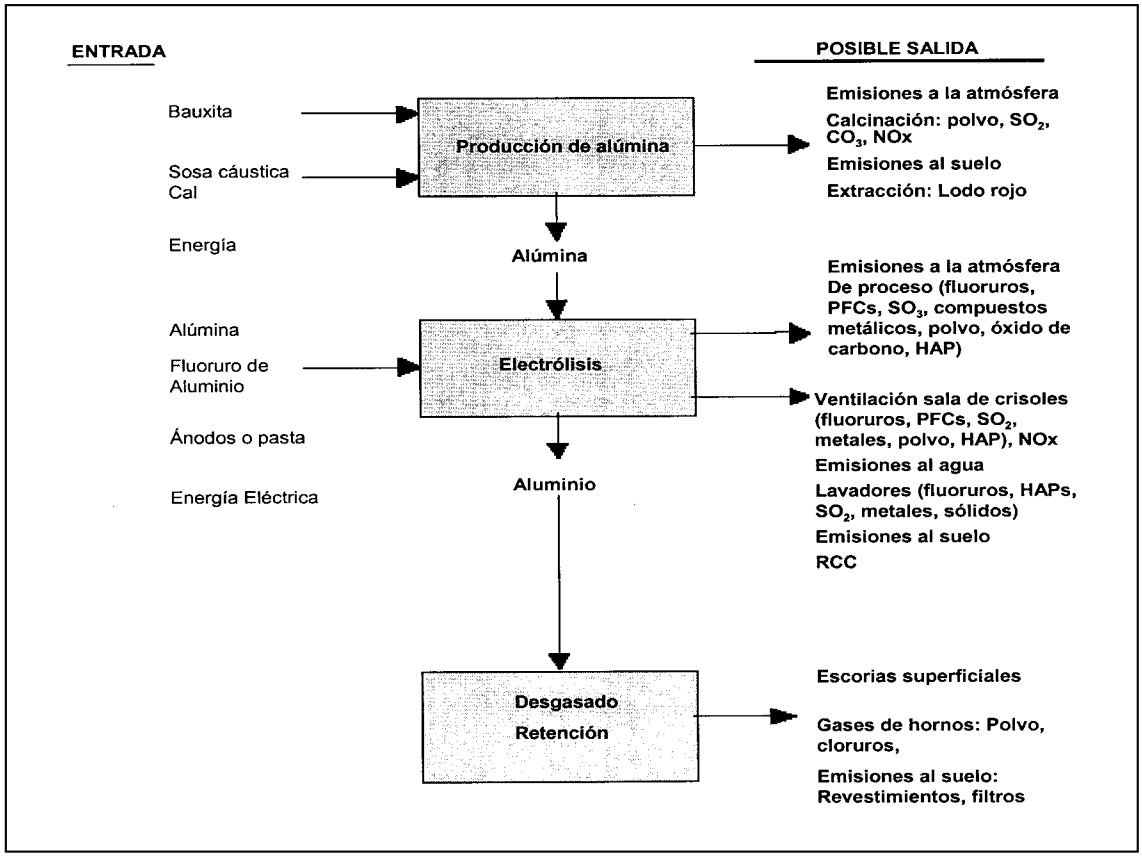


Figura 4.4: Entradas y salidas de la producción de aluminio primario.

tonelada [tm 90, Al Expert Group 1998]. Las cantidades de NaOH y CaO utilizadas también están ligadas a la composición de la bauxita.

Tabla 4.1: Rangos de entradas para la producción de alúmina

Parámetro	Rango Típico kg/t Alumina
Bauxita	1.970 – 2.250
NaOH (50%)	33 – 160
CaO	35 – 110
Agua	1.000 – 6.000
Energía GJ/t	8.0 – 13.5

La reducción de la demanda energética está influenciada principalmente por el uso de digestores de tubos, que pueden operar a temperaturas más elevadas utilizando un medio de transferencia de calor con fundente salino. Estas plantas tienen un consumo de energía inferior a 10 GJ por tonelada.

La etapa de electrólisis tiene un elevado consumo energético que va desde 53 GJ por tonelada para las células de precocción con alimentación central mejor operadas (incluida producción de ánodos) a 61 GJ para algunas células tradicionales de Søderberg.

Tabla 4.2: Rangos de entrada para electrólisis

Parámetro	Precocción	Søderberg
Alúmina - kg/t Al	1.900 – 1.940	1.900 – 1.940
Malla anódica - kg/t Al	400 – 440	
Pasta anódica - kg/t Al		500 – 580
Al F_3 - kg/t Al	15 – 25	15 – 25
Vida de los cátodos - años	5 – 8	5 – 8
Energía eléctrica para electrólisis - kWh/kg Al	12.9 – 15.5	14.5 – 17.0
Hierro colado para planta de varillaje - kg/t Al	1.0 – 3.0	
Pasta de fijación y collar - kg/t Al	0 – 25	
Consumo eléctrico total - kWh/kg Al*	14.0 – 16.5	15.0 – 18

Nota. * Incluye pérdida del rectificador, control de contaminación y consumo auxiliar.
Los datos energéticos se facilitan de acuerdo con las convenciones usadas por la industria.
La producción de ánodos representa 5.500 MJ/t.

La producción de aluminio a partir de metal reciclado reduce hasta un 5% la energía de la producción primaria [tm 29, PARCOM 1997].

Tabla 4.3: Datos de consumo de la sección de moldeo

Parámetro	Rango
Escorias superficiales producidas - kg/t Al	10 – 25
Fundentes - kg/t Al	0 – 1.5
Gases - kg/t Al	0 – 6.0
Viruas, etc. - kg/t Al	0 – 3
Agua - kg/t Al	200 – 12.000
Energía de homogeneización MJ/t Al	500 – 1.200
Energía de la Sección de Moldeo - MJ/t Al	800 – 1.900*

Nota. * Sin incluir la refusión del metal frío.

4.2.1.2 Emisiones a la atmósfera

Hay cinco fuentes distintas dentro del proceso:

- Gases de calcinación y calentamiento para la producción de alúmina;
- gases de proceso de la cocción de ánodos;
- gases de proceso de células electrolíticas;
- ventilación de la sala de crisoles;
- desgasado y moldeo.

Las emisiones potenciales de la etapa de electrólisis son:

- fluoruros;
- compuestos perfluorocarbonados (PFCs);
- alquitranes e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs);
- dióxido de azufre (SO_2) y otros compuestos de azufre;
- polvo;

- compuestos metálicos;
- óxidos de nitrógeno (NO_x);
- monóxido de carbono (CO);
- dióxido de carbono (CO_2).

Las emisiones que se producen desde las células electrolíticas y a través de la ventilación de la sala de crisoles están relacionadas entre sí por la eficacia con la que se capturan los gases de escape de las células [tm 29, PARCOM 1997; tm 100, NL Al 1998].

4.2.1.2.1 Captura de gases

a) Precocción

Las células de precocción con alimentación central (CWPB) son totalmente cerradas y tienen un sistema de extracción de vapores. Un valor típico para estas células de precocción es la eficacia de captura de los gases de escape dentro del aire de proceso es de un 95% a un 99% según el diseño del sistema de extracción, la eficacia de las cubiertas de la célula y el esquema de los sistemas de extracción y filtrado. La eficacia de captura depende de una buena velocidad de extracción, campanas bien diseñadas y una buena práctica operativa para asegurar que el mínimo número de campanas estén abiertas al mismo tiempo. Las campanas abiertas o campanas que no estén bien cerradas permiten la entrada de aire en el sistema de extracción y por consiguiente reducen la eficacia de la extracción en las células restantes.

Las células de precocción con alimentación lateral (SWPB) son normalmente parcialmente cerradas y se consigue una eficacia de captura del 85% al 95%. Esto es debido a una mala disposición de las campanas y a basarse en la capa de alúmina solidificada para contener los gases. Algunas de estas células de precocción tienen un sistema completo de campanas, pero deben abrirse más frecuentemente para adiciones de alúmina, cambio de ánodos y mantenimiento.

b) Søderberg

Para electrodos convencionales de Søderberg VSS, la situación es similar a las células de precocción con alimentación lateral. El rompe-costra y la tolva de alúmina van montados sobre vehículos, y las células sólo están parcialmente cubiertas por campanas. Con este sistema de recipiente hay un bajo grado de automatización y los consiguientes problemas para el control de una alimentación precisa de alúmina al baño.

Durante la rotura de la costra y la alimentación de alúmina, las emisiones de contaminantes atmosféricos a la atmósfera de la sala de crisoles aumenta. Los pernos de contacto de acero que sirven de soporte a los ánodos y conducen la electricidad deben extraerse a intervalos regulares y volver a colocarse en una posición más alta. Durante esta operación se emiten altos niveles de HAPs. El faldón de recogida de gas que rodea la estructura del ánodo va conectado a un quemador simple de gas que lleva a un tubo de escape; este quemador tiene como misión quemar el CO y los hidrocarburos que se emiten [tm 6, HMIP 1993].

Se han hecho varias mejoras en el sistema de electrodos convencional de Søderberg. Los objetivos han sido reducir los efectos anódicos y las emisiones de los crisoles a un nivel comparable con las emisiones totales de los crisoles precocidos, incluida la precocción de ánodos. Las características principales son:

- Sistema automático de alimentación por puntos de alúmina y control de la elecrólisis;
- Cobertura completa con faldón de la costra del baño;
- El uso de "Pasta Seca" con un menor contenido de brea.
- Mejora de los quemadores para la incineración de HAPs y otros hidrocarburos en el gas de escape del crisol;

- Cobertura completa con campana de la parte superior del ánodo, que está conectada a una salida de gas independiente con lavador seco de alúmina, o parte superior del ánodo seca, en combinación con pasta en los orificios de los pernos y aumento de la altura del ánodo en función de la eficacia.

Estas mejoras producen un aumento significativo en la captura de gases [tm 29, PARCOM 1997]. El rango de eficacia de captura que se registra en las plantas típicas de Søderberg VSS es del 65% al 95%, según el grado de modificación [tm 77, Al Expert Group 1998]. Las plantas de Søderberg HSS tienen un comportamiento similar al de las células de precocción con alimentación lateral.

Las emisiones incontroladas a la sala de crisoles de las células de precocción con alimentación lateral y de Søderberg son por lo tanto significativas, por lo que estos procesos a menudo disponen de sistemas de lavado húmedo como lavadores con agua de mar para eliminar los fluoruros y HAPs de los gases des ventilación de la sala. Las células de precocción con alimentación central son inherentemente más eficaces en la captura de los gases de proceso, pero se basan en buenos procedimientos de diseño, mantenimiento y operación. La siguiente tabla muestra la concentración de diversos componentes en los gases de las células.

Tabla 4.4: Concentraciones de gases sin tratar en células de aluminio primario [tm 29, OSPARCOM 1997]

Tipo de célula	Total fluoruros mg/Nm³	Polvo mg/Nm³	Dióxido de azufre mg/Nm³
Søderberg VSS	700 - 1.700	500 - 1.800	500 - 2.000
Precocción con Campana	75 - 500	150 - 500	50 - 400

4.2.1.2.2 Fluoruros

Durante la electrólisis, de los crisoles se emiten fluoruros gaseosos y sólidos transportados por el aire. El contaminante principal (50 a 80%) es el fluoruro de hidrógeno gas (HF), mientras que el resto son fluoruros sólidos (principalmente fluoruro de aluminio y criolita). El HF se forma por la reacción del fluoruro de aluminio y la criolita con hidrógeno, introducido en el crisol como agua fijada por el óxido de aluminio, como hidrógeno residual en los ánodos y como humedad en el aire. Dado que los crisoles modernos funcionan a menudo con un gran exceso estequiométrico de AlF_3 (12 - 13%), la producción de fluoruros ha aumentado con los años, y la captura de vapores ha adquirido mayor importancia [tm 100, NL Al 1998].

La emisión total de fluoruros de los crisoles varía entre 20 y 40 kg de F por tonelada de aluminio. Con una eficacia de captura de > 98%, y una eficacia de limpieza de > 99,5 a 99,9% en las instalaciones de lavado seco, la emisión de la chimenea puede ser de 0,02 a 0,2 kg de F total por tolerada de aluminio. Como medio de lavado se utiliza alúmina. La alúmina se recoge normalmente en un filtro de bolsa o PE, y luego se utiliza directamente en las células electrolíticas. Los fluoruros recogidos en la alúmina forman fluoruro de aluminio y fluoruro sódico (tras reacción con el óxido de sodio presente en la alúmina) y contribuyen a la cantidad de criolita presente en el baño de la célula. Varias plantas que utilizan lavadores de alúmina producen un exceso de criolita de la reacción de los fluoruros con el contenido de sodio de la alúmina, que se vende como “baño sobrante”.

Las emisiones no capturadas se evacuan a la atmósfera de la sala de crisoles y se emiten a través del sistema de ventilación. Esto puede representar 0,4 – 0,8 kg por tonelada de aluminio según cálculos de PARCOM, lo que da una emisión total de fluoruros del orden de 0,4 – 1,0 kg F por tonelada de aluminio.

La mayoría de plantas de Søderberg que operan en Escandinavia utilizan lavadores húmedos (con agua de mar o sosa cáustica), además del lavador húmedo, para eliminar el dióxido de azufre (SO_2) de los gases de escape [tm 29, PARCOM 1997; tm 100, NL Al 1998].

También se emiten fluoruros y cloruros durante las etapas de desgasado y refinado. La cantidad de componentes de la emisión depende de los agentes desgasantes y de refinado utilizados.

4.2.1.2.3 PFCs

Los PFCs como el tetrafluorometano (CF_4) y el hexafluoroetano (C_2F_6) se forman durante los efectos anódicos. Se emiten en una relación aproximada CF_4:C_2F_6 de 10:1. No pueden eliminarse de la corriente de gas con la tecnología existente una vez formados [tm 29, PARCOM 1997].

Los efectos anódicos ocurren cuando el contenido de alúmina del electrolito cae por debajo del 1 – 2% y se forma una película de gas en el ánodo. Esto detiene la producción del metal y aumenta el voltaje de la célula desde 4 – 5 voltios a 8 – 50 voltios. Los factores que influyen sobre la producción de PFCs son la frecuencia y la duración de los "efectos anódicos" y la intensidad de corriente de la célula. El control del voltaje de la célula y de las adiciones de alúmina es un factor importante en el control de los efectos anódicos [tm 6, HMIP 1993].

La emisión de PFCs de las plantas modernas puede minimizarse mediante el uso de alimentación semicontinua por puntos de alúmina y un mejor control de proceso. Estas plantas de precocción pueden operar con una frecuencia de efecto anódico de < 0,1 a 0,5 por crisol al día, lo que produce emisiones del orden de 0,02 a 0,1 kg de PFCs por tonelada de Al [tm 77, Al Expert Group 1998; tm 100, NL Al 1998]. Muchas plantas antiguas utilizaban los efectos anódicos como control de la alúmina del baño, lo que podía elevar muchísimo las emisiones de PFCs. El uso de sistemas de control modernos y de alimentación automática por puntos de alúmina tanto en las células de Precocción como de Søderberg minimiza el número y la duración de los efectos anódicos [tm 29, PARCOM 1997; tm 77, Al Expert Group]. También puede usarse un sistema automático de supresión de efecto anódico en conjunción con el sistema de control, por ejemplo mediante el uso de diferenciales de altura de los ánodos o aire comprimido.

Las emisiones de PFCs son un son un aspecto medioambiental clave para la industria del aluminio, y se están realizando investigaciones extensivas para mejorar el conocimiento incompleto de que se dispone actualmente acerca de los problemas y posibles soluciones.

4.2.1.2.4 Alquitranes y HAPs

Las emisiones de alquitrán y HAP durante la electrólisis en las plantas de precocción son despreciables, ya que los ánodos se cuecen en una operación independiente. Puede haber emisiones de cantidades muy pequeñas de alquitrán y HAPs de un número limitado de plantas de precocción que utilicen pasta de carbono para la conexión de las clavijas del ánodo y para los collares de protección. Las mediciones en la puesta en marcha de nuevas células y en plantas que utilizan pasta para el collar indican que las emisiones son despreciables [tm 100, NL AL 1998].

Las instalaciones que incluyen una planta de producción de ánodos tendrán una fuente de alquitrán y HAPs de esta parte del proceso. La producción de ánodos se cubre en el Capítulo 12 de este documento, pero las emisiones de un proceso integrado son pertinentes a este capítulo. Hay ejemplos en los que los gases de proceso de una planta de ánodos comparten el mismo lavador de alúmina y filtro de tejido que el proceso de electrólisis. Los resultados de estas plantas muestran que no hay diferencia en el rendimiento de la planta de eliminación cuando se incluyen

los gases de proceso del ánodo. Puede concluirse que el lavador de alúmina es eficiente en la eliminación de los HAPs y alquitranes de una planta de ánodos o de células de Søderberg. La alúmina consumida de los lavadores se utiliza como alimentación para las células (pero no para cubrir el baño). También se utilizan PEs para eliminar alquitrán [ver Capítulo 12]. Los lavadores húmedos para los gases de ventilación también eliminan algunos HAPs, particularmente la fracción con partículas.

En las plantas de Søderberg se emiten alquitranes y HAPs durante la electrólisis, debido a la autococción de ánodos. Las emisiones se generan por evaporación en la carbonización de la pasta. La extracción de los pernos es la operación que produce las emisiones más significativas. Las emisiones dependen del diseño del ánodo, la calidad de la pasta y las prácticas de operación. Generalmente, el uso de lavadores secos elimina alquitrán y HAPs efectivamente de los gases de crisol [tm 29, PARCOM 1997, tm 77, Al expert group]. El uso de pasta de ánodo seca y de partes superiores de ánodo más frías ayuda a reducir las emisiones de HAPs del ánodo.

4.2.1.2.5 Dióxido de azufre y compuestos de azufre

Los ánodos utilizados actualmente tienen un contenido de azufre que va del 1 a más del 3,5%. El azufre reacciona con oxígeno, lo que produce una emisión de dióxido de azufre o sulfuro de carbonilo (COS). Debido a las diferencias en el contenido de azufre de los ánodos, la emisión de dióxido de azufre puede ir desde unos 8 kg a más de 30 kg por tonelada de Al, basado en un consumo de ánodo de 0,4 toneladas por tonelada de Al (el contenido de azufre va del 1% a más del 3,5%). Para el COS se ha reportado que ~ 10% del azufre del ánodo está formado por COS o 2 kg/t de Al para ánodos que contienen un 2,5% de S.

La emisión de SO_2 a través de la ventilación de la sala de crisoles se sitúa entre 0,2 y 0,6 kg por tonelada (concentración: 0,1 a 3 mg/Nm^3). La emisión a través del aire de proceso de las células tiene una concentración típica que se situ entre 50 y 400 mg/Nm^3 [tm 29, PARCOM 1997; tm 100, NL Al 1998]. Cuando el gas de proceso es sometido a lavado húmedo, el rango de concentración en la emisión a la atmósfera será normalmente de 5 - 40 mg/Nm^3.

Se ha reportado que el azufre de los ánodos puede tener un efecto beneficioso al suprimir los efectos adversos del sodio contenido en las puntas de ánodos para reciclaje [tm 77 Al Expert Group 1998].

4.2.1.2.6 Polvo

La alúmina y la criolita son los principales polvos emitidos durante la electrólisis. La alúmina utilizada para eliminar los fluoruros de los gases de escape (denominada alúmina secundaria) se emite asimismo si el sistema de recogida de polvo no es eficaz. Esta alúmina secundaria contiene algo de HF adsorbido en la superficie.

La producción total de polvo depende del tipo de proceso aplicado y del tipo de alúmina, pero se sitúa entre 0,6 y 10 kg por tonelada de Al. Las concentraciones de polvo típicas de la ventilación de la sala de crisoles están entre 0.5 y 5 mg/Nm^3, mientras que la concentración de polvo del aire de proceso está entre 150 y 500 mg/Nm^3 antes de la eliminación y entre 1 y 20 mg/Nm^3 tras la eliminación [tm 100, NL Al 1998].

El moldeado es otra fuente de polvo (y metales), y los vapores de la sección de moldeo suelen recogerse y tratarse en un filtro de tejido. Se han realizado algunos estudios sobre la presencia de dioxinas en los vapores del proceso de moldeo, ya que el uso de cloro para desgasado y la presencia de carbono de los gases de combustión puede producir su formación.

Todas las mediciones de las secciones de moldeo de las fundiciones primarias muestran niveles significativamente por debajo de 1 g/año.

4.2.1.2.7 Metales

Se conoce la presencia de metales en concentraciones de trazas en la alúmina y el fluoruro de aluminio, que por lo tanto puede emitirse durante la electrólisis. En una instalación se extrae teluro de la alúmina producida, por lo que es un posible contaminante. Además, puede haber también presencia de metales volátiles, que pueden emitirse en las sala de crisoles y la sección de moldeo. Hay un número limitado de datos disponibles respecto al impacto medioambiental, pero las trazas de metales no se consideran como una emisión significativa [tm 100, NL Al 1998].

4.2.1.2.8 Oxidos de nitrógeno

Durante la electrólisis se producen óxidos de nitrógeno (NO_x), debido a la presencia de nitrógeno en el ánodo, que puede oxidarse a NOx. El contenido de nitrógeno de los ánodos está por lo general entre 0,2% y 0,4%. Cuando el nitrógeno se convierte totalmente a NO_x, las emisiones pueden estar entre 0,5 y 2 kg de NO_2 por tonelada de Al (concentraciones de 5 - 20 mg/Nm^3 en la chimenea). La cantidad total de NOx emitido es todavía objeto de discusión. Mediciones de control en dos plantas de precocción en Noruega mostraron niveles de emisión de 0,1 a 0,2 kg de NO_2 por tonelada de Al [tm 100, NL Al 1998]. Los gases de combustión de los quemadores utilizados en los hornos de retención y de fusión de la sección de moldeo contendrán óxidos de nitrógeno.

4.2.1.2.9 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) se produce durante la reacción retrógrada del aluminio metal disuelto en el electrolito con el CO_2 producido en el ánodo ($2\ Al + 3\ CO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 3\ CO$), lo que reduce la eficacia de la célula. En una fundición moderna, la producción de CO antes de cualquier reoxidación a CO_2 es del orden de100 a 150 kg por tonelada de Al. La producción de CO aumenta asimismo durante un efecto anódico [tm 6, HMIP Al 1993; tm 100, NL Al 1998].

4.2.1.2.10 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) se forma por la reacción del ánodo de carbono con el oxígeno formado por electrólisis y por una reacción secundaria con aire. Una planta de precocción eficaz consume unas 0,4 toneladas de ánodos de carbono por tonelada de aluminio, lo que corresponde a 1,4 – 1,7 toneladas de CO_2 por tonelada de aluminio. Esta emisión es no obstante bastante menor que la emisión de CO_2 por combustión de combustibles fósiles cuando se utilizan para la producción de la energía eléctrica requerida para la electrólisis [tm 77, Al Expert Group 1998]. También se emite dióxido de carbono de los quemadores utilizados en los hornos de retención y fundición.

4.2.1.2.11 Resumen de los principales contaminantes atmosféricos

En la tabla siguiente se ofrece un resumen de los principales contaminantes atmosféricos y sus fuentes de emisión, según lo discutido anteriormente y la información contenida en la bibliografía.

Tabla 4.5: Importancia de las posibles emisiones de aluminio primario

Componente	Gases de combustión de las células electrolíticas	Ventilación de la sala de crisoles	Desgasado y Retención
Fluoruros – gaseosos y F total	•	•••	• (cloruros)
PFCs	•••	•	
Alquitranes y HAPs	•**	•• **	
SO_2 (sin lavadores)* y COS	••*		•
Dióxido de carbono	••		
Polvo	•	•	•

Nota. * Los lavadores húmedos se utilizan normalmente tras los lavadores secos en Escandinavia para eliminar el SO_2, y normalmente se asocian con el uso de agua de mar en el medio de lavado.

** Los alquitranes y HAPs son pertinentes a los procesos de Søderberg y de precocción que tienen un proceso integrado de producción de electrodos. También pueden ser relevantes para un reducido número de plantas que utilizan pasta palos collares de protección de la conexión de las clavijas anódicas.

••• Más significativa…….• Menos significativa

Tabla 4.6: Total de emisiones a la atmósfera de fundiciones primarias de aluminio

Parámetro	Precocción	VS
HF –kg/t Al	0,15 – 2,0	0,2* – 3,5
Total Fluoruros -kg/t Al	0,3 – 4,0	0,5* – 4,0
Polvo –kg/t Al	0,6 – 7,0	1,5* – 10,0
SO_2 –kg/t Al	10 – 30	10 – 30
SO_2 –kg/t Al si se usa lavado húmedo	1,0 – 3,5	1,0 – 3,5
CF_4/C_2F_6 – kg/t Al	0,02 – 1,0	0,2 – 1,0
Dióxido de carbono – t/t Al	1,4 – 1,6	1,6 – 1,9
B(a)P -g/t Al	-	5 – 20

Nota. * Con lavado húmedo para ventilación.

La importancia de las emisiones incontroladas de la ventilación de la sala de crisoles se basa en una captura de vapores de las células del 98%. Las células de precocción con alimentación central normales pueden alcanzar esta eficacia, pero cuando se consigue una eficacia menor, por ejemplo en células de precocción de alimentación lateral o de Søderberg, la importancia de la ventilación de la sala de crisoles aumenta [tm 77, Al Expert Group 1998; tm 100, NL Al 1998].

Se han calculado los gases emitidos del aire de ventilación en fundiciones primarias [tm 29, PARCOM 1997]. El cálculo se basó en la concentración de los componentes en los gases de las células y la eficacia de captura de las campanas y del sistema de extracción. Este cálculo es relevante para establecer la importancia de las emisiones no capturadas, pero llega a la misma conclusión, que es la importancia de la eficacia del sistema de captura de vapores, y este factor se considera de máxima trascendencia para este trabajo. La mayoría de fundiciones realizan un control regular del mismo.

Tabla 4.7: Sección de moldeo de aluminio primario - emisiones a la atmósfera

Parámetro	Emisión, kg/tonelada de Al
Polvo	0,02-0,3
NO_x	< 0,1-0,4
SO_2	0-3

4.2.1.2.12 Gases de efecto climático

La producción de aluminio primario produce la emisión de CO_2 como producto inherente al proceso electrolítico (de los ánodos basados en carbono) y de la combustión de combustible para producir alúmina y generar electricidad cuando ésta se basa en combustibles fósiles. Además de esto, se producen compuestos polifluorocarbonados (PFCs) como CF_4 y C_2F_6 durante el efecto anódico en las células electrolíticas. Ambos gases son potentes gases climáticos con Potenciales de Calentamiento Global a 100 años de 6.500 y 9.200, respectivamente.

Los cálculos para las fundiciones primarias de aluminio europeas muestran que la cantidad total de gases PFCs emitidos, calculada como emisión equivalente de CO_2, fue de unos 15 millones de toneladas en 1990. Las mejoras en el control del proceso de electrólisis han reducido significativamente el número defectos anódicos y la duración de cada efecto anódico. La emisión de PFCs se ha reducido considerablemente durante los últimos 10 años, y los cálculos muestran que se bajará del nivel de emisión equivalente de CO_2 de 6 millones de toneladas en el año 2000.

Las mejoras de eficacia en otras partes del proceso han contribuido asimismo a una reducción en las emisiones directas de CO_2, reduciendo la emisión total de gases de efecto climático. Las emisiones específicas de PFCs de distintas tecnologías se dan en la tabla 4.5. Las mejoras y ulteriores reducciones se discuten en la sección de técnicas a considerar en la determinación de las MTD.

Se están llevando a cabo trabajos, todavía en fase piloto, para desarrollar un material de ánodo inerte de modo que no se produzca dióxido de carbono durante la electrólisis, que se señalan como técnica emergente. La eliminación del ánodo de carbono evitaría asimismo la formación de PFCs.

4.2.1.3 Emisiones al agua

La producción de aluminio primario es inherentemente un proceso seco. La evacuación de aguas residuales está normalmente limitada a agua de refrigeración, agua de lluvia circulante de superficies y tejados, y lavadores con agua de mar para los gases de la ventilación de la sala de crisoles. El agua de lluvia evacuada puede estar contaminada por el almacenamiento abierto de materias primas y sólidos depositados. Los valores típicos para esta contaminación son < 0,03 kg/tonelada de Al para sólidos suspendidos y < 0,02 kg/tonelada de Al para fluoruro disuelto. Además, pueden evacuarse cantidades considerables de aguas residuales cuando se utilizan sistemas húmedos para el control de la contaminación atmosférica [tm 100, NL Al 1998].

La producción de ánodos puede ser responsable de una producción de agua residual consistente en agua de refrigeración, utilizada para enfriar los ánodos verdes o los gases de combustión. El proceso de enfriamiento puede realizarse mediante sistemas indirectos de agua, lo que produce la evacuación de agua de refrigeración. También pueden usarse sistemas indirectos de agua para enfriar los gases de combustión, para hacerlos adecuados para su eliminación con técnicas normales (filtros de bolsa, precipitadores electrostáticos) [tm 100, NL Al 1998].

La producción de alúmina a partir de bauxita es un proceso que elimina las emisiones de agua operando en un sistema cerrado. El agua contenida en el lodo rojo o que se utiliza para transportarlo al lugar de desecho es muy alcalina y se devuelve a la planta y reutiliza [tm 77, Al Expert Group 1998].

Tabla 4.8: Emisiones al agua de las plantas de electrólisis primaria

Parámetro	Precocción	VS
Fluoruros -kg/t Al	0 – 3,0	0 – 5,0
Sólidos en suspensión – kg/t Al	0 – 6,0	0 – 6,0
HAP (Bonneff 6) – g/t Al	0 – 0,01	8 – 15

La etapa de electrólisis es un proceso seco y no se produce agua residual directamente. La contaminación del agua de lluvia se previene con una buena práctica como la descrita en la sección 2.9.

4.2.1.4 Residuos de proceso y desechos

La producción de metales está relacionada con la generación de diversos subproductos, residuos y desechos, que también están incluidos en el Catálogo Europeo de Desechos (Decisión del Consejo 94/3/CEE). A continuación se detallan los residuos específicos de proceso más importantes.

4.2.1.4.1 Lodo rojo

El lodo rojo producido durante la extracción de alúmina a partir de bauxita es un residuo importante y se requiere su desecho controlado. El lodo es normalmente alcalino debido al proceso de extracción y contienen de 1 a 12 kg de NaOH por tonelada de alúmina producida. Por consiguiente requiere una manipulación cuidadosa. La práctica actual es depositar el lodo rojo in situ o en un lugar próximo, en estanques cerrados especialmente diseñados. El exceso de agua de los estanques se devuelve normalmente al proceso.

También puede producirse una sal que contiene vanadio durante la eliminación de impurezas de la solución producida durante la digestión. La sal es una fuente importante de otros metales como vanadio y teluro.

4.2.1.4.2 Revestimiento de crisol consumido

Con una vida de los cátodos de 5 – 8 años, que es común en las plantas modernas, la cantidad de revestimiento de crisol consumido (RCC) generada es de 20 – 30 kg/t de aluminio producida. El RCC se considera normalmente que consiste en dos fracciones distintas, la parte de carbono y el material refractario. La parte de carbono es de hecho el cátodo de la célula electrolítica, y el resto son distintos tipos de material aislante.

Las dos fracciones se separan a menudo al desmontar el cátodo. El cátodo consumido también contiene algo de material del baño, barras de acero utilizadas para conducir la electricidad al cátodo de carbono, y a menudo escamas de aluminio metal de la penetración de metal en el cátodo. Estas partes se reutilizan directamente en la planta o, en el caso de las barras de acero, se envían directamente fuera de la planta para su reciclaje. La parte de carbono es relativamente homogénea, mientras que la parte refractaria puede estar compuesta de una serie de tipos distintos de materiales refractarios u otros tipos de aislantes.

La siguiente tabla presenta un análisis típico del RCC [tm 134, EAA 1998].

Tabla 4.9: Composición del Revestimiento de Crisol Consumido

Compuesto	Revestimiento de carbono	Aislante
	Rango, % peso	
Al_2O_3	0 – 10	10 – 50
C	40 – 75	0 – 20
Na	8 – 17	6 – 14
F	10 – 20	4 – 10
CaO	1 - 6	1 - 8
SiO_2	0 - 6	10 – 50
Al metálico	0 - 5	0
CN	0.01 – 0.5	0 - 0.1
CN, libre	0 – 0.2	0 – 0.05
Otros		

Los componentes problemáticos ligados a este material son el fluoruro soluble y el cianuro soluble. Además, la humidificación de este material producirá un lixiviado alcalino y liberará pequeñas cantidades de NH_3 y PH_3. Los HAPs no se consideran un problema, ya que el revestimiento de carbono ya se ha carbonizado a temperatura de más de 1250 ºC y la pasta de compresión se ha calentado a más de 900 ºC en la célula electrolítica. Los componentes problemáticos mencionados están ligados principalmente con la parte de carbono del RCC y las partes refractarias en contacto inmediato con el mismo. Como puede verse en las tablas, el contenido de estos componentes es bajo en la parte refractaria.

El revestimiento de crisol consumido puede reutilizarse, tratarse o desecharse [tm 134, EAA 1998].

Reutilización

Reutilización en hornos pirometalúrgicos.
Reutilización para producción de criolita.
Reutilización en la industria de cemento.
Reutilización como combustible.

Procesos de tratamiento

Proceso Reynolds Metals en horno de secado rotatorio.
Proceso de pirohidrólisis Elkem (también produce criolita).
Proceso Comalco Comtor.
Proceso Vortec/Ormet.
Proceso Alcoa/Ausmelt.

Prácticas de desecho

Desecho en litoral.
Desecho en vertedero como residuo peligroso.

4.2.1.4.3 Otros materiales

Las escorias de los procesos de retención y tratamiento representan de 15 a 20 kg por tonelada de aluminio producido. Este material contiene de un 30 a un 80% de aluminio, y su

enfriamiento bajo una capa de gas inerte previene la oxidación. Normalmente se utilizan como materia prima en la industria secundaria de aluminio. Los filtros consumidos del tratamiento de metales suelen desecharse Los residuos sólidos producidos por las instalaciones de limpieza de gas (polvo y lodo) pueden reutilizarse [tm 77 & 90, Al Expert Group 1998].

Las puntas de ánodos de algunas plantas se desechan asimismo si no cumplen los estándares de calidad. Los revestimientos de hornos del proceso de moldeo y del proceso de cocción de ánodos pueden recuperarse o desecharse.

Una buena gestión y el uso de métodos de recuperación permite reducir los desechos en vertedero. Ver ejemplos.

Tabla 4.10: Opciones para reducir los residuos de una fundición primaria de aluminio

Fuente	Uso/Opciones de tratamiento
Escorias superficiales de Al	Recuperación.
Polvo de filtro	Reutilización en el proceso.
SPL	Carburante, fundente y revestimientos para horno.
Ladrillos	De los hornos de ánodos, reutilización.
Acero	Recuperación.
Polvo de carbono (planta de ánodos)	Reutilización .

Tabla 4.11: Cantidades específicas de residuos de la producción primaria de aluminio

Fuente	Cantidad kg por tonelada de Al
Escorias superficiales de Al	15 – 25
RCC	20 – 30
Otros residuos peligrosos	7 – 15
Residuos no peligrosos	12 – 14

El acero de la planta de ánodos se refunde normalmente en un horno de inducción y se vuelve a colar para su utilización en el proceso. La fusión de acero contaminado con fluoruros es una fuente potencial adicional de estas emisiones, y se requiere su apropiada recogida y eliminación.

4.2.2 Aluminio secundario

Hay emisiones potenciales a la atmósfera de polvo, compuestos metálicos, cloruro, HCl y productos de una mala combustión como dioxinas y otros compuestos orgánicos de los horno de fusión y tratamiento. Puede darse la formación de dioxinas en la zona de combustión y en la parte de enfriamiento del sistema de tratamiento de gases de escape (síntesis de novo). Las emisiones pueden salir del proceso como emisiones en chimenea o como emisiones fugitivas, según la edad de la planta y la tecnología utilizada. Las emisiones en chimenea se controlan normalmente de forma continua o periódica, y son reportadas por personal del centro o asesores externos a las autoridades competentes.

Puede haber emisiones de amoníaco y otros gases debido a un inadecuado almacenamiento, tratamiento y transporte de escorias superficiales [tm 33, Mantle 1988]. También se desprende polvo de la manipulación y tratamiento de las escorias superficiales. Hay emisiones potenciales

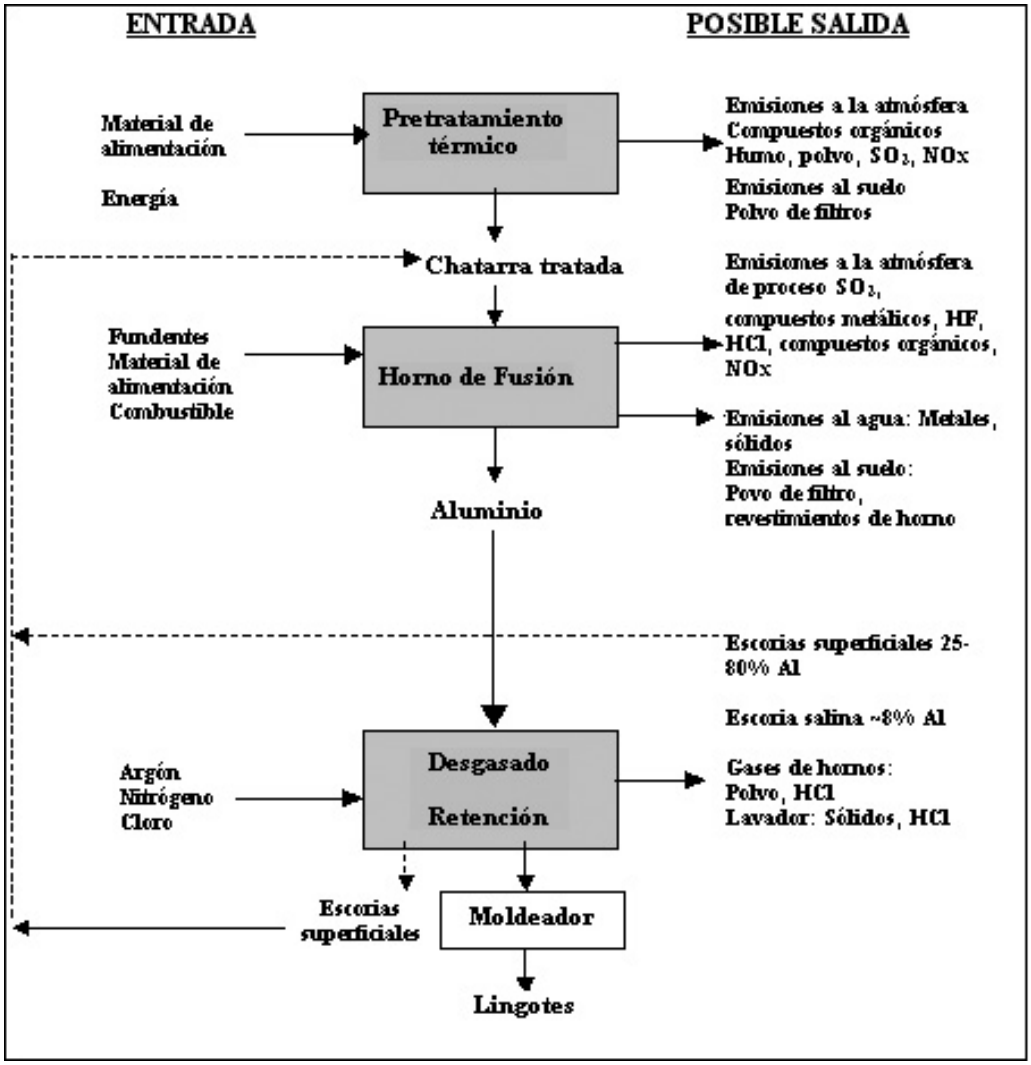


Figura 4.5: Entrada y salida de la producción secundaria de aluminio.

Nota: El humo y el polvo pueden estar asociados con compuestos orgánicos como COVs y dioxinas.

al agua de sólidos en suspensión, metales y aceites de un inadecuado almacenamiento de productos y materiales.

El tipo y calidad de la chatarra tiene una gran influencia sobre la importancia de las emisiones. Esto se discute en detalle en la sección de técnicas a considerar.

Hay posibles fuentes de emisiones de las etapas de pretratamiento, fusión, desgasado y retención.

Los procesos de pretratamiento se cubren en la sección 2.5, la industria secundaria de aluminio utiliza principalmente el secado de virutas y el decapado térmico para el pretratamiento de chatarra, así como la molturación y otros procesos mecánicos y de concentración para las escorias superficiales y escorias salinas.

Las escorias salinas se producen cuando se utilizan mezclas de cloruro sódico y potásico para cubrir el metal fundido para evitar su oxidación, aumentar el rendimiento y la eficacia térmica. Estas escorias se producen generalmente en hornos rotatorios y pueden tener impacto medioambiental si se desechan en el suelo.

La cantidad de escoria salina producida dependen del tipo de material, del horno y del grado de contaminación del aluminio, etc.. Hay opciones disponibles para fusión sin sal en algunos hornos utilizando distintos tipos de materiales de alimentación, así como opciones para el reciclaje de la escoria salina.

4.2.2.1 Emisiones a la atmósfera

Las posibles emisiones a la atmósfera son:

- polvo y humo;
- compuestos metálicos;
- compuestos orgánicos (COVs y dioxinas) y CO;
- óxidos de nitrógeno (NO_x);
- dióxido de azufre;
- cloruros, HCl y HF.

Un porcentaje considerable de las emisiones de estas sustancias se produce por el combustible empleado y por la contaminación del material de alimentación. Parte del polvo es debido a la chatarra fina polvorienta y a los vapores salinos [tm 77 & 90, Al Expert Group 1998].

Tabla 4.12: Importancia de las posibles emisiones a la atmósfera

Componente	Pre tratamiento	Fusión	Refinado y desgasado
HCl, HF y cloruros	•	••	•••
Metales y compuestos	••	••	••
Oxidos de nitrógeno	•	••	• (gases de combustión)
SO_2	• (con combustible adecuado)	• (con combustible adecuado)	• (gases de combustión)
Compuestos orgánicos (COVs, dioxinas)	•••	•••	
Polvo	•••	•••	••

Nota. ••• Más significativa……• menos significativa

Además hay posibles emisiones de polvo y fosfina del tratamiento de escoria salina, que es posible que deban ser consideradas como un efecto sobre otros medios.

4.2.2.1.1 Captura de gases

El capítulo 2.7 cubre las técnicas empleadas. La extracción de vapores es un elemento importante en la producción de aluminio secundario, ya que puede formarse polvo y humo de los contaminantes del material de alimentación, así como de las etapas de combustión y fusión [tm 33, Mantle 1988]. La presencia de varios posibles puntos de emisión en el horno es también significativa, y la recogida de las emisiones de dichos puntos debe preverse. Además, pueden emplearse distintos sistemas para reducir las emisiones fugitivas durante la fase de carga del proceso. Por ejemplo, pueden usarse vehículos de carga que queden herméticamente conectados a la compuerta de carga, para evitar las emisiones durante la carga.

El otro factor importante es la combustión de recubrimientos orgánicos en el pretratamiento o en el horno de fusión. Los sistemas de extracción y eliminación pueden estar diseñados para hacerse cargo del tratamiento de estas emisiones. Las emisiones fugitivas pueden ser significativas a menos que los sistemas de recogida de vapores estén bien diseñados.

4.2.2.1.2 Polvo y metales

Sus emisiones van asociadas y se producen de los gases de combustión o de la chatarra o fundentes utilizados. Algunos metales, que están presentes como contaminantes, se volatilizan durante la fusión y forman polvo. La producción de humo debido a la presencia de carbono orgánico y la presencia de cloruros puede llevar a la formación de dioxinas, que se asocian con las partículas. La postcombustión se emplea para destruir los compuestos orgánicos que escapan de la zona de combustión; también se practica la inyección de sustancias de tratamiento, como cal, bicarbonato sódico y carbono. La mayoría de instalaciones utilizan luego filtros de bolsa o filtros cerámicos (de gran eficacia) para eliminar el polvo, y las emisiones pueden estar en el rango de 0,6 a 20 mg/Nm^3. Normalmente, antes de los mismos se encuentra un arresta-chispas o cámara de enfriamiento para protección de los filtros. Puede aplicarse recuperación de energía, lo más frecuente es utilizar quemadores recuperativos.

Tabla 4.13: Composición típica del polvo de filtro de la producción secundaria de aluminio

Contenido	Valor típico (%)	Rango (%)
CaO	25	0 - 50
Al_2O_3	15	6 - 25
NaCl, KCl	35	20 - 50
Carbono	6	1 - 6
Metales pesados *	-	0.01 - 10
Al metal.	3	2 - 7
PCDD/F	5 µg/kg	3 - 10 µg/kg

Nota. * Zn, Pb, Cu, Mn, V, Cr, Ni, Sn, (trazas de Co, As, Tl, Be, Sb).

Aunque el proceso de la escoria salina puede que no sea un proceso incluido en el permiso para la producción de aluminio, la emisión potencialmente significativa de polvo de las etapas de trituración de un proceso externo es un aspecto que debe tenerse en consideración localmente.

4.2.2.1.3 Compuestos orgánicos (COVs, dioxinas) y CO

La mala combustión del combustible o del contenido orgánico del material de alimentación pueden producir la emisión de compuestos orgánicos. Para optimizar la combustión, se aplican controles de eficacia de los quemadores y de los hornos. Debe tenerse en cuenta la velocidad de combustión de los compuestos orgánicos incluidos si se alimentan al horno. Se informa de que la limpieza previa de la chatarra elimina gran parte de los compuestos orgánicos y mejora la velocidad de fusión [tm 122, ETSU 1998]. El uso de mezclas de cloro para desgasado y eliminación de magnesio y el uso de cloruros (fundente salino) proporciona una fuente de cloro para la posible formación de dioxinas.

Los sistemas de postcombustión se utilizan para destruir el material orgánico producido en el horno o en las etapas de pretratamiento. Puede agregarse carbono y utilizarse una filtración eficiente del polvo para eliminar las sustancias orgánicas y dioxinas asociadas con los materiales en forma de partículas.

4.2.2.1.4 Dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno

Estos dos compuestos se producen como resultado de los sistemas de combustión utilizados en los hornos. Las emisiones son por lo general poco significativas. Para

minimizarlas pueden emplearse quemadores de bajo nivel de NO_x y combustibles bajos en azufre. El uso de quemadores de oxicombustible puede reducir la formación de NO_x térmico, pero existe la posibilidad de que el enriquecimiento de oxígeno pueda tener el efecto opuesto debido a las temperaturas operativas más elevadas, aunque las concentraciones mayores suelen estar asociadas con menores volúmenes de gas y cantidades globales. Las emisiones indicadas son del orden de 10 a 900 gramos de NO_x por tonelada de metal, según el horno [tm 116, ALFED 1998].

4.2.2.1.5 HF, HCl y Cloruros

Puede usarse cloro para tratar el aluminio fundido antes del moldeo, para eliminar el hidrógeno y el magnesio (desmagnesiado). Un posible uso de los hornos rotatorios es para la eliminación de magnesio sin uso ulterior de cloro. Si se utiliza un exceso de cloro, podría emitirse como cloruro de aluminio, que puede hidrolizarse en contacto con el aire para producir HCl. Algunos centros de producción utilizan lavadores húmedos, y otros utilizan lavado seco o semiseco para eliminar estos compuestos. Su formación puede minimizarse mediante un buen control y el uso de mezcla de cloro y gases inertes. El uso de fundentes salinos en un horno de fusión puede también producir la emisión de un vapor muy fino que contiene cloruros metálicos. El uso de fluoruros para el desmagnesiado o como fundente puede producir la emisión de HF y fluoruros en pequeñas cantidades.

4.2.2.1.6. Resumen de las emisiones a la atmósfera

Tabla 4.14: Secado de virutas

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm³	< 5 - 50
HF mg/Nm³	< 5
Cloruros mg/Nm³	< 5
HCl mg/Nm³	3 - 40
SO_2 mg/Nm³	15 - 530
NO_2 mg/Nm³	40 - 420
Dioxinas ng/Nm³	< 0,1 - 1
COVs mg/Nm³	10 - 57
Consumo de energía MJ/t viruta	3.500 - 5.200

Tabla 4.15: Fusión en horno de inducción (tras la eliminación)

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm³	< 1 - 35
HF mg/Nm³	0,1 - 5
Cloruros mg/Nm³	1 - 5
HCl mg/Nm³	0.1 - 40
Dioxinas ng/Nm³	< 0,1 - 1
Consumo de energía MJ/t	2.000 - 8.000

Tabla 4.16: Fusión en horno rotatorio (tras la eliminación)

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm³	1 - 30
HF mg/Nm³	0,1 - 5
Cloruros mg/Nm³	< 1 - 5
HCl mg/Nm³	0,1 - 40
SO_2 mg/Nm³	5 - 520
NO_2 mg/Nm³	50 - 450
Dioxinas ng/Nm³	< 0,1 - 1
COVs mg/Nm³	5 - 90
Consumo de energía MJ/t Al	4.000 - 12.000

Tabla 4.17: Horno de reverbero y fusión en horno con pozo lateral (tras la eliminación)

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm³	< 0,1 - 35
HF mg/Nm³	0,1 - 5
Cloruros mg/Nm³	< 1 - 5
HCl mg/Nm³	0,5 - 40
SO_2 mg/Nm³	0,5 - 515
NO_2 mg/Nm³	15 - 450
Dioxinas ng/Nm³	< 0,1 - 1
COVs mg/Nm³	2 - 55
Consumo de energía MJ/t Al	3.300 - 8.000

Tabla 4.18: Fusión en horno con solera en pendiente (tras la eliminación)

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm³	< 5 - 50
HF mg/Nm³	< 5
Cloruros mg/Nm³	1 - 5
HCl mg/Nm³	30 - 40
SO_2 mg/Nm³	10 - 530
NO_2 mg/Nm³	20 - 420
Dioxinas ng/Nm³	< 0,1 - 1
COVs mg/Nm³	5 - 57
Consumo de energía MJ/t	2.300 - 3.800

4.2.2.2 Emisiones al agua

La producción de aluminio a partir de materias primas secundarias es esencialmente un proceso seco. La evacuación de aguas residuales se limita normalmente a agua de refrigeración, que a menudo se recircula, y agua de lluvia circulante de las superficies y tejados. La circulación de agua de lluvia puede estar contaminada por el almacenamiento abierto de materias primas como chatarra aceitosa y sólidos depositados, Los valores típicos de esta contaminación son

< 0.03 kg/tonelada de Al para sólidos en suspensión. Además, pueden evacuarse cantidades considerables de agua residual cuando se utilizan sistemas húmedos para el control de la polución atmosférica.

4.2.2.3 Residuos de proceso y desechos

Las escorias superficiales de los procesos de retención y tratamiento representan de 15 a 20 kg por tonelada de aluminio producido. Este material contiene una cantidad significativa de aluminio, y el pretratamiento de las escorias superficiales, por ejemplo mediante prensado o enfriamiento bajo una capa de gas inerte reduce la oxidación. Durante su almacenamiento, las escorias superficiales pueden reaccionar con la humedad (del aire) para producir amoníaco y otros gases. Las escorias superficiales se utilizan como materia prima en otras partes de la industria de aluminio secundario y en ocasiones son pretratadas mediante molturación y clasificación con aire para separar el aluminio del óxido de aluminio.

Los filtros consumidos del tratamiento de metales se desechan normalmente. En algunos casos cuando se utiliza bicarbonato sódico para limpieza de gases, pueden recuperarse residuos sólidos con el fundente salino [tm 2, HMIP Al 1993; tm 33, Mantle 1988; tm 145, Winter 1998]. Alternativamente, el polvo de filtro puede tratarse térmicamente para destruir las dioxinas.

Los revestimientos de horno y el polvo pueden recuperarse en los procesos de tratamiento de la escoria salina o desecharse.

Tabla 4.19: Residuos típicos de la producción secundaria de aluminio

Residuo	Origen	Volumen	Tratamiento	Comentarios sobre el tratamiento
Escoria salina	Fusión en un horno de tambor rotatorio	Hasta 500 kg/t de Al	Recuperación mediante técnicas de disolución y cristalización. Producción de sustancias reutilizables, si es posible, Al granulado, sal mixta, Al_2O_3.	Se intenta evitar su desecho en vertedero.
Polvo de filtro	Limpieza de los gases de escape	Hasta 35 kg/t de Al (0,1 - 10 kg/t Al*)	Desecho con pretratamiento o bajo tierra, Reacondicionamiento parcial con escoria salina, o Uso en la industria del acero.	Prohibido su desecho en superficie en algunos países, posible tratamiento térmico (neutralización con $NaHCO_3$ o Na_2CO_3 → uso con escoria salina)
Revestimiento de horno	Horno de fusión	~ 2 kg/t Al	Potencial de reacondicionamiento con escorias superficiales, si no lixiviación + vertedero	No se puede desechar en superficie en algunos países. Se facilita la producción de compuestos para moldeo por inyección
Escorias superficiales	Todos los hornos que no usen sal, limpieza de hornos de fundición, fundiciones	~ 25 kg/t Al 40 - 80 kg/t Al*)	Fundición en horno rotatorio Recuperación, los pelets se usan en horno de tambor rotatorio, la escoria en polvo se usa en la recuperación de escoria salina.	Se intenta evitar su desecho en vertedero.

Nota. * Utilizando un horno de pozo cerrado
** Productos no metálicos (porcentajes de óxido de la chatarra de Al)

Tabla 4.20: Preparación de las escorias superficiales

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm^3	10 - 40
* Polvo kg/t	300 - 700
Consumo de Energía MJ/t	300 - 800

Note. * La cantidad de polvo depende del contenido metálico de las escorias superficiales originales.

El fundente salino patentado es una mezcla de NaCl, KCl y fluoruro cálcico. También puede agregarse algo de fluoruro, hasta un 5%. Cuando se sangra el fundente consumido del horno (en esta fase se denomina escoria salina, contiene grandes cantidades de óxido de aluminio, que el fundente ha separado de las materias primas. Hasta un 8 - 10% del peso total es aluminio metálico. Los cloruros de aluminio, sodio y potasio pueden recuperarse para su uso ulterior mediante procesos de separación y cristalización. En algunas plantas, la porción de óxido puede venderse después de una etapa de lavado o puede usarse como materia de cobertura en vertederos.

Tabla 4.21: Composición típica de la escoria salina

Contenido	Valor típico (%)	Rango (%)
Al, metálico	8	5 - 20
Partes solubles en agua *	37	20 - 40
Partes insolubles en agua **	55	45 - 75
PCDD/F	5 ng/kg	< 10 ng/kg

Nota: * Sales solubles en agua. ** Oxidos metálicos, metal no recuperado y sales insolubles.

Tabla 4.22: Emisiones a la atmósfera típicas recogidas del reciclaje de escoria salina (excluyendo el escape de la caldera, si lo hay)

Emisiones	Rango
Partículas mg/Nm^3	15 - 40
Amoníaco mg/ m^3	30 - 40
Fosfina mg/ m^3	0.1 – 0.5
Sulfuro de hidrógeno ppm	50 - 100
Consumo de Energía MJ/t	300 - 800

Las emisiones fugitivas de polvo de la trituración de escoria salina pueden ser bastante considerables.

4.3 Técnicas a Considerar en la Determinación de las MTD

Esta sección presenta una serie de técnicas para la prevención o reducción de las emisiones y residuos, así como técnicas para la reducción del consumo global de energía. Todas ellas están disponibles comercialmente. Se facilitan ejemplos para demostrar las técnicas, que ilustran un alto nivel de comportamiento medioambiental. Las técnicas que se dan en los ejemplos dependen de la información facilitada por la industria, los Estados miembros Europeos y la Oficina Europea de IPPC. Las técnicas generales descritas en el Capítulo 2 sobre “procesos comunes” son

aplicables en gran medida a los procesos en este sector e influyen en el modo en que se controlan y utilizan los procesos principales y asociados.

Las técnicas utilizadas por otros sectores son también aplicables, particularmente las relativas a la eliminación de alquitranes y HAPs.

Las técnicas apropiadas en cada centro concreto están fuertemente influenciadas por las materias primas a procesar, y en particular el tipo y la variabilidad de las materias primas secundarias. Por ejemplo, los metales que contienen pueden ser cruciales para la elección del proceso.

Los procesos aplicados arriba descritos se aplican a una amplia gama de materias primas secundarias con distintas cantidades y composiciones, y son también representativos de los utilizados en todo el mundo. En tiempos recientes se han desarrollado procesos primarios, y el control de las condiciones operativas y de las técnicas de alimentación para las células han mejorado, así como los sistemas de contención y extracción. Las técnicas han sido desarrolladas por las empresas del sector teniendo en cuenta estas circunstancias.

4.3.1 Procesos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales

El almacenamiento de materias primas depende de la naturaleza del material arriba descrito. Se utiliza el almacenamiento de polvos finos en recintos cerrados, silos o envases herméticos. También se realiza almacenamiento de materiales no polvorientos y no solubles en montones en áreas abiertas, y de los elementos grandes individualmente, también en zonas abiertas.

4.3.1.1 Materias primas primarias

Las materias primas son bauxita, sosa cáustica, cal, mezclas de cloruros, alúmina, fundentes, material de ánodos, material secundario y combustible. Otros materiales importantes son los productos, escorias superficiales, escorias y residuos de proceso. Aspectos importantes son la prevención de fugas de polvo y material húmedo, la recogida y tratamiento de polvo y líquidos y el control de las condiciones de entrada y de los parámetros operativos de los procesos de manipulación y alimentación. Los aspectos específicos de este grupo son:

- La naturaleza potencialmente polvorienta de la bauxita, la alúmina y los fundentes significa que en estos casos lo apropiado es utilizar sistemas cerrados de almacenamiento, manipulación y tratamiento. Los transportadores cerrados, sistemas de transferencia neumática y silos de almacenamiento son técnicas a considerar.
- El polvo generado por algunas operaciones de molturación y separación significa que los sistemas de recogida y eliminación pueden ser aplicables para este proceso.
- Los filtros de tejido o cerámicos consiguen una mayor eficacia de eliminación de polvo que los PEs.

Las escorias superficiales y otros residuos metálicos destinados para recuperación externa deben enfriarse, preferiblemente en atmósfera inerte, y almacenarse en condiciones secas u otros métodos adecuados según el material, como reducción de tamaño.

Tabla 4.23: Métodos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales primarios para aluminio

Material	Almacenamiento	Manipulación	Pretratamiento	Comentarios
Carbón o coque.	Almacenes cubiertos, silos.	Transportadores cubiertos. Neumáticos.		
Fuel oil, otros aceites y brea.	Tanques o bidones en recintos aislados.	Conducciones seguras o sistema manual.	Almacenamiento y conducciones calientes.	Ventilación de retorno de los gases desplazados.
Bauxita y alúmina	Cerrado si se forma polvo.	Cerrada con recogida de polo. Transportador cubierto.		
Cloro gas o mezclas que contienen cloro	Recipientes a presión homologados	Métodos aprobados.		
Productos – Planchones, palanquillas, láminas y lingotes.	Almacenaje abierto.			
Residuos de proceso para recuperación, ej. escorias superficiales.	Cubierto o cerrado según la formación de polvo.	Según las condiciones.		La escoria salina y las escorias superficiales deben mantenerse secas. Sistema de drenaje apropiado.
Residuos para desecho.	Almacenes cubiertos o cerrados o bidones herméticos según el material.	Según las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.

4.3.1.2 Materias primas secundarias

Hay una gran variedad de materias primas secundarias, que van desde polvos finos a elementos grandes. El contenido de metal varía para cada tipo de material, así como el contenido de otros metales y contaminantes.

Las materias primas secundarias que contienen aceite o contienen componentes solubles en agua se almacenan cubiertas. Las escorias superficiales pueden hidrolizarse, produciendo amoníaco gas. Las técnicas utilizadas para el almacenamiento, la manipulación y el pretratamiento variarán por consiguiente según el tamaño del material y el grado de contaminación. Estos factores varían de un centro a otro, y se aplicarán las técnicas reseñadas en la sección 2.4 de forma específica a cada centro y a cada material. Los aspectos específicos aplicables a este grupo son:

- Con frecuencia se utilizan etapas de pretratamiento para eliminar aceites o recubrimientos o para separar el aluminio de los óxidos. La eliminación de aceite y recubrimientos por medios térmicos, por ejemplo en un secador de virutas, es una técnica a considerar.
- Otras etapas de pretratamiento pueden también incluir granulación, medios de separación y separación magnética para eliminar la contaminación férrea. Estas son técnicas a considerar.
- El tratamiento de escorias superficiales mediante técnicas de molturación y trituración, si

se utiliza con un buen sistema de extracción de polvo y eliminación, es también una técnica a considerar. El polvo fino que se produce puede tratarse para recuperar otros metales.
- El uso de técnicas de separación neumática o de otras técnicas de separación por densidades es una técnica a considerar.
- El almacenaje y la manipulación de polvos finos de modo que se evite la emisión de polvo es una técnica a considerar.

Tabla 4.24: Métodos de almacenamiento, manipulación y pretratamiento de materiales secundarios para aluminio

Material	Almacenamiento	Manipulación	Pretratamiento	Comentarios
Fuel oil, otros aceites y brea.	Tanques o bidones en recintos aislados.	Conducciones seguras o sistema manual.	Almacenamiento y conducciones calientes.	Ventilación de retorno de los gases desplazados.
Fundentes y sal	Cerrado (Silo) si forma polvo	Transportadores cerrados con recogida de polvo.		
Polvo fino (Escorias superficiales) etc.	Cerrado si forma polvo	Cerrada con recogida de polvo.	Molturación y separación por densidades.	
Virutas	Almacén cubierto si es soluble o contiene aceite emulsionado.	Carga mecánica.	Secador de virutas. Centrifugación.	Recogida de aceite si es necesario.
Polvo grueso	Almacenes abiertos o cubiertos.	Carga mecánica.	Secador de virutas si es necesario.	Recogida de aceite si es necesario.
Terrones (materia prima o escoria)	Abierto	Carga mecánica.		Recogida de aceite si es necesario.
Elementos completos, papel de aluminio y láminas.	Almacenes abiertos o cubiertos.	Carga mecánica.		Recogida de aceite si es necesario.
Cloro gas o mezclas que contienen cloro	Recipientes a presión homologados	Métodos aprobados.		
Productos – Planchones, palanquillas, láminas y lingotes.	Almacenaje abierto.		Precalentamiento	
Residuos de proceso para recuperación, ej. escorias superficiales, escoria salina y revestimientos.	Cubierto o cerrado según la formación de polvo.	Según las condiciones.		La escoria salina y las escorias superficiales deben mantenerse secas. Sistema de drenaje apropiado.
Residuos para desecho.	Almacenes cubiertos o cerrados o bidones herméticos para transporte según el material.	Según las condiciones.		Sistema de desagüe apropiado.

4.3.2 La producción de alúmina a partir de bauxita

El proceso Bayer es la técnica estándar a considerar. Existen diversas variaciones del proceso y deben tenerse en consideración en la determinación de las MTD. Son:

- La manipulación, almacenamiento y trituración de bauxita, cal y otros materiales de forma que se minimice el polvo.
- El diseño y la operación de los digestores par minimizar el uso de energía, es decir, el uso de digestores de tubo y aceites térmicos de intercambio de calor para permitir la máxima recuperación de calor y una mayor temperatura de digestión.
- El uso de calcinadores de lecho fluidizado con precalentamiento para aprovechar el contenido de calor de los gases de escape. El uso de filtros de tejido y PSs para eliminar la alúmina y el polvo calcinados.
- Desecho del lodo rojo en áreas cerradas con la reutilización de del agua de transporte y del agua superficial de los estanques.

4.3.3 Procesos de fundición de aluminio primario

Las células electrolíticas detalladas en la sección sobre técnicas aplicadas son técnicas a considerar junto con las características siguientes, con objeto de minimizar el impacto medioambiental.

- Alimentación automática por puntos múltiples de alúmina.
- Control por ordenador del proceso electrolítico basado en bases de datos de células activas y el control de los parámetros operativos de la célula.
- Cobertura completa de la célula con campana, que está conectada a un sistema independiente de extracción de gas y de filtro.
- El uso de cubiertas de célula robustas y velocidades de extracción adecuadas teniendo en cuenta la evaporación de fluoruros y la combustión de carbono.
- Recogida de vapores de las células del 98 a > 99% a largo plazo. Si se consigue una eficacia de recogida menor, deberá considerarse la recogida y tratamiento de los gases de ventilación.
- Minimización del tiempo para cambiar los ánodos y otras acciones que requieran la extracción de las cubiertas de las células. Enfriamiento de las puntas en cabina. Uso de un sistema programado para la operación y mantenimiento de las células.
- Para células de Søderberg: Completa cobertura de la parte superior del ánodo con campana, que está conectada a un sistema independiente de extracción de gas y a un lavador de alúmina seco, o: Parte superior del ánodo seca, en combinación con pasta en el orificio del perno y un aumento en la altura del ánodo (según la eficacia que se demuestre). Quemadores bien diseñados y mantenidos para incineración de CO y HAPs de bajo peso molecular, así como de otros hidrocarburos presentes en el gas de escape del crisol.
- Lavado de fluoruro y HF de los vapores de las células con alúmina, seguido de eliminación de eliminación de polvo en un sistema de filtro de tejido, una combinación de éste con un lavador húmedo para conseguir una eliminación mínima del 99,9% del total de fluoruros. La alúmina debe reutilizarse en el proceso.
- Si se realiza la eliminación de azufre con un sistema de lavador húmedo, el sistema debe utilizarse con un sistema para eliminar fluoruros, HF y alquitranes.
- Si hay una planta de ánodos combinada, el uso de un lavador de alúmina y sistema de filtro de tejido o filtros recubiertos de carbono para eliminar los vapores de alquitrán de las etapas de molturación, mezcla y cocción. Uso de la alúmina en el proceso de electrólisis.
- El uso de métodos de limpieza de eficacia probada en la planta de fabricación de barras para recuperar fluoruros y carbono. La recogida de vapores que contengan fluoruro del proceso de limpieza y de la fusión de los componentes de acero.
- El uso de carbono con bajo contenido en azufre para los ánodos o la pasta anódica.
- El uso de sistema de gas rotatorio o de inyección de fundente para los hornos de retención.

EJEMPLO 4.01 CONTROL DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS DE LAS CELULAS

Descripción: La temperatura, el voltaje y la intensidad de corriente eléctrica son los únicos parámetros del proceso electrolítico que pueden medirse directamente. El control de proceso dentro del proceso de electrólisis se basa por consiguiente en los datos de este reducido número de parámetros. El desarrollo de microprocesadores ha posibilitado que los ordenadores modernos simulen el proceso de electrólisis calculando modelos complejos de cinética dinámica y campos magnéticos, sobre la base de la reducida información disponible. Esto produce un control de proceso mejorado y un funcionamiento más uniforme de la electrólisis. Una operación más uniforme del proceso se traduce en general en menores emisiones de fluoruros y polvo.

Principales beneficios medioambientales: La mejora en el control de proceso puede también aplicarse para reducir las emisiones de PFCs. Los efectos anódicos, que causan las emisiones de PFCs, están directamente relacionados con bajas concentraciones de alúmina. La concentración de alúmina en el electrolito no puede medirse directamente debido a la naturaleza muy agresiva de este medio. Los efecto anódicos se utilizaban por lo tanto como medio adicional para controlar la concentración de alúmina. Los efectos anódicos ocurren cuando la concentración de alúmina se encuentra por debajo del 1%, lo que permite identificar una concentración específica de alúmina. Simulando la electrólisis, los ordenadores modernos son capaces de calcular y corregir la concentración de alúmina. La corrección de la concentración de alúmina en el electrolito reduce el número de efectos anódicos. No obstante, los efectos anódicos son todavía necesarios para el ajuste periódico de la concentración de alúmina simulada. Por consiguiente, este control de proceso mejorado incorpora a menudo un sistema automático de supresión de efecto anódico. Este sistema altera automáticamente la capa gaseosa que se produce sobre el ánodo durante los efectos anódicos, utilizando aire comprimido.

Datos operativos: Las emisiones de PFCs pueden reducirse mediante un control de proceso mejorado. Por ejemplo, las células de precocción de alimentación central con alimentación de punto central pueden operarse en general con una frecuencia de efecto anódico de 0,2 a 0,5 efectos anódicos por crisol y día, lo que produce una emisión de PFCs de 0,05 a 0,1 kg por tonelada de aluminio. Cuando se aplican ordenadores modernos para el control de proceso, el número de efectos anódicos puede reducirse más hasta una frecuencia inferior a 0,1 efectos anódicos por crisol por día. Esto reduce las emisiones de PFCs a menos de 0,03 kg por tonelada de aluminio.

Efectos sobre otros medios: La mejora del control de proceso tiene como consecuencia una reducción del consumo de electricidad. La conversión a alimentación por puntos va asociada con mayores emisiones de fluoruros en lo gases de la célula e influye sobre el tamaño del sistema de lavado seco del gas de la célula.

Economía: Conversión de las plantas convencionales de Søderberg o CWPB a alimentación por puntos con controles de proceso ~ 100 a 250 por tonelada de capacidad anual.

Aplicabilidad: Todas las plantas de Søderberg y CWPB tienen control por ordenador, pero hay diferencias en la tecnología de control y la filosofía operativa. Existen oportunidades para su optimización.

Plantas de referencia: Noruega, Francia, Holanda.

Bibliografía: [tm 100, Nl Al 1998].

EJEMPLO 4.02 USO DE LAVADO SECO EN ALUMINIO PRIMARIO

Descripción: El lavado en seco se basa en la recuperación de fluoruros mediante la absorción sobre la alúmina utilizada como agente de lavado. La alúmina fresca se introduce en una etapa de reactor junto con el aire de proceso de la electrólisis. La mayor parte de la adsorción de los fluoruros

gasesosos (HF) sobre la alúmina se produce en esta etapa de reactor. La mezcla del aire de proceso con la alúmina pasa luego a un sistema de eliminación de polvo en el que la alúmina enriquecida con fluoruro es separada del aire de proceso. En general, se utilizan filtros de bolsa para la eliminación de polvo. En estos filtros de bolsa se consigue una adsorción adicional gracias al aglomerado que se acumula en los filtros. La alúmina eliminada del aire de proceso se utiliza para alimentación de alúmina para la electrólisis (la denominada "alimentación secundaria de alúmina").

La finalidad principal del sistema de lavado húmedo es eliminar los fluoruros y el polvo del aire de proceso. También se producirá una adsorción adicional de SO_2 en la alúmina. Este SO_2 es devuelto a la electrólisis por la alimentación secundaria de alúmina. Este SO_2 capturado por la alúmina será por consiguiente emitido totalmente por el proceso de electrólisis al calentar la alúmina. Así pues, la emisión de SO_2 no se ve reducida por el sistema de lavado.

Principales beneficios medioambientales: El sistema de lavado húmedo asegura eficacias de eliminación muy elevadas, superiores al 99,9% para los fluoruros totales. La eficacia de limpieza exacta depende del diseño del equipo, de las propiedades de la alúmina y de la flexibilidad y mantenimiento de la planta. Las instalaciones de lavado más eficaces, que operan con alúmina con una elevada superficie específica así como reciclaje de la alúmina varias veces al reactor, consiguen eficacias superiores al 99,9% para los fluoruros totales.

Datos operativos: Un sistema de lavado seco puede conseguir niveles de emisión de:

Fluoruros gaseosos (HF):	0,03 a 0,2 kg por tonelada de aluminio;
Fluoruros totales:	0,05 a 0,3 kg por tonelada de aluminio;
Polvo:	0,2 a 0,5 kg por tonelada de aluminio.

Efectos sobre otros medios: El lavado seco requiere un considerable consumo de energía, de unos 350 kWh por tonelada de aluminio. No se han identificado otros efectos sobre otros medios en la bibliografía disponible.

Economía: Se ha determinado que unos costes de inversión de 5 millones de € mejoran la eficacia de limpieza de un sistema de lavado en seco existente con eliminación de polvo. Sobre la base de datos de plantas anónimas, los costes de inversión de sistemas de lavado en seco nuevos con eliminación de polvo van desde 10 millones a 50 millones de €. Se han determinado uno costes operativos de 5 a 15 € por tonelada de aluminio en plantas anónimas.

Aplicabilidad: La mayoría de instalaciones.

Plantas de referencia: La gran mayoría de plantas de aluminio utilizan lavado seco con alúmina y eliminación suplementaria de polvo mediante filtros de bolsa para controlar sus emisiones. En algunas situaciones se utilizan precipitadores electrostáticos para la eliminación de polvo.

Bibliografía: - [tm 100, NL Al 1998].

EJEMPLO 4.03 USO DE LAVADO HUMEDO EN LA PRODUCCION PRIMARIA DE ALUMINIO

Descripción: Las emisiones causadas por la electrólisis pueden eliminarse mediante lavado húmedo. El lavado húmedo se aplica en general como eliminación suplementaria al lavado seco. El lavado húmedo suplementario se aplica principalmente para la eliminación de SO_2, pero también reduce las emisiones de fluoruros y, en menor medida, de polvo. El lavado húmedo puede aplicarse a los gases de las células electrolíticas y a los gases de ventilación de la sala de crisoles.

El proceso de lavado húmedo se basa en el principio de que los contaminantes son absorbidos y convertidos por el medio de lavado. Pueden aplicarse varios agentes limpiadores como medio de lavado. Dentro de la industria del aluminio, con frecuencia se utiliza agua de mar así como aplicaciones individuales de hidróxido sódico (NaOH) o carbonato sódico (Na_2CO_3).

El SO_2 es convertido en sulfatos acuosos por estos medios. Otra posibilidad es convertir el SO_2 en yeso, utilizando agentes de lavado que contengan cal, como cal hidratada, caliza o mezclas de hidróxido cálcico y magnésico.

El medio de lavado debe renovarse, y el medio utilizado debe evacuarse para permitir una absorción y conversión continua.

Principales beneficios medioambientales: La eliminación de SO_2 y otros gases ácidos para reducir el impacto local, regional y de largo alcance de dichos gases.

Datos operativos: Se ha determinado una eficacia de eliminación de SO_2 entre un 80 y más de un 90%. La emisiones de SO_2 pueden reducirse a concentraciones de 25 a 50 mg/Nm^3 y cargas de 0,6 a 4 kg de SO_2 por tonelada de aluminio. Además, el lavado húmedo suplementario produce una emisión reducida de fluoruros y polvo. Se han determinado niveles de emisión para fluoruros totales (gaseosos y partículas) de 0,02 a 0,2 kg por tonelada de aluminio cuando se aplica lavado húmedo como eliminación suplementaria. En estas situaciones, las emisiones de polvo se redujeron a 0,1 - 0,3 kg por tonelada de aluminio.

Efectos sobre otros medios: Todos los sistemas de lavado húmedo requieren que los contaminantes absorbidos y convertidos sean evacuados del sistema. Las evacuaciones pueden producirse en forma de agua residual (agua de mar), residuos líquidos (NaOH u Na_2CO_3) o en forma de yeso.

a) Agua de mar: El efluente de los lavadores con agua de mar (20 a 300 m^3 por tonelada de aluminio) en una planta de aluminio es ligeramente ácido y contiene fluoruros, sulfitos/sulfatos, materias en suspensión y trazas de contaminación (ej. níquel), y es deficiente en oxígeno. Por lo tanto, las plantas que utilizan agua de mar tienen normalmente instalaciones para la eliminación de materias en forma de partículas para cumplir con la legislación nacional para la evacuación de este agua residual al mar. El tratamiento del agua residual incluye normalmente floculación y sedimentación. El tratamiento del agua residual produce un lodo que debe desecharse. El agua de mar empleada en los lavadores húmedos puede también tratarse con biocidas, que también se desechan en el mar. El lavado con agua de mar requiere un consumo adicional de energía de unos 150 kWh por tonelada de aluminio.

b) NaOH: Los lavadores que operan con NaOH requieren la evacuación de un efluente concentrado (alrededor de 1 m^3 por tonelada de aluminio). Los contaminantes de este efluente pueden compararse a los contaminantes del agua de mar evacuada, pero ocurren en concentraciones mayores. No obstante, el efecto sobre el entorno acuático permanece.

Economía: Se han realizado estimaciones de costes para el lavado húmedo suplementario del aire de proceso. Las estimaciones de costes se presentan para sistemas de lavado operados con agua de mar, así como con NaOH.

a) Agua de mar: Los costes de inversión determinados están entre 9 y 39 millones de €. Sobre la base de la capacidad de producción anual, los costes de inversión están entre 75 y 250 € por tonelada de capacidad.

Los costes anuales totales determinados están entre 2,6 y 7,5 millones de €. Sobre la base de la capacidad de producción anual, los costes de inversión están entre 40 y 70 € por tonelada de aluminio.

b) NaOH: Los costes de inversión determinados están entre 12 y 40 millones de €. Sobre la base de la capacidad de producción anual, los costes de inversión están entre 100 y 250 € por tonelada de capacidad.

Los costes anuales totales determinados están entre 4 y 7 millones de €. Sobre la base de la

capacidad de producción anual, los costes de inversión están entre 100 y 200 € por tonelada de aluminio.

Aplicabilidad: Esta técnica es aplicable cuando las concentraciones de dióxido de azufre en el aire superan los estándares de Calidad Atmosférica de largo alcance, locales o regionales. También pueden aplicarse técnicas de lavado similares para eliminar fluoruros, dióxido de azufre y HAPs del aire de ventilación de la sala de crisoles de algunas plantas de SWPB y Søderberg. Los costes de inversión y costes operativos son distintos en este caso.

Plantas de referencia: En Europa, el lavado húmedo del aire e proceso e la electrólisis sólo se aplica en Escandinavia. Todas las plantas en Noruega y Suecia disponen de lavado húmedo. Algunas de las plantas de Søderberg tienen también instalación de lavado del aire de la sala de crisoles. Estos lavadores húmedos están en funcionamiento principalmente en plantas de aluminio situadas junto al mar, que utilizan agua de mar como medio de lavado. Además, se ha observado una planta en Noruega que utiliza NaOH como medio de lavado, mientras que en EE.UU. se ha encontrado una planta que utiliza Na_2CO_3.

Bibliografía: - [tm 100, NL Al 1998].

4.3.4 Hornos de fundición secundarios

Varias de las técnicas descritas en las secciones 2.7 y 2.8 son aplicables a la extracción y eliminación de vapores, así como a los sistemas de control de proceso utilizados por estos hornos. Estas técnicas no son utilizadas de forma rutinaria por todas las instalaciones en el momento presente. Los hornos que se describen como técnicas disponibles son las técnicas a considerar en la determinación de las MTD. Las siguientes características son técnicas a considerar en al determinación de las MTD de los hornos.

- Selección del material de alimentación para adaptarlo al tipo de horno y de eliminación y para transferir las materias primas inadecuadas a otras instalaciones que utilicen equipos diseñados para las mismas de modo que sea posible:
  a. Evitar el uso de sal cuando sea práctico y consistente para conseguir el máximo rendimiento práctico;
  b. Minimizar el uso de sal en otros casos;
  c. Recuperar el máximo posible de subproductos, como la recuperación de la escoria salina que se produzca.

  El objetivo es evitar los desechos en vertedero. Si se utiliza el vertedero, se requiere un sistema sellado y contenido [tm 206, TGI 1999].

- El uso de un carro de carga cerrado o sistema similar cerrado si es posible.
- El uso de quemadores de oxicombustible cuando sus ventajas energéticas y medioambientales estén establecidas.
- El uso de cabinas, campanas y sistemas programados de extracción de vapores para recoger las emisiones fugitivas cuando resulte práctico.
- La eliminación del aceite y compuestos orgánicos mediante secado de virutas, centrifugado u otro método de eliminación de recubrimientos antes de la etapa de fundición o fusión, a menos que el horno y el sistema de eliminación estén específicamente diseñados para aceptar el contenido orgánico.
- El uso de hornos de inducción sin núcleo para cantidades relativamente pequeñas de metal limpio.
- El uso de sistemas de postcombustión cuando sea necesario para eliminar los compuestos orgánicos, incluidas dioxinas.
- Inyección de carbón activado junto con cal para reducir los gases ácidos y los compuestos orgánicos, incluidas dioxinas.

Tabla 4.25: Resumen de los hornos de fundición secundarios

Tipo de horno	Variaciones	Principal aplicación	Ventajas	Desventajas	Recogida de gas	Comentarios
Reverbero	Estándar	Fusión de grandes volúmenes de chatarra limpia y material primario.	• Gran capacidad de metal(100t). • Pocas restricciones de tamaño del material de alimentación. • Bajo uso de escoria salina.	• Baja eficacia térmica • Tipos de material restringidos	Semicerrado	• Elevados rendimientos debido a la calidad del material de alimentación • A veces se usan bombas de metal fundido
	Pozo lateral	Idem anterior, pero permite recuperación eficaz de algunos materiales.	• Gran capacidad de metal. • Amplia gama de material posible. • Normalmente sin escoria salina.	• Baja eficacia térmica	Semicerrado	• Elevados rendimientos posibles según la calidad del material de alimentación • A veces se usan bombas de metal fundido
	Solera inclinada	Separación del aluminio de la contaminación de mayor punto de fusión (ej. hierro/acero).	• Muy eficaz para eliminar los contaminantes de elevado punto de fusión.	• Baja eficacia térmica	Semicerrado	• A veces se incorpora en otros tipos de horno. • El rendimiento depende del nivel de contaminación.
Rotatorio	Eje fijo	Reciclaje de una amplia gama de materiales de alimentación.	• Sin restricciones de material • Buena eficacia térmica • Eficacia de desmagnesiado • No se producen escorias superficiales • Grandes volúmenes posibles (> 65t)	• Uso relativamente elevado de fundente salino. • El tamaño del material puede estar restringido.	Semicerrado	• Las escorias salinas resultantes pueden reprocesarse.
	Basculante	Idem anterior.	• Idem anterior, pero menor uso de fundente salino y menor capacidad.	• El tamaño del material puede estar restringido.	Semicerrado	• Tiende a usarse para calidades de chatarra más bajas.
Inducción	Sin núcleo	Fusión de chatarra limpia o material primario.	• Elevado rendimiento. • No hay gases de combustión. • No se requiere fundente salino. • Uso flexible (posible proceso en discontinuo o en continuo)	• Carga relativamente pequeña (< 10t) • Tipo de material restringido. • El tamaño del material puede estar restringido.	Abierta, con campanas	
	Canal	Idem anterior.	• Elevado rendimiento. • No hay gases de combustión. • No se requiere fundente salino.	• Idem anterior, pero puede tener mayores capacidades (~20 - 25t)	Semicerrado	
Horno de cuba		Fusión de lingotes limpios y de chatarras de proceso en fundiciones.	• Mejor eficacia térmica	• Tipo de material restringido. • El tamaño del material puede estar restringido.	Semicerrado	• Se utiliza en el proceso Meltower.

- Uso de recuperación de calor si es practicable.
- El uso de tecnología de filtración adecuada, como filtros de tejido o cerámicos.

El uso de bombeo sistemas de carga cerrados con bombeo de metal y control inteligente de recogida de vapores debe tenerse en consideración para los procesos existentes según el tipo de horno. La siguiente tabla ofrece un resumen de las ventajas y desventajas de los hornos de fundición y fusión secundaria.

Los siguientes ejemplos muestran como el uso de fundente salino puede eliminarse virtualmente, o reducirse en cantidad y recuperarse posteriormente. Cada opción debe ser considerada en línea con la tecnología de proceso empleada. Cada uno de estas opciones tiene sus propias ventajas y desventajas inherentes, como las restricciones en el material de alimentación o en los volúmenes de metal, que también deben tenerse en consideración.

EJEMPLO 4.04 USO DE SISTEMA DE BOMBEO DE METAL

Descripción: Horno de reverbero con pozo lateral, pozo de carga y sistema de bombeo de metal.

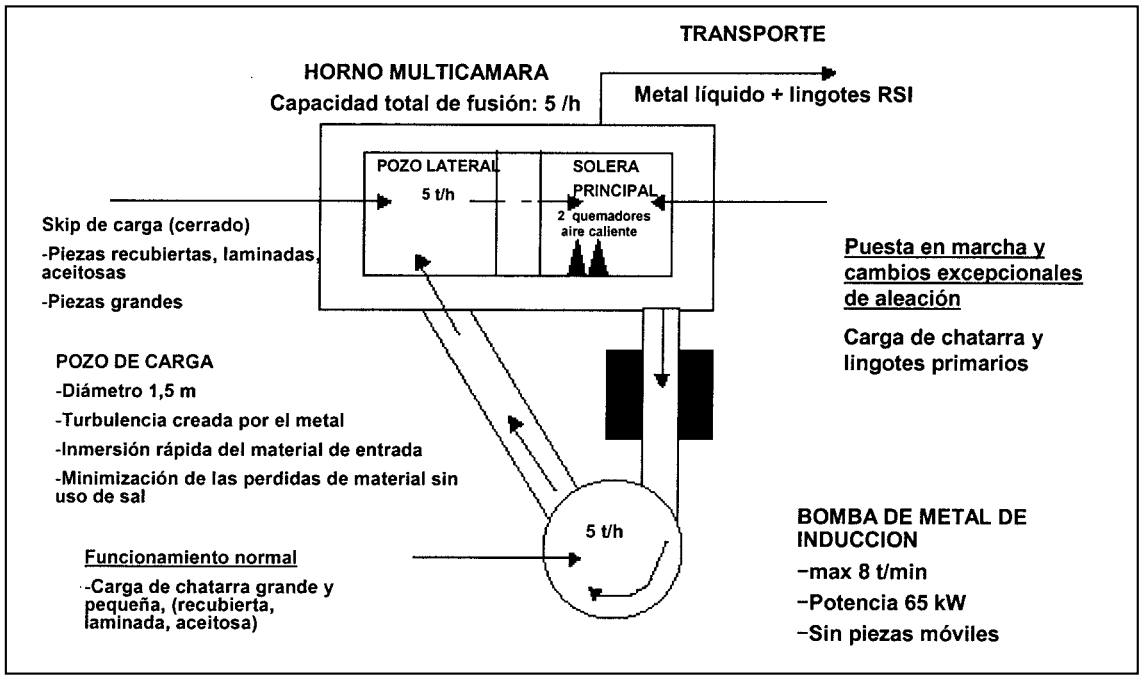


Figura 4.6: Ejemplo de bombeo de metal.

Principales beneficios medioambientales: Posible eliminación de fundente salino. Mayor gama de materias primas que los hornos de reverbero simples, mejor captura de los gases del horno.

Datos operativos: Mejora en el rendimiento del metal de 83 al 88%, reducción de los costes energéticos.

Efectos sobre otros medios: Reducción de la cantidad de residuos producidos que requieren tratamiento. Reducción asociada del consumo energético y de las emisiones del horno.

Economía: Coste (1997) de un horno de 30 toneladas y de un Sistema de Bombeo

Electromagnético 1800000 £ (2,73 millones de €), ahorro de costes estimado (energía, mejora en el rendimiento, ahorro en fundente y en tratamiento) 832000 £ (1,26 millones de €) al año. Amortización 2,2 años.

Coste del sistema de bombeo y pozo de carga ~ 300000 £ (456000 €).

Aplicabilidad: Hornos de reverbero nuevos y modernizados. No puede usarse para procesos en discontinuo. También son aplicables otros métodos de bombeo.

Plantas de referencia: Los sistemas de bombeo se utilizan ampliamente en Europa.

Bibliografía: - [tm 123, ETSU 1998]. [tm 122, McLelan 1998].

EJEMPLO 4.05 MINIMIZACION DEL FUNDENTE SALINO

Descripción: Minimización del fundente salino mediante el uso de un horno rotatorio basculante.

Principales beneficios medioambientales: Reducción en la cantidad de escoria salina producida desde 1,8 a < 0,5 kg de sal por kg de contenido no metálico.

Datos operativos: Reducción del factor de uso de sal desde 1 – 1,8 hasta < 0,5.

Efectos sobre otros medios: Reducción de la cantidad de residuos producidos que requieren tratamiento. Reducción asociada en el consumo de energía y las emisiones del proceso de tratamiento.

Economía: Se desconoce. Coste del horno menos los ahorros de costes de compra y tratamiento de sal. 4 plantas operan viablemente.

Aplicabilidad: Hornos nuevos y modernizados. Hay restricciones de tamaño. No aplicable a todos los materiales de entrada.

Plantas de referencia: Hay plantas en funcionamiento en EE.UU., Alemania y el Reino Unido.

Bibliografía: [tm 145, Winter 1998].

EJEMPLO 4.06 MINIMIZACIÓN DEL FUNDENTE SALINO

Descripción: Minimización de la cantidad de residuos generados por el pretratamiento de las escorias superficiales. Las escorias superficiales se molturan y criban para separar la fracción principal de aluminio del óxido. La fracción de aluminio se recupera en un horno rotatorio, pero el pretratamiento reduce la cantidad de fundición, así como la cantidad de sal necesaria.

Principales beneficios medioambientales: Reducción en la cantidad de residuos producidos, desde 118 kg por 100 kg a 66 kg por 100 kg de escorias superficiales recuperadas.

Datos operativos: 100 kg de escorias superficiales sin tratar utilizan ~ 72 kg de sal para fundición y producen 45 kg de aluminio y 118 kg de residuo de escoria salina. Residuo total: ~ 118 kg.

100 kg de escorias superficiales, tras el pretratamiento mediante molturación y criba, producen 70 kg de granos de aluminio, 12,5 kg de polvo para tratamiento, 12,5 kg de material

reutilizable y 5 kg de hierro. Los 70 kg de granos de aluminio utilizan 32,5 kg de sal para fundición y producen 45 kg de aluminio y ~ 54 kg de residuo de escoria salina. Residuo total ~ 66 kg.

Efectos sobre otros medios: La reducción de escoria salina reduce las emisiones de cloruros, depende menos del tratamiento o desecho de escoria salina. Reducción asociada en el consumo energético y las emisiones del proceso de tratamiento debido a la menor carga para el horno.

Economía: Se desconoce: Coste de molturación y criba menos los ahorros de costes de tratamiento o desecho. Muchas plantas funcionan viablemente.

Aplicabilidad: La mayoría de escorias superficiales con un alto contenido de óxido.

Plantas de referencia: - Plantas en uso en España, Italia, Alemania y Reino Unido.

Bibliografía: - IDALSA 1999.

EJEMPLO 4.07 RECUPERACIÓN DE ESCORIA SALINA

Descripción: Recuperación de escoria salina para recuperar las porciones de aluminio, sal y óxido. Se trituran grandes bloques de escoria salina a un tamaño manejable y se recuperan gránulos de aluminio mediante criba (normalmente hasta un 10%). El material finamente triturado se disuelve luego en agua de forma que los cloruros pasen a la solución, produciendo salmuera, dejando el óxido de aluminio insoluble y las partículas metálicas finas de aluminio, que no son normalmente recuperables de forma económica como metal. Hay algunas variaciones en los procesos utilizados, algunos utilizan agua fría y luego concentran la salmuera para cristalización, mientras que otras utilizan agua caliente.

En la etapa de disolución del proceso se desprenden gases, que contienen principalmente amoníaco, metano, hidrógeno y fosfina. Es posible utilizar estos gases como combustible para otras partes del proceso [tm 116, ALFED 1998]. La salmuera se filtra, eliminando los óxidos insolubles, y la solución es luego enviada para cristalización, de la que pueden recuperarse los cloruros originales de sodio y potasio, que se reutilizan como fundente en los hornos de fusión. Los óxidos contienen óxidos de Ca, Mg, Al con cloruros, fluoruros, sulfatos y nitratos como aniones. El óxido lavado se ha utilizado en la industria del cemento. El polvo de combustión que se deriva del tratamiento de los gases de los hornos secundarios utilizando bicarbonato sódico se recuperan en el proceso de recuperación de sal en Austria y España.

Principales beneficios medioambientales: Reducción de los desechos en vertedero, recuperación de sal para su reutilización, posible reducción de alúmina para uso en otras industrias, recuperación de la porción de aluminio [tm 206, TGI 1999].

Datos operativos: No disponibles.

Efectos sobre otros medios: Reducción de la cantidad de residuos producidos que precisan desecho. Posible emisiones de fosfina a la atmósfera si no se utiliza postcombustión. Las operaciones de trituración pueden producir mucho polvo, y las observaciones muestran que pueden tener un elevado impacto medioambiental debido a las emisiones fugitivas.

Economía: Se desconoce: Coste del equipo de proceso. Varias plantas operan viablemente, y los costes de tratamiento son similares a los costes de desecho pero evitan “responsabilidades futuras”.

Aplicabilidad: Todos los procesos que emplean fundente salino.

Plantas de referencia: Alemania, España, Francia, Italia y el Reino Unido.

Bibliografía: - [tm 116, ALFED 1998]; [tm 145, Winter 1998].

EJEMPLO 4.08 USO DE UN CARRO DE CARGA HERMETICO

Descripción: Se utiliza un carro de carga o vagoneta para transferir la chatarra al horno de reverbero. El sistema está dimensionado de modo que el vagoneta se acople de forma hermética a la puerta abierta del horno durante la descarga de chatarra, con los que se mantiene la hermeticidad del horno durante este periodo.

Principales beneficios medioambientales: Prevención de las emisiones fugitivas durante la carga de chatarra.

Datos operativos: No disponibles, pero las observaciones confirman la eficacia del sistema.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo por la prevención de emisiones de humos y vapores.

Economía: No disponible, aunque se cree que el coste es bajo para un vagoneta de carga del tamaño adecuado.

Aplicabilidad: Potencial para algunos hornos no rotatorios.

Plantas de referencia: El sistema se utiliza en Bélgica.

Bibliografía: - [tm 121, Hoogovens 1998].

EJEMPLO 4.09 USO DE RECOGIDA DE VAPORES FOCALIZADA

Descripción: Un sistema de recogida de vapores puede estar diseñado de modo que la capacidad del ventilador de recogida pueda dirigirse a las fuentes de vapores, que cambian a lo largo de un ciclo de carga, fusión y sangrado. La focalización de la capacidad de recogida de vapores puede conseguirse utilizando amortiguadores controlados automáticamente que están vinculados a los controles del horno, como apertura de la puerta, estado de los quemadores o inclinación del horno. Los amortiguadores pueden por lo tanto activarse durante las operaciones de carga, fundición y sangrado y focalizar el esfuerzo de recogida según convenga en cada momento.

Principales beneficios medioambientales: Prevención y minimización de las emisiones fugitivas a la atmósfera.

Datos operativos: No disponibles, pero las observaciones indican que estos sistemas son muy eficaces si están bien diseñados y controlados.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo. Prevención de las emisiones fugitivas y optimización del consumo de energía de los ventiladores.

Economía: No disponible. Coste relativamente bajo del sistema de control y amortiguadores.

Aplicabilidad: La mayoría de instalaciones.

Plantas de referencia: - Reino Unido, Francia.

Bibliografía: - [tm 106, Farrell 1998].

EJEMPLO 4.10 RECOGIDA DE VAPORES

Descripción: Recinto de recogida de humo en las zonas de carga y sangrado para un horno rotatorio, con el fin de permitir el uso de un único punto de extracción.

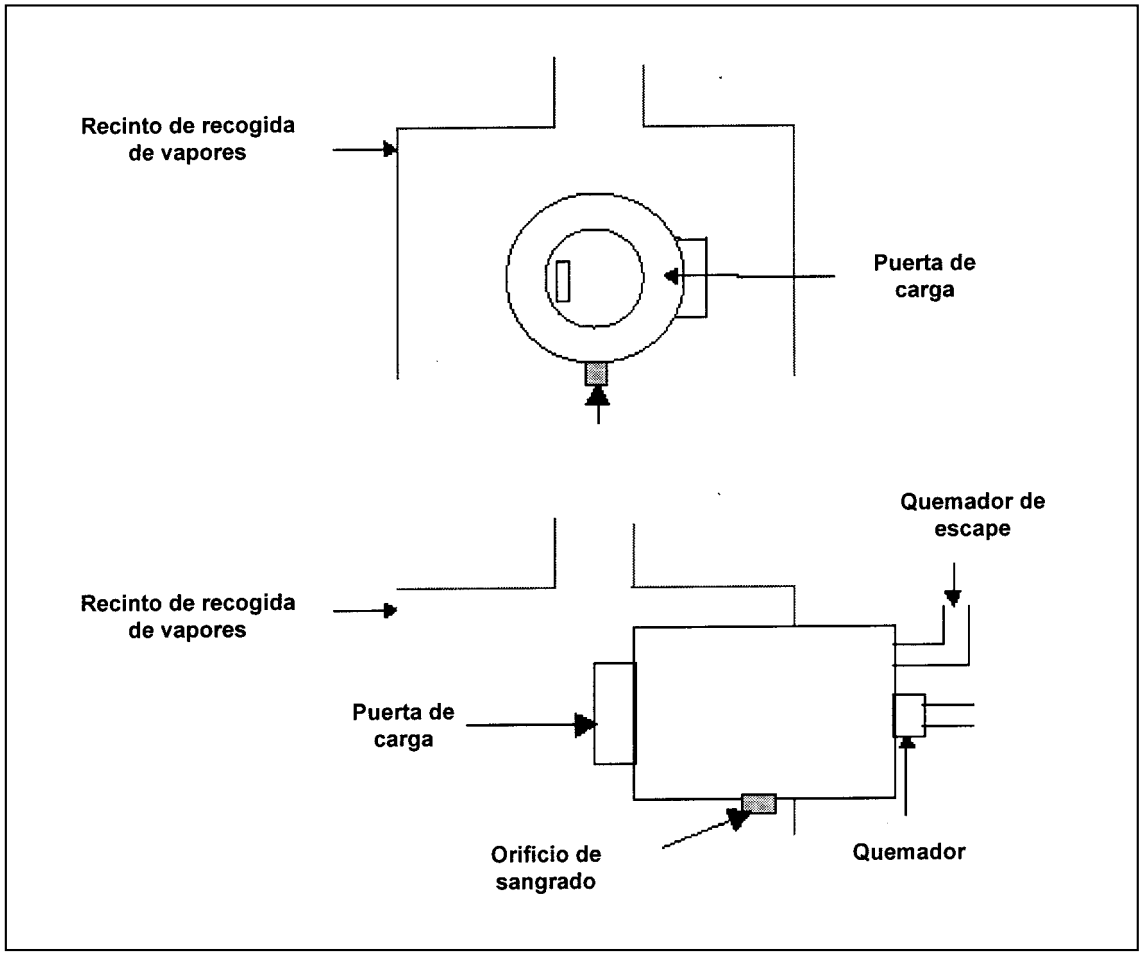


Figura 4.7: Esquema de un sistema integral de recogida de vapores.

En aplicaciones para la producción de otros metales, se han aplicado tomas de sangrado en la puerta de carga para permitir un recinto más compacto. El desgaste del revestimiento del horno puede hacer que los orificios de sangrado del lado de la puerta no permitan sangrar todo el metal.

Principales beneficios medioambientales: Recogida de vapores más fácil y eficaz desde un solo punto.

Datos operativos: No disponibles, pero la observación indica una captura de vapores eficaz.

Efectos sobre otros medios: Efecto positivo. Buena eficacia de recogida con consumo energético reducido.

Economía: Bajo coste de modificación. En uso viablemente en varias instalaciones.

Aplicabilidad: Todos los hornos rotatorios.

Plantas de referencia: Francia, Reino Unido

Bibliografía: - [tm 106, Farrell, 1998].

4.3.5 Procesos de refinado

- El uso de de cloro mezclado con argón o nitrógeno como reactivo de desgasado o de desmagnesiado, o el uso de fluoruro de aluminio, KF o Na_3AlF_6. La recogida y tratamiento de los gases resultantes para eliminar los gases ácidos si es necesario.
- El uso de células de flujo en línea para adiciones de gas al material fundido si resulta práctico.
- El uso de filtros de metal cerámicos en línea para eliminar las partículas sólidas del material fundido.

Los procesos y las técnicas de refinado son adecuados para uso con instalaciones nuevas y existentes.

4.3.6 Procesos de moldeo

Los procesos detallados en la sección sobre técnicas aplicadas son técnicas a considerar en conjunción con una extracción eficaz de vapores de las artesas y moldeadores cuando se requiere. El potencial de formación de dioxinas durante los procesos de refinado para la producción primaria y secundaria de aluminio no ha sido plenamente investigado, se recomienda la cuantificación de este aspecto.

Los procesos y técnicas de recogida de vapores son adecuados para uso con instalaciones nuevas y existentes.

4.3.7 Escorias superficiales

Los procesos detallados en la sección sobre técnicas aplicadas son técnicas a considerar en conjunción con las siguientes características con objeto de minimizar el impacto medioambiental:

- Enfriamiento de las escorias superficiales en recipientes cerrados con gas inerte.
- Prevención de la humidificación de las escorias superficiales.
- Tratamiento y recuperación de las escorias superficiales si resulta práctico.
- Minimización del material a desechar en vertedero.

Las técnicas de almacenamiento y recogida son adecuadas para uso con instalaciones nuevas y existentes.

4.3.8 Producción integrada de ánodos

El uso de los procesos descritos en el Capítulo 12 son técnicas a considerar. El uso de un sistema de lavador de alúmina y filtro de tejido para el tratamiento de los gases de la célula puede aplicarse para los gases de la producción de ánodos. Puede usarse un filtro de coque para las etapas de mezcla y conformado.

4.3.9 Recogida y eliminación de vapores/gases

4.3.9.1 Aluminio primario

Las técnicas discutidas anteriormente en este capítulo para hermetizar las células y mantener la eficacia de recogida son técnicas a considerar para la recogida de vapores de las células involucradas

en la producción de aluminio primario. El uso de un lavador seco seguido de un filtro de tejido para eliminar fluoruros es una técnica a considerar. La recogida del aire de ventilación de las salas de células si es necesario es también una técnica a considerar. El uso de campanas secundarias es asimismo una técnica a considerar para la carga de los hornos de moldeo.

El uso de lavadores con agua de mar o cáusticos para eliminar el dióxido de azufre puede considerarse para la reducción de las emisiones totales de SO_2. El efecto sobre los requisitos de agua puede ser objeto de consideración a nivel local.

4.3.9.2 Aluminio secundario

Las técnicas discutidas en la sección 2.7 y 2.8 de este documento para la hermetización de hornos, recogida de vapores y eliminación de polvo, gases ácidos y dioxinas son técnicas a considerar para las diversas etapas de proceso involucradas en la producción de aluminio secundario. El uso de campanas secundarias es también una técnica a considerar para las etapas de transferencia y moldeo.

Has varios aspectos específicos de cada centro aplicable, y algunos de ellos se han discutido anteriormente en este capítulo. Esencialmente, las tecnologías de proceso discutidas en este capítulo, en combinación con una eliminación adecuada, cumple las demandas de una estricta protección medioambiental.

4.3.10 Control de proceso

Los principios del control de proceso discutidos en la sección 2.6 son aplicables a los procesos de producción utilizados en este Grupo. Algunos de los procesos son susceptibles de mejora mediante la adopción de muchas de estas técnicas. El control de las condiciones operativas de las células y el uso de bases de datos comparativos para anticipar los trastornos en el proceso como los efectos anódicos y para controlar las adiciones en puntos de alúmina deben considerarse para todos los procesos.

4.3.11 Agua residual

Se trata de un aspecto específico de cada centro, los sistemas de tratamiento existentes se indica que son de un alto estándar. Toda el agua residual debe ser tratada para eliminar los sólidos y aceites/alquitranes, y los gases ácidos absorbidos (ej. dióxido de azufre, HCl) deben ser neutralizados si es necesario. Las técnicas detalladas en la sección 2.9 son técnicas a considerar. En una serie de instalaciones, el agua de refrigeración y las aguas residuales tratadas, incluida el agua de lluvia, son reutilizadas o recicladas dentro de los procesos.

4.3.12 Residuos de proceso

Los principios de minimización y reutilización de los residuos de proceso son técnicas a considerar.

4.3.12.1 Aluminio primario

Las escorias superficiales pueden reciclarse, y los revestimientos de los crisoles pueden reutilizarse.

EJEMPLO 4.11 USOS DE REVESTIMIENTOS DE CRISOL CONSUMIDOS

Descripción: Uso del contenido de carbono de los RCC en procesos térmicos.

Principales beneficios medioambientales: Uso del contenido de carbono, uso del AlF residual como fundente. Destrucción del contenido de CN.

Datos operativos: Detalles no disponibles, pero ha habido aplicaciones con éxito en la cocción de cemento, como carburante en la producción de acero y como sustituto del coque en la producción de lana de roca.

Efectos sobre otros medios: Efectos positivos. Uso del contenido energético de los RCC. Eliminación de los desechos en vertedero. Se evita el aporte de energía y las emisiones asociadas si los RCC se tratan térmicamente.

Economía: No produce ingresos netos pero se evitan gastos de tratamiento o de desecho.

Aplicabilidad: Todos los RCC siempre que los reglamentos de Transferencia de Desechos lo permitan.

Plantas de referencia: - Francia, Noruega

Bibliografía: [tm 106, Farrell 1998].

4.3.12.2 Aluminio secundario

Los revestimientos de hornos y polvos de filtros pueden reutilizarse en determinados procesos, el uso de bicarbonato sódico como medio de lavado puede permitir enviar el polvo de filtro resultante a un sistema de recuperación de escoria salina. Hay disponibles técnicas de recuperación de escoria salina para recuperar sal, aluminio y óxido de aluminio. Las escorias superficiales pueden ser reutilizadas en procesos apropiados. Anteriormente se han indicado ejemplos en este capítulo.

4.4 Mejores Técnicas Disponibles

Para la comprensión de esta sección y de su contenido, se llama la atención del lector al prefacio de este documento, y en particular a la sección quinta del prefacio: “Cómo entender y utilizar el presente documento”. Las técnicas y niveles asociados de emisiones y/o consumos, o rangos de niveles, presentados en esta sección han sido determinados mediante un proceso iterativo que comporta los siguientes pasos:

- Identificación de los aspectos medioambientales claves del sector.
- Examen de las técnicas más relevantes para tratar estos aspectos clave.
- Identificación de los mejores niveles de comportamiento medioambiental, sobre la base de los datos disponibles en la Unión Europea y en todo el mundo.
- Examen de las condiciones en las que se consiguen estos niveles de comportamiento, como costes, efectos sobre otros medios o razones principales de la puesta en práctica de estas técnicas.
- Selección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y de los niveles asociados de emisión y/o consumo para este sector en un sentido general, todo ello de acuerdo con el Artículo 2(11) y el Anexo IV de la Directiva.

La evaluación experta por parte de la Oficina Europea de IPPC y el Grupo Técnico de Trabajo (TWG) ha desempeñado un papel clave en cada uno de estos pasos y el modo en que aquí se presenta la información.

Sobre la base de estas técnicas de evaluación, y en la medida de lo posible, en este capítulo se presentan niveles de emisiones y consumos, asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles, que se consideran apropiados para el sector en su conjunto y en muchos casos reflejan el funcionamiento real de algunas instalaciones del sector. Cuando se presentan niveles de emisiones o consumos "asociados con las mejores técnicas disponibles", debe entenderse que ello significa que tales niveles representan el comportamiento medioambiental que podría preverse como resultado de la aplicación, en este sector, de las técnicas descritas, teniendo en cuenta el equilibrio de costes y ventajas inherente a la definición de las MTD. No obstante, no son valores límite de consumo o emisión ni deben entenderse como tales. En algunos casos puede ser técnicamente posible conseguir mejores niveles de emisiones o consumos, pero debido a los costes involucrados o por la consideración de efectos sobre otros medios, no se consideran apropiados como mejor técnica disponible para el sector en su conjunto. No obstante, tales niveles pueden ser considerados justificados en casos más específicos en los que existan motivos especiales de puesta en práctica.

Los niveles de emisiones y consumos asociados con el uso de las mejores técnicas disponibles deben ser contemplados en el contexto de las condiciones de referencia que se especifiquen (ej. periodos de promedio).

El concepto de "niveles asociados con las MTD" arriba descrito debe distinguirse del término "nivel obtenible" utilizado en otros lugares de este documento. Cuando un nivel se describe como "obtenible" usando una técnica particular o una combinación de técnicas, debe entenderse que significa que se puede esperar conseguir el nivel a lo largo de un periodo de tiempo sustancial en una instalación o proceso bien mantenido y gestionado mediante tales técnicas.

Cuando se hallan disponibles, se facilitan datos relativos a costes junto con las técnicas presentadas en el capítulo anterior. Estos dan una indicación aproximada de la magnitud de los costes involucrados. No obstante, el coste real de la aplicación de una técnica dependerá mucho de la situación específica relativa, por ejemplo, a los impuestos, tasas y características técnicas de la instalación en cuestión. No es posible evaluar con detalle estos factores específicos de cada centro de producción. En ausencia de datos relativos a costes, las conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas se extraen a partir de observaciones de las instalaciones existentes.

La intención es que las mejores técnicas disponibles generales de este capítulo sean un punto de referencia en relación al cual se juzgue el comportamiento presente de una instalación o se estudie una propuesta de una nueva instalación. De este modo servirán de ayuda en la determinación de las condiciones apropiadas "basadas en las mejores técnicas disponibles" para la instalación, o en el establecimiento de reglamentos de aplicación general conforme al Artículo 9(8). Esta previsto que las nuevas instalaciones puedan diseñarse para tener un comportamiento igual o incluso mejor que los niveles generales para las mejores técnicas disponibles aquí presentados. También se considera que las instalaciones existentes podrían moverse hacia los niveles generales para las mejores técnicas disponibles o incluso mejorarlos, con arreglo a la aplicabilidad técnica y económica de las técnicas en cada caso.

Aunque los BREFs no establecen normas de cumplimiento legal, tienen por finalidad facilitar información que sirva de referencia a la industria, los Estados miembros y el público acerca de los niveles obtenibles de emisiones y consumos al utilizar las técnicas especificadas. Los valores límite apropiados para cualquier caso específico deberán determinarse teniendo en cuenta los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales.

Las Mejores Técnicas Disponibles están influenciadas por una serie de factores de este subsector y se requiere una metodología de examen de las técnicas. El enfoque utilizado se detalla a continuación.

- En primer lugar, la elección del proceso depende en gran medida de las materias primas disponibles par un centro en particular. Los factores más significativos son la composición, la presencia de otros metales incluidos, la distribución de sus tamaños (incluido el potencial para formar polvo) y el grado de contaminación por compuestos orgánicos. Básicamente puede haber materias primas primarias disponibles de una o varias fuentes, materias primas secundarias de distinta calidad o una combinación de materias primas primarias y secundarias.

- En segundo lugar, el proceso debe ser adecuado para ser usado con los mejores sistemas de recogida y eliminación de gases disponibles. Los procesos de recogida y eliminación de vapores empleados dependerán de las características de los procesos principales, por ejemplo algunos procesos evitan las transferencias con cuchara y son por consiguiente más fáciles de cerrar. Otros procesos pueden tratar materiales reciclados con más facilidad y por consiguiente reducen el mayor impacto medioambiental evitando el desecho.

- Por último, se ha tenido en consideración los aspectos referentes al agua y los desechos, en particular la minimización de residuos para desecho y el potencial para utilizar los residuos y el agua en el mismo proceso o en otros procesos. La energía utilizada por los procesos y la eliminación es otro factor que se tiene en consideración en la elección de procesos.

La elección de la MTD en un sentido general es por lo tanto complicada y depende de los factores anteriores. Los requisitos variables significan que la MTD está influenciada principalmente por las materias primas disponibles en el centro de producción y la productividad requerida de la planta. Existen ventajas para algún proceso primario que sea capaz de aceptar algunos materiales secundarios.

Los siguientes puntos resumen la metodología recomendada utilizada en este trabajo:

- ¿Está el proceso probado y es fiable industrialmente?
- ¿Existen limitaciones en el material inicial que puede procesarse? ej.: En la fundición primaria, algunos procesos son adecuados para concentrado “limpio”, y otros para fundición de materiales complejos.
- El tipo de alimentación y otros metales contenidos en la misma (ej. Pb, Zn) influye la sección del proceso.
- ¿Hay restricciones a nivel de producción? ej.: Un nivel superior demostrado o una productividad mínima requerida para que el proceso sea económico.
- ¿Pueden aplicarse al proceso las técnicas más recientes y eficaces de recogida y eliminación?
- ¿Pueden las combinaciones de procesos y sistemas de eliminación obtener los niveles de emisiones más bajos? Las emisiones asociadas se facilitan más adelante.
- ¿Existen otros aspectos como la seguridad relacionados con los procesos?

En el momento presente, diversas combinaciones de procesos y sistemas de eliminación podían utilizarse con el máximo estándar medioambiental y cumplir los requisitos de las MTD. Los procesos varían en la productividad que puede alcanzarse y los materiales que pueden emplearse, por lo que se incluyen varias combinaciones. Todos los procesos potencial al máximo la reutilización de residuos y minimizan las emisiones al agua. La economía de los procesos varía. Algunos necesitan operar a una productividad elevada para conseguir una operación económica, mientras otros no pueden alcanzar productividades altas.

Las técnicas de recogida y eliminación utilizadas con estos procesos se trataron en el Capítulo 2 y en las técnicas a considerar en la determinación de las MTD en este capítulo, y si se aplican en combinación con el proceso metalúrgico producen un alto nivel de protección medioambiental.

Como se ha indicado en el prefacio general de este documento, esta sección propone técnicas y emisiones que se consideran compatibles con las MTD en general. La finalidad es proporcionar indicaciones generales de los niveles de emisiones y consumos que pueden considerarse como un punto de referencia apropiado de un comportamiento basado en las MTD. Esto se hace indicando los niveles alcanzables en rangos aplicables por lo general a plantas nuevas tanto nuevas como modernizadas. Las instalaciones existentes pueden tener factores, como limitaciones de espacio o altura, que impidan la plena adopción de las técnicas.

El nivel varía asimismo con el tiempo según el estado del equipo, su mantenimiento y el control de proceso de la planta de eliminación. La operación del proceso de origen influye también en el rendimiento, ya que es probable que existen variaciones en la temperatura, el volumen de gas e incluso en las características del material a lo largo de un proceso o carga. Las emisiones alcanzables son por lo tanto sólo una base a partir de la cual puede juzgarse el comportamiento real de la planta. La dinámica del proceso y otros aspectos específicos del centro deben tenerse en consideración a nivel local. Los ejemplos dados en la sección sobre técnicas a considerar en la determinación de las MTD indican las concentraciones asociadas con algunos procesos existentes [tm 137 Cu Expert Group 1998].

4.4.1 Manipulación y almacenamiento de materiales

Las conclusiones extraídas para las Mejores Técnicas Disponibles para las etapas de manipulación y almacenamiento de materiales se detallan en la sección 2.17 de este documento, y son aplicables a los materiales de este capítulo. Estas técnicas son:

- El uso de sistemas de almacenamiento de líquidos que los contenga en recintos impermeables y con capacidad para contener al menos el volumen del tanque de almacenamiento más grande del recinto. Existen diversos reglamentos dentro de cada unos de los Estados miembros, que deben cumplirse según proceda. Las zonas de almacenamiento deben estar diseñadas de modo que las fugas de las partes superiores de los tanques y de los sistemas de suministro queden recogidas y contenidas dentro del recinto. El contenido del tanque debe indicarse y deben utilizarse las alarmas asociadas. El uso de suministro planificados y de sistemas de control automático para evitar un llenado excesivo de los tanques de almacenamiento.

- El ácido sulfúrico y otras sustancias reactivas deben también almacenarse en tanques de doble pared o tanques colocados en recintos químicamente resistentes de la misma capacidad. El uso de sistemas de detección de fugas y de alarmas es una medida razonable. Si existe riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la zona de almacenamiento debe ser impermeable y resistente al material almacenado.

- Los puntos de suministro deben estar contenidos dentro del recinto para recoger los derrames de materias. Debe practicarse la devolución por ventilación de los gases desplazados al vehículo de suministro para reducir las emisiones de COVs. También debe estudiarse el uso del cierre automático de la conexiones de suministro para evitar derrames.

- Las materias incompatibles (como las sustancias oxidantes y orgánicas) deben estar separadas y utilizarse gases inertes para los tanques o zonas de almacenamiento si es necesario.

- El uso de interceptadores de aceites y sólidos si es necesario para el desagüe de las áreas de almacenamiento abiertas. El almacenamiento de materiales que puedan emitir aceite en zonas recubiertas de cemento que tengan curvas u otros dispositivos de contención. El uso de métodos de tratamiento de efluentes para las especies químicas almacenadas.

- Cintas transportadoras y conductos de transferencia situados en lugares seguros y abiertos por encima del suelo, de modo que las fugas puedan detectarse de forma rápida y puedan evitarse los daños derivados de vehículos y otros equipos. Si se utilizan conducciones soterradas, su curso puede estar documentado y marcado, adoptándose sistemas de excavación seguros.

- El uso de depósitos bien diseñados y robustos para gases a presión (incluidos gases a baja presión) con control de la presión de los tanques y de los conductos de suministro para evitar rupturas y fugas. Deben utilizarse monitores de gas en zonas confinadas y cerca de los tanques de almacenamiento.

- Cuando sea necesario, pueden usarse sistemas herméticos de suministro, almacenamiento y distribución para materiales polvorientos, así como silos. Pueden usarse naves completamente cerradas para el almacenamiento de materiales polvorientos con el fin de no tener que utilizar dispositivos de filtración especiales.

- Pueden usarse agentes sellantes (como melazas y PVA) cuando procesa y sea compatible con el fin de reducir la tendencia de los materiales a formar polvo.

- Cuando sea necesario, pueden usarse transportadores cerrados con equipos de extracción y filtración bien diseñados y robustos en los puntos de suministro, silos, sistemas de transferencia neumática y puntos de transferencia de transportadores, para evitar la emisión de polvo.

- El material no polvoriento e insoluble puede almacenarse en superficies herméticas con desagüe y recogida de desagües.

- Las virutas, virutas de torno y otros materiales aceitosos deben almacenarse a cubierto para evitar que el aceite sea arrastrado por el agua de lluvia.

- Deben usarse sistemas de transporte racionalizados para minimizar la formación y transporte de polvo dentro del centro de producción. Las aguas de lluvia que arrastren el polvo deben recogerse y tratarse antes de su evacuación.

- El uso de sistemas de lavado de las ruedas y de la carrocería o de otros sistemas de limpieza de los vehículos empleados para suministrar o manipular materiales polvorientos. Las condiciones locales, como la posible formación de hielo, pueden influir en el método empleado. Pueden usarse campañas planificadas para la limpieza de las carreteras.

- Pueden adoptarse sistemas de control de stocks y de inspección para prevenir derrames y detectar fugas.

- Pueden incorporarse sistemas de muestreo y análisis al sistemas de manipulación y almacenamiento de materiales con el fin de determinar la calidad de la materia prima y el método de proceso. Estos sistemas deben estar diseñados y operados al mismo alto estándar de calidad que los sistemas de manipulación y almacenamiento.

- Las áreas de almacenamiento para reductores, como carbón, coque o virutas de madera deben supervisarse para detectar posibles incendios causados por ignición espontánea.

- El uso de buenas prácticas de diseño y construcción, así como de un mantenimiento adecuado.

A continuación se reproduce la tabla de resumen de manipulación y almacenamiento de materiales.