

Guía sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fusión y refinado de metales

Introducción

Las guías sobre Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión¹. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban usarse las guías aplicables a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en el siguiente sitio web: <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>.

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología

existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Si corresponde utilizar niveles o indicadores menos rigurosos en vista de las circunstancias específicas del proyecto, debe incluirse como parte de la evaluación ambiental del emplazamiento en cuestión una justificación completa y detallada de cualquier alternativa propuesta, en la que se ha de demostrar que el nivel de desempeño alternativo protege la salud humana y el medio ambiente.

Aplicabilidad

Las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad sobre fusión y refinado contienen información relevante sobre la fusión de metal base y el refinado de plomo, zinc, cobre, níquel y aluminio. No incluye la minería y la concentración de materias

¹ Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

primas, de lo que se ocupan las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad sobre minería. El Anexo A contiene una descripción de las actividades del sector.

Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a base metal fusión y refinado que tienen lugar durante la fase operacional, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las fases de construcción, operación y desmantelamiento.

1.1 Medio ambiente

Los aspectos medioambientales significativos de la fase operativa de la fusión y el refinado están relacionados con:

- Emisiones al aire
- Aguas residuales
- Materiales peligrosos
- Residuos y desecho
- Ruido

Emisiones al aire

*Material particulado*²

Las emisiones de material particulado (que puede contener metales) pueden proceder de fuentes de escape o puntuales que incluyen la recepción, el acondicionamiento, el manejo y el transporte (por ejemplo, transportadores y tráfico de vehículos), y almacenamiento (por ejemplo, apilamiento exterior) de menas, concentrados y materias primas secundarias; de los gases

² El material particulado (polvo) se clasifica como material particulado total con un tamaño máximo de 100 µm (TPM), material particulado de menos de 10 µm (PM10), y material particulado de menos de 2,5 µm (PM2.5). El impacto del material particulado depende del tamaño y la naturaleza de las partículas (por ejemplo, las de PM2.5 son más respirables), su solubilidad relativa y la concentración y toxicidad de las sustancias contenidas en el material particulado.

calientes del pirorefinado (por ejemplo, sinterización, fusión, tostación, y conversión); durante la lixiviación (por ejemplo, manejo de materia seca, filtrado, almacenamiento de residuos de la lixiviación); durante el pirorefinado (por ejemplo, horneado y traslado de materiales calientes); durante la recolección o transporte de los contenidos de los sistemas de depurado (por ejemplo, filtros de bolsa); y durante la fundición y el moldeo (por ejemplo, manejo de metal fundido y espuma). Las emisiones fugitivas pueden ser mayores que las recuperadas y depuradas; por lo tanto, el control de las emisiones fugitivas es especialmente importante.

Las medidas para prevenir y controlar las emisiones de material particulado incluyen:

- Clasificar todos los materiales de alimentación en función de las posibilidades de reducir el riesgo;
- Almacenar los materiales generadores de polvo en instalaciones o contenedores cerrados y trasladarlos mediante transportadores neumáticos o cerrados. Cubrir todos los vehículos de transporte;
- Reducir la cantidad de materiales transportados y las distancias del transporte, mediante la planificación y diseño eficientes de la planta;
- Reducir lo máximo posible el volumen de gases de escape (por ejemplo, empleando procesos de oxigenación-fusión);
- Diseñar la operación continua siempre que sea posible, y garantizar que los sistemas de control ambiental son adecuados para optimizar la facilidad y la constancia de las actividades³.
- Utilizar hornos y reactores cerrados con reducción de presión, o reequipar los hornos existentes con el máximo de cierre (por ejemplo, uso de un "cuarto orificio" en un

³ Por ejemplo, las fases de conversión que se emplean en los procesos de fusión flash/conversión flash de Outokumpu/Kennecott no requieren la transferencia con cucharas, por lo que se elimina esta fuente de vapores secundarios.

- horno giratorio eléctrico para extraer los gases del proceso de la manera más eficiente posible);
- Cerrar, contener o utilizar cubiertas para capturar las emisiones de los recipientes de procesamiento, puntos de alimentación y descarga y sistemas de transporte;
 - Utilizar sistemas que mantengan el cierre o la disposición de las cubiertas, por ejemplo, mediante adición de material por medio de electrodos, toberas o lanzas; y la incorporación de sólidas válvulas rotativas en los sistemas de alimentación;
 - Utilizar controles de rejilla para cambiar automáticamente los puntos de extracción durante las diferentes fases del proceso, con el fin de concentrar la extracción en la fuente de humos y minimizar así el consumo de energía. En general, la extracción de humos por el ventilador superior debe ser el último recurso debido al alto consumo de energía y la reducción de la eficiencia de la colección de humos;
 - Controlar las emisiones de material particulado mediante precipitadores electrostáticos, filtros de bolsa, depuradores o ciclones adaptados a las características del flujo de escape (por ejemplo, teniendo en cuenta la temperatura, el tamaño fraccional del material particulado)⁴.

⁴ Lo siguiente se ha extraído de la información contenida en el documento de la Comisión Europea (2001) Mejores técnicas disponibles para el sector de la metalurgia no férrea: Se emplean mucho los sistemas de filtros textiles en este sector industrial, debido a su elevada eficiencia para el control del material particulado fino derivado de las operaciones de fundido. No son aptos para todas las aplicaciones/situaciones debido a su tendencia a provocar ceguera y su sensibilidad al fuego. Se emplean cámaras de asentamiento y refrigeración e incineradores de recuperación de calor residual antes que la filtración en bolsas para reducir el riesgo de incendio, acondicionar las partículas y recuperar el contenido calórico del gas de escape antes de eliminar el polvo. El precipitador electrostático (PE) también se usa ampliamente en la industria, ya que puede operar en toda una gama de condiciones de temperatura, presión y carga de polvo. No es especialmente sensible al tamaño de las partículas, y recoge el polvo en condiciones tanto secas como húmedas. Dispone de resistencia a la corrosión y la abrasión. Sin embargo, el PE no suele alcanzar concentraciones finales de polvo tan bajas como las que se logran con filtros textiles. Los precipitadores electrostáticos húmedos son necesarios para la limpieza de gases húmedos y saturados con un alto contenido de partículas (por ejemplo, los gases de escape procedentes de la producción de zinc y cobre primarios, que contienen polvo y dióxido de azufre, se limpian mediante un depurador un precipitador electrostático húmedo). Los precipitadores húmedos también se utilizan para recuperar el polvo de alquitrán en los gases residuales de un horno

- Realizar un mantenimiento de las cubiertas, conductos y sistemas de filtrado para asegurarse de que las tasas de colección o extracción se mantengan al nivel previsto;
- Cubrir todos los vehículos de transporte y mantener el equipo de almacenamiento y procesamiento en un lugar cerrado;
- Emplear un programa de riego para minimizar las emisiones de material particulado a la atmósfera desde los caminos, las pilas de almacenamiento u otras fuentes de las instalaciones;
- Limpiar y conservar diligentemente las instalaciones y contar con dispositivos de limpieza de vehículos para prevenir la migración de materiales dentro y fuera de las instalaciones.

Metales

Además de metales base primarios, los materiales de alimentación pueden contener pequeñas cantidades de otros metales (por ejemplo, aluminio, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio, cromo, cobre, estaño, germanio, oro, indio, plata, plomo, mercurio, níquel, selenio, talio y zinc).

Las emisiones de metales en varias formas y compuestos, que pueden movilizarse como contaminantes en material particulado, nieblas, humos o líquidos, pueden generarse durante todas las fases de producción, entre ellas el piroprocesado (por ejemplo, durante la sinterización, la fusión, la tostación y la conversión se generan grandes volúmenes de

de cocción electrodica. Con frecuencia se usan depuradores húmedos en cascada para eliminar el polvo de los gases de escape ricos en CO procedentes de los hornos eléctricos de arco sellado; el gas se utiliza por su alto valor calórico. También se utilizan para tratar los gases de las máquinas de sinterización con cinta de acero, en las que el polvo es muy abrasivo pero fácil de humedecer, y el uso de los depuradores posibilita el enfriamiento del gas a la vez que la eliminación del polvo. Los ciclones no suelen ser adecuados para el control directo de las emisiones de los procesos en este sector. Su eficiencia para recoger polvo fino es demasiado baja para poder filtrar eficazmente las emisiones de los hornos. La experiencia operativa ha demostrado que no pueden cumplir los niveles actuales sobre control de emisiones. Sin embargo, los ciclones son eficaces para la primera recolección, en conjunción con otras técnicas, especialmente en los procesos más grandes en los que pueden variar las emisiones.

gas caliente que contiene material particulado y humos metálicos); el pirorefinado (por ejemplo, durante el horneado y el traslado de materiales calientes se generan partículas finas y humos metálicos); electrorefinado (por ejemplo, emisiones de niebla ácida procedentes de las soluciones electrolíticas); y fundido y moldeo (por ejemplo, emisiones de humos metálicos del manejo de metal fundido y escorias, y las partículas de los filtros de bolsa). El nivel de impacto de estos metales sobre la atmósfera depende de su forma, toxicidad y concentración⁵.

Las emisiones de metales se controlan mediante la aplicación de medidas de control del material particulado.

Mercurio: Se señalan especialmente las emisiones metálicas generadas en los procesos de fusión y refinado que puedan contener mercurio. Aunque la mayoría de los sistemas de escape que contienen metales se controlan eficazmente mediante los mismos controles de depuración que para el material particulado, el mercurio seguirá en estado vaporoso a temperatura ambiente y puede atravesar algunos equipos de control. Es importante enfriar considerablemente el gas de entrada en el sistema de control del material particulado para garantizar la captura del mercurio o usar un filtro de carbón activo para absorber el mercurio⁶.

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre (SO₂) es el producto de la quema de combustibles fósiles durante la tostación, sinterización, fusión, conversión o refinado del metal sulfurado. La concentración de SO₂ en las corrientes de gases de escape es una característica importante para el manejo de las emisiones de SO₂. Con concentraciones superiores al 5 – 7 en las corrientes de gas

bruto, el SO₂ puede transformarse en ácido sulfúrico. Con concentraciones más bajas en la corriente de gases es necesario el uso de materias primas con cantidades inferiores de azufre, o algún tipo de depuración para fijar el azufre, minimizar las emisiones de SO₂ a la atmósfera y lograr una concentración adecuada en el aire ambiente. Los procesos de fusión con oxígeno reducen el volumen de gases de escape y aumentan la concentración de SO₂, lo que contribuye a una mayor eficiencia de la conversión y reduce las emisiones de contaminantes con menor volumen.

Las medidas para prevenir y controlar las emisiones de dióxido de azufre incluyen lo siguiente:

- Procesar (fijar) el azufre para su almacenamiento seguro y/o uso como producto (por ejemplo, ácido sulfúrico, dióxido de azufre líquido, fertilizante y azufre elemental);
- Considerar tecnologías que reduzcan los volúmenes de gas y aumenten la concentración de SO₂⁷;
- Implementar sistemas de control del proceso para garantizar un funcionamiento coherente;
- Instalar procesos de depuración que eliminen el SO₂ de las corrientes con baja concentración;
- Mantener el equipo y los recipientes de procesamiento en lugares cerrados para prevenir las emisiones fugitivas;
- Utilizar el tratamiento previo (por ejemplo, flotación) para eliminar el sulfuro no deseado y reducir el azufre en la alimentación;
- Utilizar combustible (por ejemplo, gas natural en lugar de fueloil pesado o coque) y materias primas (por ejemplo,

⁵ Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

⁶ Se ofrece información más detallada sobre las tecnologías y los métodos empleados para controlar las emisiones de mercurio, además del manejo de sustancias residuales (por ejemplo, cloruro de mercurio o calomelano de los sistemas Boliden/Norzink y Outokumpu de control del mercurio) en Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo, pg. 135.

⁷ Se utilizan dos procesos básicos de fusión: fusión por baño o fusión flash. El proceso de fusión flash se enriquece con oxígeno para producir una operación autotérmica (autogénica) o casi autotérmica. Los procesos de fusión por baño usan generalmente menos aportación de oxígeno. El uso de oxígeno también produce mayores concentraciones de dióxido de azufre que hacen más eficaz la recuperación del gas mediante el uso de sistemas de recuperación de azufre (normalmente la producción de ácido sulfúrico o de dióxido de azufre líquido). Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

materias primas con bajo contenido de azufre) con poco azufre.

Óxidos de nitrógeno

Las emisiones de NO_x están relacionadas principalmente con la quema de combustibles (por ejemplo, el carbón en la fusión y el gas natural en el pirorefinado). Los NO_x se pueden formar a partir de componentes nitrogenados presentes en el combustible o los concentrados, o como NO_x térmicos. En la producción de aluminio, también se generan NO_x durante la electrólisis debido a la presencia de nitrógeno en el ánodo.

Las medidas para prevenir y controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno incluyen lo siguiente:

- Minimizar la generación de NO_x mediante el uso de quemadores de gas y aire de combustión en etapas bajas en NO_x en los hornos de pirorefinado y otros dispositivos de combustión.
- Tratar los gases procedentes de la tostación para eliminar los NO_x (por ejemplo, mediante un depurador oxidante) cuando haya una elevada presencia de ellos, con el fin de mejorar la calidad y la utilidad del ácido sulfúrico procedente de los gases de escape con SO₂;
- La oxicomustión puede reducir la formación de NO_x. Al usar el enriquecimiento con oxígeno, se debe considerar la inyección de oxígeno en la entrada del quemador si las altas temperaturas provocadas por el uso de oxígeno puro en la combustión generan una formación adicional de NO_x.

Dioxinas y furanos

Se pueden generar dibenzodioxinas policloradas (PCDD, por sus siglas en inglés) y dibenzofuranos (PCDF, por sus siglas en inglés) durante la producción de metales (por ejemplo, piroprocesado), especialmente en la producción a partir de materias primas secundarias o en procesos que requieran

cloración. Las impurezas en la chatarra puede generar PCDD/F durante una combustión incompleta o síntesis de novo⁸.

Las medidas para prevenir y controlar las dioxinas y los furanos incluyen lo siguiente:

- Cribar la chatarra metálica para eliminar o minimizar la presencia de materiales orgánicos (por ejemplo, plásticos y madera) antes de cualquier combustión y/o calentamiento de la misma;
- Implementar procedimientos para la operación y el mantenimiento del equipo de combustión para garantizar su eficiencia en las temperaturas y los tiempos de residencia previstos, con el fin de asegurar la destrucción de dioxinas y evitar su reformación con el enfriamiento de los gases;
- Considerar el uso de carbón activo en un reactor con solera fija o móvil o mediante su inyección en la corriente de gas, y su eliminación posterior con filtrado.

Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se producen por una mala combustión o durante operaciones como en desengrase de los componentes y los procesos de extracción de solventes, y la ventilación de tanques empleados para el almacenamiento de solventes y combustible. También se pueden emitir COV durante la fusión y el refinado de metales secundarios, si la alimentación incluye materiales orgánicos.

Las medidas recomendadas para prevenir, reducir al mínimo y controlar las emisiones de COV incluyen:

⁸ La presencia de aceites y otros materiales orgánicos en la chatarra u otras fuentes de carbón (combustibles parcialmente quemados y reductores, como el coque), puede generar partículas finas de carbón que reaccionan con los cloruros inorgánicos o los compuestos clorados orgánicos a una temperatura de 250 a 500° C para producir dioxinas. Este proceso se conoce como una síntesis de novo y la catalización se produce por la presencia de metales como el cobre o el hierro. Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

- Utilizar solventes a base de agua siempre que sea posible, o al menos solventes tóxicos adaptados a la aplicación;
 - Contener las emisiones (por ejemplo, mediante el uso de equipos sellados o cubiertas);
 - Usar mezcladores/estabilizadores con mínimo contacto con el aire para reducir al mínimo la evaporación de COV;
 - Controlar las emisiones de COV mediante posquemadores, depuradores, biofiltros o bioreactores, filtros de carbón activado o sistemas de enfriamiento/condensación, dependiendo, por ejemplo, de la composición de la corriente de gas;
 - Utilizar la ventilación posterior de los gases desplazados al vehículo de suministro durante el llenado de tanques de solvente o combustible, y usar el sellado automático de las conexiones de suministro para evitar vertidos.
- Instalar cubiertas en los tanques, manteniendo una capa adecuada de espuma en la superficie de la solución electrolítica, y tratar los gases y las nieblas de escape mediante equipo de control (por ejemplo, depuradores);
 - Usar filtros de chimenea y de vela para controlar las emisiones de niebla ácida en plantas con ácido sulfúrico;
 - Recolectar y tratar la niebla ácida (por ejemplo, mediante depuradores húmedos o filtros de niebla) generada en el proceso de desmantelamiento de baterías.

Niebla ácida y arsina

La electroextracción y otros procesos como la lixiviación bajo presión y la producción de ácido sulfúrico pueden producir niebla ácida con metales solubles. También se pueden generar nieblas ácidas durante el desmantelamiento de baterías de plomo-ácido. La arsina gaseosa puede ser producto de la mezcla de ciertos microelementos metálicos con ácido (por ejemplo, durante el proceso de lixiviación). La niebla ácida se produce debido a las reacciones en las cubas de electroextracción, además de cualquier aireación o mezcla agresiva y/o reacciones químicas en los procesos subsidiarios y/o en puntos de descarga abiertos en los que se manejan flujos líquidos.

Las medidas para prevenir y controlar las emisiones de niebla ácida y arsina incluyen lo siguiente:

- Hacer un seguimiento de los parámetros de control del proceso para reducir y/o eliminar las alteraciones de las condiciones;

Monóxido de carbono

Algunos procesos pirometalúrgicos (por ejemplo, la producción térmica con carbón de aleaciones de hierro en hornos eléctricos de arco sumergido cerrados) producen un gas de escape rico en monóxido de carbono. La cantidad de CO depende ampliamente del metal y el proceso de producción. Las medidas para controlar y minimizar las emisiones de CO incluyen la recolección y la limpieza del gas rico en CO (por ejemplo, mediante un depurador húmedo en cascada), y la reutilización o la venta del gas como combustible. El CO también puede ser producto de una combustión incompleta o de la fusión y el refinado de materias primas secundarias con material orgánico. El control del CO de estas fuentes es similar al control de los COV, antes descrito.

Gases de efecto invernadero

Dióxido de carbono (CO₂): Durante las operaciones de fusión y refinado se producen cantidades importantes de dióxido de carbono⁹. Las fuentes principales de CO₂ son la fusión de concentrados, la quema directa de combustibles fósiles para generar energía o calor, y las emisiones indirectas provocadas por el uso de combustibles fósiles para generar energía

⁹ El dióxido de carbono se forma también durante la electrolisis en la producción de aluminio mediante la reacción del ánodo de carbono con el oxígeno formado por electrolisis y una reacción secundaria con el aire. Sin embargo, esta emisión es mucho menor que la emisión de CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles para la generación de la energía eléctrica necesaria para la electrolisis.

eléctrica para el funcionamiento de las operaciones (por ejemplo, para la electrólisis en la fusión del aluminio). Otras contribuciones indirectas a los gases de efecto invernadero en este sector están relacionadas con el uso de reactivadores químicos que desprenden una cantidad significativa de dichos gases durante el proceso fuera de las instalaciones. Las medidas para reducir la generación de gases de efecto invernadero son muy similares a las medidas para aumentar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía, que se explican en la siguiente sección sobre consumo y eficiencia energéticos. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones adicionales para el manejo de los gases de efecto invernadero.

Perfluorocarbonos (sólo para el aluminio)^{10,11}: Dos perfluorocarbonos (PFC), tetrafluorometano (CF₄) y hexafluoroetano (C₂F₆), se forman durante la fase anódica (desequilibrio temporal de la tasa de alimentación de materias primas y la tasa de producción de aluminio) de la fabricación del aluminio y, una vez formados, no pueden eliminarse de la corriente de aire mediante la tecnología existente.

Los efectos anódicos se producen cuando el contenido de alúmina del electrolito cae por debajo del 1-2 por ciento, lo que provoca la formación de una película gaseosa sobre el electrodo. La formación de una película sobre el ánodo provoca

la detención de la producción de metal y aumenta el voltaje de la cuba de 4-5 voltios a 8-50 voltios. La generación de PFC depende de la frecuencia y la duración de los efectos anódicos¹².

Las medidas para controlar los perfluorocarbonos (y reducir las emisiones generales de GEI) incluyen lo siguiente¹³:

- Aumentar el uso de aluminio reciclado (el uso de aluminio reciclado requiere bastante menos energía que la producción primaria);
- Aumentar la eficiencia de la conversión eléctrica;
- Reducir los efectos anódicos que producen PFS:
 - Controlar los efectos anódicos mediante el ajuste del voltaje de la cuba y las adiciones de alúmina
 - Usar una alimentación puntual y semicontinua de alúmina combinada con un control del proceso
- Cambiar la tecnología de reducción para minimizar el uso de carbón fósil¹⁴.

Consumo y eficiencia energéticos: Las instalaciones de fusión y refinado exigen grandes cantidades de energía, sobre todo de energía generada por combustibles para el secado, el calentamiento, la fusión, extracción de vapores, fundición y transporte, y la energía eléctrica necesaria para la electrólisis y el funcionamiento de los servicios / el equipo. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones para mejorar la eficiencia energética. Las siguientes recomendaciones son específicas para este sector:

- Valorar tecnologías alternativas de fusión y procesamiento que optimicen el consumo de energía (por ejemplo, la

¹⁰ Entre los seis GEI cuyas emisiones deben reducirse de acuerdo con el Protocolo de Kyoto, dos perfluorocarbonos (PFC), en concreto el tetrafluorometano (CF₄) y el hexafluoroetano (C₂F₆) son un subproducto de la fusión del aluminio. El potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) es una técnica para medir la contribución relativa de cada GEI al calentamiento de la atmósfera. El GWP se calcula en función de plazos específicos (por ejemplo, 200 a 500 años) y para concentraciones concretas de GEI (por ejemplo, las actuales). Se consideran los efectos tanto directos como indirectos. Los efectos indirectos incluyen cambios en la composición química de la atmósfera como la formación de ozono y cambios del vapor de agua estratosférico. Se ha asignado un valor de 1 al CO₂, que sirve de referencia para el resto de GEI. El GWP del tetrafluorometano (CF₄) es 6.500 superior al del CO₂ (en un plazo de 100 años), y el del hexafluoroetano (C₂F₆) es 9.200 veces superior al del CO₂ (en un plazo de 100 años). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

¹¹ International Aluminum Institute. Greenhouse Gas Protocol: Greenhouse gas emission monitoring and reporting by the aluminum industry, octubre de 2006. Disponible en www.world-aluminio.org/environment/climate/ghg_protocol.pdf

¹² Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

¹³ International Aluminum Institute. "PFC Emissions: A Decade of Progress". <http://www.world-aluminio.org/environment/climate/index.html>

¹⁴ Las tecnologías de desarrollo que no utilizan carbón se encuentran todavía en fase de desarrollo piloto.

fusión flash requiere alrededor de la mitad de energía que la fusión convencional en altos hornos, y el uso de aluminio reciclado conlleva habitualmente menos energía que la necesaria para la producción primaria);

- Emplear técnicas de calentamiento y recuperación de energía para maximizar la utilidad de la energía (por ejemplo, calderas de calor residual, intercambiadores de calor, motores de vapor)¹⁵, por ejemplo para gases generados en los procesos pirometalúrgicos. Las técnicas de recuperación del calor varían entre instalaciones, aunque pueden incluir el uso de aire rico en oxígeno para reducir el consumo de energía; uso de calderas de vapor para capturar los gases calientes generados en la fusión o la tostación; y uso del calor generado en los procesos de fusión y refinado para fundir el material secundario.

Carbonilo de níquel (sólo para el níquel)

La producción de carbonilo de níquel es un paso intermedio en la producción de níquel purificado. Dependiendo del proceso, también se pueden formar otros carbonilos como el carbonilo de cobalto o de hierro. Se deben incinerar los flujos gaseosos ricos en carbonilos para convertir el carbonilo metálico en óxido de metal básico y dióxido de carbono. Se deben emplear tecnologías de control para capturar el óxido de metal básico y el dióxido de carbono procedentes de la incineración de flujos gaseosos ricos en carbonilo.

Fluoruros (sólo para el aluminio)

La principal fuente de fluoruros gaseosos son los cazos durante la electrolisis. La mayoría de los fluoruros gaseosos se producen en forma de fluoruro de hidrógeno, derivado de la reacción del fluoruro de aluminio y la criolita con el hidrógeno. El control de las emisiones de fluoruros se puede lograr

mediante la captura de humos. Los humos capturados (normalmente más del 98 por ciento del humo generado) se pueden limpiar mediante inyección de alúmina en el gas de escape para la absorción del fluoruro, seguida del filtrado con bolsa (el polvo se devuelve a los cazos) o con depuradores húmedos (normalmente con una eficiencia superior al 99,5 a 99,9 por ciento).

Alquitrán e hidrocarburos aromáticos policíclicos (sólo para el aluminio)

Se pueden generar alquitrán e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (principalmente en las plantas de tostación anódica). Las medidas para prevenir y controlar estas emisiones incluyen lo siguiente:

- Mejorar la eficiencia de la combustión;
- Utilizar otro tipo de ánodo;
- Eliminar el alquitrán y los PAH mediante depuradores de alúmina y filtros textiles;
- Usar una pasta anódica seca y mantener fría la parte superior del ánodo para reducir las emisiones de HAP.

Preparación anódica (sólo para el aluminio)

La electrolisis de la alúmina en forma de aluminio provoca el consumo del ánodo, durante el cual el oxígeno emitido quema el carbono. Estos ánodos se preparan normalmente en las instalaciones, en un tostador de ánodos donde los materiales con carbono (incluida la brea) se adhieren a un metal y se tuestan para aumentar su dureza. La tostación genera hidrocarburos volátiles y otros contaminantes como el azufre de las materias primas. Cuando sea posible, el calor generado por las emisiones de COV podría emplearse para la combustión de estas sustancias dentro del horno de tostación. El gas de escape de la tostación se debe tratar mediante depuración o absorción, además del filtrado en plantas con fusión de aluminio primario, en las que los hidrocarburos se reciclan al proceso de

¹⁵ Se pueden consultar directrices detalladas sobre la eficiencia energética en la fusión en Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

producción. Se pueden utilizar alternativamente posquemadores y depuradores húmedos, dependiendo de las instalaciones y el tamaño de la producción.

Aguas residuales

Aguas residuales de procesos industriales

Las principales fuentes de aguas residuales en el sector de la fusión y el refinado incluyen el agua residual de procesos hidrometalúrgicos (por ejemplo, limpieza del gas de tostación, lixiviación, purificación y electrolisis); limpieza húmeda de gases de escape; granulación de escoria; enfriamiento con agua; y aguas superficiales / pluviales. Las aguas residuales contienen habitualmente compuestos metálicos solubles e insolubles, aceite y material orgánico. El agua de enfriamiento por contacto directo (por ejemplo, en algunas operaciones de moldeo) puede contener altos niveles de metales y sólidos en suspensión, y debe canalizarse a través del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Tratamiento de aguas residuales de procesos industriales

Las técnicas para tratar las aguas residuales de procesos industriales en este sector incluyen la segregación y el tratamiento previo de las corrientes de aguas residuales para la reducción de los metales pesados mediante precipitación, coagulación y floculación, etc. Las fases habituales del tratamiento de aguas residuales incluyen la separación del aceite o la flotación con aire de material disuelto para separar el aceite y los sólidos flotables; filtración para la separación de sólidos filtrables; ecualización de la corriente y la carga; sedimentación para la reducción de los sólidos en suspensión mediante clarificadores; desecado y desecho de residuos en vertederos designados para residuos peligrosos. Pueden ser necesarios controles de ingeniería adicionales para i) la eliminación avanzada de metales mediante filtración con membranas u otras tecnologías de tratamiento físico/químico, ii)

eliminación de materias orgánicas recalcitrantes y halogenadas mediante carbón activo y oxidación química avanzada, iii) reducción de la toxicidad del efluente mediante tecnología adecuada (como osmosis reversa, intercambio de iones, carbón activo, etc.).

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ocupan de la gestión de las aguas residuales industriales y presentan ejemplos de estrategias de tratamiento. Las instalaciones industriales deben cumplir los valores orientativos para el vertido de aguas residuales, mediante el uso de estas tecnologías y las buenas prácticas para la gestión de aguas residuales, como se indica en el cuadro relevante de la sección 2 de este documento.

Otras corrientes de aguas residuales y consumo de agua

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientación sobre la gestión de aguas residuales no contaminadas de los servicios, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Los sistemas de enfriamiento con agua sin contacto en el sector de la fusión y el refinado puede canalizarse directamente o recircularse mediante el uso de torres de enfriamiento evaporantes. Las aguas del sistema de canalización directa se vierten habitualmente en las aguas superficiales después de considerar/reducir adecuadamente los efectos de la temperatura en las aguas receptoras. Las aguas pluviales pueden contaminarse por el contacto con material apilado y la deposición superficial de contaminantes en el aire. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones para el manejo de las aguas pluviales. Las corrientes contaminadas deben canalizarse al sistema de tratamiento de las aguas residuales de los procesos industriales. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones para reducir el

consumo de agua, especialmente cuando pueda tratarse de un recurso natural limitado.

Materiales peligrosos

En el sector de la fusión y el refinado se utilizan una serie de ácidos, álcalis y reactivos químicos (en la lixiviación y la precipitación de metales, y en los sistemas de control de la contaminación); y gases emitidos en el proceso (por ejemplo, oxígeno, dióxido de carbono, argón, nitrógeno, cloro, hidrógeno, entre otros). Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen directrices sobre el almacenamiento, el transporte y el uso seguro de materiales peligrosos.

Residuos y desechos

Las fuentes de residuos y desechos peligrosos y no peligrosos en el sector de la fusión y el refinado incluyen las escorias, las espumas y las matas de los procesos pirometalúrgicos; revestimientos y refractantes gastados de los hornos; desecho de los sistemas de depuración (por ejemplo, polvo de gases de escape, lodos, y material de filtrado gastado); lodos del tratamiento de aguas residuales (por ejemplo, de los sistemas de depurado húmedo y el tratamiento de aguas residuales del proceso, que pueden contener yeso [CaSO₄] e hidróxidos y sulfuros metálicos); y lodos de las actividades de lixiviación, purificación y electrólisis.

Se deben maximizar las oportunidades de reciclar los subproductos y el desecho de las actividades de fusión y refinado¹⁶ de vuelta al proceso (por ejemplo, espumas, matas, revestimientos de cazos y hornos, material de limpieza). Se debe procesar la gran cantidad de escoria generada en la fase de fusión (por ejemplo, extracción de humos para recuperar los metales residuales) para producir un material inerte granulado

¹⁶ Se puede obtener orientación detallada sobre oportunidades para la minimización, la reutilización y el reciclaje en Comisión Europea. 2001. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo.

que se puede comercializar para uso industrial, en la fabricación de cemento o los productos de aislamiento. El desecho de los sistemas de depurado y el lodo de la lixiviación y el tratamiento de aguas residuales se puede reciclar en las fases de piromprocesamiento, dependiendo del nivel de integración de procesos en las instalaciones. El lodo de los ánodos y del fondo de los tanques se puede reciclar para recuperar los metales residuales. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones para el manejo y el desecho seguros de residuos industriales peligrosos y no peligrosos. A continuación se aborda la generación y el manejo de algunos desechos específicos del sector de la fusión y el refinado de metales no ferrosos.

Cátodos gastados (sólo para el aluminio)

Los cátodos gastados, también conocidos como revestimientos gastados de los cazos, son la principal fuente de desechos en la fabricación de aluminio primario. Un cátodo gastado consiste en una porción de carbono del cátodo de la cuba de electrólisis, y el metal refractario que consiste en varios tipos de material aislante. El revestimiento gastado contiene fluoruro y cianuro soluble, y puede producir un lixiviado alcalino con el contacto con el agua. Se deben tratar y reutilizar los revestimientos (por ejemplo, en hornos pirometalúrgicos, en la producción de criolita, en la industria del cemento o como fuente de combustible) siempre que sea posible, o deshacerse de ellos de acuerdo con las directrices sobre manejo de residuos peligrosos de las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Barro rojo (sólo para el aluminio)

En la extracción de aluminio de la bauxita se genera barro rojo, que es una sustancia alcalina que requiere un almacenamiento controlado, normalmente en estanques sellados (revestidos), para reducir al mínimo las posibilidades de contaminación de

las aguas superficiales y subterráneas. El exceso de agua del barro se devuelve al proceso.

Ruido

Las operaciones de fusión y refinado son inherentemente ruidosas debido a la gran cantidad de equipo mecánico, vehículos de transporte, actividades físicas y consumo de energía, especialmente por los hornos y el vapor. Las fuentes más importantes de ruidos son el transporte y el manejo de materias primas y productos; los procesos de producción relacionados con las operaciones de pirometalurgia, trituración y fresado; el uso de bombas y ventiladores; la ventilación del vapor y la existencia de sistemas de alarma no asistidos. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones para la gestión del ruido.

1.2 Higiene y seguridad ocupacional

Las cuestiones sobre higiene y seguridad en el trabajo se deben considerar parte de un estudio integral de los peligros o riesgos, por ejemplo, un estudio de identificación de riesgos [HAZID, por sus siglas en inglés], un estudio de peligros y operatividad [HAZOP, por sus siglas en inglés], y otros estudios de evaluación de riesgos. Los resultados deben usarse para la planificación de la gestión de la higiene y la seguridad, en el diseño de la instalación y en los sistemas de seguro trabajo, y en la elaboración y comunicación de procedimientos de trabajo seguros.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen medidas generales para el diseño de la instalación, el funcionamiento y el seguimiento con el fin de gestionar los principales riesgos para la higiene y la seguridad ocupacional. También se ofrecen directrices generales relativas a las actividades de construcción y desmantelamiento, junto con las orientaciones sobre higiene y seguridad, el equipo de

protección personal y la gestión de riesgos físicos, químicos, biológicos y radiológicos comunes a todas las industrias.

Otras cuestiones relacionadas con la higiene y la seguridad en el trabajo en las operaciones de fusión y refinado incluyen:

- Exposición a sustancias químicas
- Riesgos de origen físico
- Ruido
- Radiación
- Acceso a espacios cerrados

Exposición a sustancias químicas

En el sector de la fusión y el refinado se utilizan una serie de materiales peligrosos que incluyen ácidos, álcalis y reactivos químicos (por ejemplo, en la lixiviación y precipitación de metales, y para los sistemas de control de la contaminación); y gases emitidos en el proceso (por ejemplo, oxígeno, dióxido de carbono, argón, nitrógeno, cloro, hidrógeno, entre otros). Los trabajadores pueden estar expuestos a los materiales peligrosos contenidos en polvos, vapores, gases, nieblas y humos orgánicos e inorgánicos, emitidos como parte de las operaciones y/o actividades humanas en todas las fases de producción y mantenimiento.

Los materiales peligrosos inorgánicos consisten habitualmente en metales básicos solubles e insolubles (por ejemplo, níquel, cobre, y pequeños restos contaminantes de arsénico, antimonio, talio, mercurio y cadmio, entre otros). Los pequeños restos contaminantes y los metales correspondientes dependen de la naturaleza de la mena procesada y el proceso específico que se utilice. Se puede producir una exposición a nieblas ácidas durante la lixiviación y/o el electrorefinado. La exposición a materiales orgánicos puede incluir dioxinas y furanos, solventes orgánicos residuales usados como reactivos, e hidrocarburos aromáticos policíclicos en el humo de breá y el polvo (en plantas de electrodos de carbono y los procesos de

reducción del aluminio en cubas). La exposición a gases puede incluir dióxido de azufre, amoníaco, monóxido de carbono, oxígeno, arsina, cloro y fluoruro, entre otros. Algunos gases pueden ser de naturaleza metálica como el cobalto, el hierro y los carbonilos de níquel.

Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones sobre la exposición a sustancias químicas y otros materiales peligrosos, lo que incluye el uso de equipo de protección personal. Además se recomiendan las siguientes medidas para prevenir, minimizar y controlar los riesgos de exposición a sustancias químicas:

- Cerrar y aislar las posibles fuentes de emisiones al aire en la medida en que sea práctico;
- Hacer un seguimiento continuo en las áreas en las que puedan producirse riesgos repentinos e imprevistos (por ejemplo, cuando pueda producirse una emisión de arsina o cianuro de hidrógeno);
- Controlar la exposición de los trabajadores mediante dispositivos de muestreo de la higiene en el trabajo;
- Ofrecer formación y fomentar la buena higiene personal, y prohibir fumar y comer en el lugar de trabajo;
- Automatizar los procesos y el manejo de materiales en la medida en que sea práctico y disponer de espacios cerrados para los operadores;
- Disponer de ventilación de escape local para limitar la exposición, por ejemplo, a las nieblas de dióxido de azufre, monóxido de carbono y ácido sulfúrico.

Riesgos de origen físico

Los peligros de origen físico, lo que incluye la exposición al calor de los hornos y el metal fundido y el estrés ergonómico, pueden provocar lesiones físicas relacionadas con la operación de equipos, quemaduras y explosiones asociadas con el trabajo con metales calientes (por ejemplo, durante las actividades de

piroprocesamiento), ácidos, cáusticos, solventes, soluciones lixiviadas y soluciones empleadas en el electrorefinado. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientaciones sobre la gestión de riesgos de origen físico. Además, se recomiendan las siguientes medidas para prevenir, minimizar y controlar las posibles enfermedades provocadas por el calor:

- Usar pantallas y cortinas de agua frente a los hornos;
- Disponer de enfriamiento puntual cuando sea necesario;
- Instalar cabinas cerradas de aire acondicionado para los operadores;
- Contar con uniformes a prueba de calor y enfriados con aire;
- Permitir un tiempo suficiente para aclimatarse a los ambientes calientes, disponer de descansos en las zonas frías y un suministro adecuado de bebidas para hidratarse con frecuencia.

Ruido

El personal encargado de la fusión y el refinado puede estar expuesto a altos niveles de ruido procedente del equipo pesado y los hornos. Dado que no se pueden prevenir la mayoría de estos ruidos, las medidas de control deben incluir el uso de protección para los oídos para el personal expuesto al ruido y la implementación de programas de rotación en el puesto de trabajo para reducir la exposición acumulada. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen recomendaciones adicionales sobre la gestión del ruido en el trabajo.

Radiación

La exposición a la radiación en el trabajo puede ocurrir como consecuencia de la generación de radiaciones en algunos equipos del proceso (por ejemplo, cubas de carga y monitores particulados) y el equipo de laboratorio. Las **Guías generales**

sobre medio ambiente, salud y seguridad ofrecen recomendaciones sobre la gestión de la exposición a radiaciones.

Espacios cerrados

En una instalación de fusión y refinado hay equipo y situaciones que requieren el acceso a espacios cerrados. Dichas instalaciones deben desarrollar e implementar procedimientos para el acceso a espacios cerrados como se describe en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Campos eléctricos y magnéticos

Los campos electromagnéticos (CEM) consisten en líneas invisibles de fuerza emitidas o que rodean cualquier dispositivo eléctrico. Los campos eléctricos son el resultado del voltaje y el aumento de la fuerza con los incrementos de voltaje. Los campos magnéticos son consecuencia del flujo de corriente eléctrica y el incremento de la fuerza conforme aumenta la corriente. Los campos eléctricos están protegidos por materiales que conducen la electricidad y otros materiales, como los árboles o los materiales de construcción. Los campos magnéticos atraviesan la mayoría de los materiales y son difíciles de detener. Los campos tanto eléctricos como magnéticos disminuyen rápidamente con la distancia. La energía suministrada a las cubas de reducción electrolítica es corriente directa, y los campos electromagnéticos generados en las salas de cubas son principalmente de tipo estático o de campo permanente. Dichos campos, a diferencia de los campos electromagnéticos de baja frecuencia, son incluso más difíciles de mostrar para ejercer efectos biológicos consistentes o reproducibles. Los niveles de flujo de los campos magnéticos en las salas de cubas suelen estar por debajo de los límites establecidos para los campos magneto estáticos, con frecuencia sub radio o electrostáticos. La exposición a campos electromagnéticos de frecuencia ultra baja puede producirse en las plantas de reducción, especialmente cuando están

adyacentes a las salas de rectificación. Los niveles de flujo hallados en las salas de cubas son mínimos o están por debajo de las normas actuales¹⁷. La exposición a CEM también puede originarse en los hornos de arco eléctrico y otros equipos eléctricos¹⁸.

1.3 Salud en la comunidad

Las instalaciones de fusión y refinado son importantes emisores de contaminantes, lo que puede producir riesgos para la higiene y la seguridad en las comunidades cercanas. Un riesgo importante es la contaminación acumulada de tierras y zonas residenciales en la comunidad con metal particulado fino, y la consiguiente exposición de los residentes y el ecosistema del alrededor a riesgos para la salud. La deposición de metales (por ejemplo, cadmio, cobre, plomo, zinc y magnesio) y otros contaminantes también puede afectar a las cosechas y el ganado y la calidad de los productos agrícolas de las tierras cercanas. Los controles de las emisiones descritos en la sección 1.1 pueden minimizar dichos impactos.

Las instalaciones de fusión y refinado deben desarrollar y mantener un programa integral sobre medio ambiente, higiene y seguridad mediante un proceso cooperativo que involucre a todas las partes interesadas, lo que incluye a los residentes en la comunidad. El programa debe incluir los siguientes componentes:

- Educación y concienciación en las comunidades con respecto a los riesgos para la salud de las operaciones de fusión
- Evaluación básica del estado de la salud, cuando sea necesario

¹⁷ Organización Internacional del Trabajo, Enciclopedia sobre salud y seguridad en el trabajo, Cuarta Edición, Volumen 3, Parte XIII, Capítulo 82. Disponible en <http://www.ilo.org/public/spanish/region/ampro/cinterfor/sid/servicio/enciclop/>.

¹⁸ Las personas que utilicen marcapasos cardíacos no deben participar en las operaciones de reducción debido al riesgo de arritmias provocadas por el campo magnético.

- Investigación de problemas de legado de lugares contaminados, incluidas las estrategias de evaluación y remediación
- Desarrollo de un plan de respuesta y preparación para emergencias, con la participación de las comunidades afectadas y las agencias reglamentarias competentes;
- Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** ofrecen orientación adicional sobre estas y otras cuestiones relacionadas con la higiene y la seguridad en la comunidad.

2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

2.1 Medio ambiente

Guía sobre emisiones y efluentes

En los Cuadros 1 y 2 se presentan las guías sobre emisiones y efluentes para los proyectos de fusión y refinado. Las cantidades correspondientes a las emisiones y efluentes de los procesos industriales en este sector son indicativas de las prácticas internacionales recomendadas para la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Dichas cantidades pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento de instalaciones adecuadamente diseñadas y utilizadas mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se han analizado en las secciones anteriores de este documento. Estos niveles se deben lograr, sin dilución, al menos el 95% del tiempo que opera la planta o unidad, calculado como proporción de las horas de operación anuales. El incumplimiento de estos niveles debido a las condiciones de determinados proyectos locales se debe justificar en la evaluación ambiental correspondiente.

Las guías sobre emisiones son aplicables a las emisiones procedentes de la combustión. Las guías sobre emisiones procedentes de la combustión relacionadas con centrales de generación de vapor y energía a partir de fuentes con una capacidad igual o inferior a 50 MW se analizan en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, y las guías sobre emisiones procedentes de centrales de mayor capacidad se analizan en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad para centrales térmicas**. En las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación acerca de consideraciones ambientales basadas en la carga total de emisiones.

Las guías sobre efluentes se aplican a los vertidos directos de efluentes tratados a aguas superficiales de uso general. Los niveles de vertido específicos del emplazamiento pueden establecerse basándose en la disponibilidad y condiciones de los sistemas de tratamiento y recolección de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, basándose en la clasificación del uso del agua receptora que se describe en las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Estos niveles se deben lograr, sin dilución, al menos el 95% del tiempo que opera la planta o unidad, calculado como proporción de las horas de operación anuales. El incumplimiento de estos niveles debido a las condiciones de determinados proyectos locales se debe justificar en la evaluación ambiental correspondiente.

Uso de recursos

En el cuadro 3 se ofrece un ejemplo del consumo de energía y agua en ciertos procesos del sector de la fusión y el refinado, que pueden considerarse indicativos de la eficiencia del sector y se pueden emplear para seguir los cambios de desempeño en el tiempo.

Seguimiento ambiental

Se llevarán a cabo programas de seguimiento ambiental para este sector en todas aquellas actividades identificadas por su potencial impacto significativo en el medio ambiente, durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las actividades de seguimiento ambiental se basarán en indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto.

La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y

utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

Cuadro 1. Emisiones al aire por la fusión y el refinado de níquel, cobre, plomo, zinc y aluminio*

Contaminante	Fuente de emisión (por tipo de metal / proceso de fusión)	Unidades	Valor de referencia
SO ₂	Cobre: Fusión primaria y conversión Plomo y zinc: Fusión primaria, tostación y sinterización Níquel: Tostación y fusión de concentrados y compuestos intermedios sulfurosos		Eficiencia de conversión >99.1% (para ~ 1 – 4 por ciento de escape de SO ₂) Eficiencia de conversión >99.7% (para >5 por ciento de escape de SO ₂)
	Cobre: Fusión secundaria y refinado, refinado a fuego primario y secundario, limpieza de escoria eléctrica y fundición Aluminio: Contención y desgasificación del metal fundido del aluminio primario y secundario Plomo y zinc: Tratamiento previo de materiales, fusión secundaria, refinado térmico, fundición, extracción de vapores de la escoria y operación de crisol waelz	mg/Nm ³	<50 – 200 ^{1,2,3}
NO _x	Cobre: Fusión secundaria y refinado, refinado a fuego primario y secundario, limpieza de escoria eléctrica y fundición Aluminio: Contención y desgasificación del metal fundido del aluminio primario y secundario, tratamiento previo de materiales, y de la fundición y la fusión de aluminio secundario Plomo y zinc: Fundición de material limpio, aleación y producción de polvo de zinc; del tratamiento previo de materiales, fusión secundaria, refinado térmico, fundición, extracción de vapores de la escoria y operación de crisol Waelz Níquel: Lixiviación, extracción y refinado químicos, electroextracción y extracción con solvente; del tratamiento previo de materiales, incinerado o posquemado, tostación, fusión térmica, refinado y fundición	mg/Nm ³	100 – 300 ^{4,5,6}
Nieblas ácidas / Gases	Cobre: Procesos hidrometalúrgicos y de electroextracción Plomo y zinc: Refinado químico, electroextracción y extracción con solvente Níquel: Lixiviación, extracción y refinado químicos, electroextracción y extracción con solvente	mg/Nm ³	50 ^{1,7}
COV / solventes (as C)	Cobre: Procesos hidrometalúrgicos y de electroextracción Plomo y zinc: Refinado químico, electroextracción y extracción con solvente Níquel: Lixiviación, extracción y refinado químicos, electroextracción y extracción con solvente	mg/Nm ³	5 – 15 ⁹
Polvo ²²	Cobre: Fusión secundaria y refinado, refinado a fuego primario y secundario, limpieza de escoria eléctrica y fundición, sistemas de colección de humos secundarios y secado. Aluminio: Electrólisis del aluminio primario, de la contención y desgasificación del metal fundido del aluminio primario y secundario, tratamiento previo de materiales, y de la fundición y la fusión de aluminio secundario Plomo y zinc: Fundición de material limpio, aleación y producción de polvo de zinc; del tratamiento previo de materiales, fusión secundaria, refinado térmico, fundición, extracción de vapores de la escoria y operación de crisol Waelz Níquel: Tratamiento previo de materiales, incinerado o posquemado, tostación, fusión térmica, refinado y fundición	mg/Nm ³	1 – 5 ^{3,10,11}
TOC (como C)	Cobre: Fusión secundaria y refinado, refinado a fuego primario y secundario, limpieza de escoria eléctrica y fundición, sistemas de colección de humos secundarios y secado Aluminio: Tratamiento previo de materiales, y de la fundición y fusión del aluminio secundario Plomo y zinc: Fundición de material limpio, aleación y producción de polvo de zinc; del tratamiento previo de materiales, fusión secundaria, refinado térmico, fundición, extracción de vapores de la escoria y operación de crisol Waelz Níquel: Tratamiento previo de materiales, incinerado o posquemado, tostación, fusión térmica, refinado y fundición	mg/Nm ³	5 – 50 ^{12,13}
Dioxinas	Cobre: Fusión secundaria y refinado, refinado a fuego primario y secundario, limpieza de escoria eléctrica y fundición, sistemas de colección de humos secundarios y secado Aluminio: Tratamiento previo de materiales, y de la fundición y fusión del aluminio secundario Plomo y zinc: Fundición de material limpio, aleación y producción de polvo de zinc; del tratamiento previo de materiales, fusión secundaria, refinado térmico, fundición, extracción de vapores de la escoria y operación de crisol Waelz Níquel: Tratamiento previo de materiales, incinerado o posquemado, tostación, fusión térmica, refinado y fundición	ngTEQ/m ³	0.1 – 0.5 ^{3,10,14,15,16}

Cuadro 1. Emisiones al aire por la fusión y el refinado de níquel, cobre, plomo, zinc y aluminio (continuación)*

Contaminante	Fuente de emisión (por tipo de metal / proceso de fusión)	Unidades	Valor de referencia
Amoniaco	Níquel: Lixiviación, extracción y refinado químicos, electroextracción y extracción con solvente	mg/Nm ³	5 ¹⁷
Cloro		mg/Nm ³	0,5 ^{2,18}
CO y carbonilos		mg/Nm ³	5 ¹⁹
Arsina	Plomo y zinc: Refinado químico, electroextracción y extracción con solvente	mg/Nm ³	0,5 ⁶
Mercurio	Todo tipo de metales / procesos de fusión	mg/Nm ³	0,02
Cloruro de hidrógeno	Aluminio: Contención y desgasificación del metal fundido del aluminio primario y secundario, tratamiento previo de materiales, y de la fundición y la fusión de aluminio secundario	mg/Nm ³	5 ¹
Fluoruro de hidrógeno	Aluminio: Electrólisis del aluminio primario, tratamiento previo de materiales, y de la fundición y la fusión de aluminio secundario	mg/Nm ³	0,5 ^{10,20}
Fluoruro total	Aluminio: Electrólisis del aluminio primario	mg/Nm ³	0,8 ^{10,22}
Hidrocarburos polifluorados		0,1 (efectos anódicos / cuba / día)	

1. Depurador alcalino (filtro semiseco y textil, depurador húmero y alcalino doble usando cal, hidróxido de magnesio, hidróxido de sodio).
2. Combinaciones de sodio o alúmina/sulfuro de aluminio en combinación con cal.
3. Para la fusión con cobre, se puede lograr una concentración en la emisión de SO₂ de 500 mg/m³ mediante el uso de un filtro textil con inyección de cal.
4. Quemador bajo de emisiones de NOx
5. Quemador de oxicomcombustible
6. Depurador oxidante
7. Antiniebla
8. Excluyendo la fusión de aluminio
9. Contenedor, condensador, filtro de carbón y biológico
10. Filtro textil
11. Control de la temperatura
12. Posquemador
13. Combustión optimizada
14. Posquemador seguido de enfriamiento
15. Absorción mediante carbón activo
16. Catalizador de la oxidación
17. Depurador ácido
18. Recuperación y reutilización
19. Control del proceso y reactor sellado
20. Depurador de alúmina
21. Excluyendo la fusión de aluminio
22. Las emisiones de metales dependen de la composición del polvo producido por el proceso. La composición varía y depende de la fuente de polvo del proceso y la materia prima que se está procesando.

Fuente: Basado en parte en UE BREF para el sector metalúrgico no férreo (2001) *Las emisiones asociadas están expresadas en promedios diarios y se han obtenido por observación permanente durante el período de explotación, en condiciones estándar de 273° K, 101,3 kPa, contenido de oxígeno medido y gas seco sin dilución de gases con aire. En los casos en que la observación permanente no resulte viable, el valor será el promedio del período de muestreo. Si se emplean sistemas de limpieza térmica y pirolisis (por ejemplo, secado y decapado del barro de amolado) para destruir los productos de la combustión (por ejemplo, COV y dioxinas) el contenido de oxígeno será 6 por ciento seco.

Cuadro 2. Niveles de efluentes de la fusión y el refinado de níquel, cobre, plomo, zinc y aluminio

Contaminante	Tipo de fusión	Unidades	Valor de referencia
pH	Todas	S.U.	6 - 9
Sólidos suspendidos totales	Todas	mg/l	20
COD	Todas	mg/l	50
Fluoruro	Aluminio	mg/l	5
Hidrocarburos	Aluminio	mg/l	5
Aluminio	Aluminio	mg/l	0,2
Cobre (Cu)	Cobre	mg/l	0,1
Plomo (Pb)	Cobre, Plomo y Zinc	mg/l	0,1
Arsénico (As)	Cobre, Plomo y Zinc	mg/l	0,05
Níquel (Ni)	Níquel, Cobre	mg/l	0,1
Cadmio (Cd)	Cobre, Plomo y Zinc	mg/l	0,05
Zinc (Zn)	Cobre, Plomo & Zinc	mg/l	0,2
Mercurio (Hg)	Todas	mg/l	0,01
Aumento de la temperatura	Todas	°C	< 3 ^a
Toxicidad	A determinar caso por caso		
Fuente: Basado en parte en UE BREF para el sector metalúrgico no férreo ^a Al borde de una zona de mezcla científicamente establecida que toma en cuenta la calidad del agua ambiente, el uso del agua receptora, los receptores potenciales y la capacidades de asimilación			

Cuadro 3. Consumo de energía y agua

Tipo de instalación	Uso de energía (GJ/t) ^a
Cobre—Producción de concentrado	14 – 20
Cobre—Electrorefinado	1,1 – 1,4
Producción de alúmina	8 – 13,5
Aluminio—Producción primaria (electrólisis, incluida la producción anódica)	53 – 61
Plomo—Horno de cuba, primario	6,8 – 10,3 ^b
Plomo—Horno de cuba, secundario	4,4 – 5,5 ^b
Plomo—Horno rotativo, secundario, con sistema CX y producción de Na ₂ SO ₄	4,0 – 4,7 ^b
Plomo—QSL	2,3 – 3,5 ^b
Plomo—Kivcet	4,9 ^b
Plomo—Horno rotativo con lanza	4,0 – 4,4 ^b
Zinc—Electrólisis	15
Zinc—Horno de fusión imperial y destilación New Jersey	44 ^b
Zinc—Crisol Waelz	26 ^{b,c}
Zinc—Extracción de vapor de escoria	7,7 ^{b,d}
Níquel—Mata de metales sulfurados que contengan 4 – 15% Ni	25 – 65
Níquel-refinado	17 - 20
Tipo de instalación	Uso de agua (kg/t)
Producción de alúmina	1000 – 6000
Aluminio—Producción primaria (electrólisis, incluida la producción anódica)	200 - 12000
Fuente: UE BREF para el sector metalúrgico no férreo	
Notas:	
a Gigajulios (10 ⁹ Julios) por tonelada	
b Calculado en función de las cantidades de coque, carbón, gas natural y energía eléctrica y los valores calóricos típicos de los hidrocarburos	
c Por tonelada de óxido Waelz lixiviado	
d Por tonelada de escoria	

2.2 Higiene y seguridad ocupacional

Guías sobre higiene y seguridad ocupacional

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre la materia que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)¹⁹, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)²⁰, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)²¹, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea²² u otras fuentes similares.

Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e incluso la muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)²³.

Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y realizadas por profesionales acreditados²⁴ como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **guías generales sobre MASS** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

¹⁹ Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>.

²⁰ Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>.

²¹ Disponibles en: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992.

²² Disponibles en: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/.

²³ Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

²⁴ Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

3.0 Referencias y fuentes adicionales

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (OSHA). Occupational Exposure Limits. Disponible en: http://osha.europa.eu/good_practice/risks/ds/oe/

American Council of Government Industrial Hygienists (ACGIH). 2006. Threshold Limit Values (TLV) and Biological Exposure Indices (BEI). Cincinnati, OH. Disponible en: <http://www.acgih.org/TLV>

Ayres, R. U., L.W. Ayres y I. Rade. 2002. The Life Cycle of Copper its Co-Products and By-products. Mining, Minerals and Sustainable Development Report, International Institute for Environment and Development (IIED). Londres: IIED. Disponible en: http://www.iied.org/mmsd/mmsd_pdfs/ayres_lca_main.pdf

Bergsdahl, H., A.H. Stomman, E.G. Hertwich. 2004. The Aluminium Industry. Environment Technology and Production. Disponible en: http://www.indecot.ntnu.no/indecotwebnew/publications/reports/rapport04/rapport18_04web.pdf

Comisión Europea. 2001. Oficina Europea sobre Contaminación y Control Integrados (EIPPCB). Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en el sector metalúrgico no férreo. Sevilla: EIPPCB. Disponible en: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

Corporación Financiera Internacional (CFI) Grupo Banco Mundial. 2006a. Draft General Environmental Health and Safety Guidelines. Disponible en: http://www.ifc.org/ifcext/policyreview.nsf/Content/EHSGuidelinesUpdate_Comm ents

Environment Canada. 2006. Environmental Code of Practice. Canadian Environmental Protection Act, 1999. Base Metals Smelters and Refineries. Document EPS 1/MM/11E. Gatineau, Québec: Environment Canada. Disponible en <http://199.212.18.76/ceparegistry/documents/code/smelters/toc.cfm>

Indian Central Pollution Control Board (CPCB). National Air Quality Monitoring Programme (NAMP). National Ambient Air Quality Standards. Delhi: CPCB. Disponible en: <http://www.cpcb.nic.in/as.htm>

Indian Central Pollution Control Board, Environmental Standards, Inorganic Chemical Industry, Wastewater Standard. Disponible en: <http://www.cpcb.nic.in/index.php>

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 2005. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. NIOSH Publication No. 2005-149. Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

Natural Resources Canada. 2006. Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries. In Partnership with the Canadian Foundry Association. Disponible en: <http://oee.nrcan.gc.ca/cipec/ieep/newscentre/foundry/index.cfm?atlr=24>

The Níquel Institute. 2003. Lifecycle Assessment Data. Overall Inventories and Potential Impacts: Ferronickel, Nickel Oxide, and Class I Nickel. Última revisión del 31 de octubre de 2003. Disponible en: http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/317.htm

Norgate, T. E. & Rankin, W. J., 2002. 'An Environmental Assessment of Lead and Zinc Production Processes', Proceedings, Green Processing 2002, International Conference on the Sustainable Processing of Minerals, mayo de 2002, pp 177-184. Disponible en: http://www.minerals.csiro.au/sd/CSIRO_Paper_LCA_PbZn.pdf

Occupational Health and Safety Administration (OHSA). 2006. Standards – 29 CFR TABLE Z-1 Limits for Air Contaminants. - 1910.1000 TABLE Z-1 Permissible Exposure Limits. Disponible en: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARD&p_id=9992

Occupational Health and Safety Administration (OHSA). Occupational Health and Safety Administration System 18001 Occupational Health and Safety Management System. Disponible en: <http://www.ohsas-18001-occupational-health-and-safety.com>

Organización Internacional para la Normalización (ISO). ISO 14001 Environmental Management Systems Standards. Disponible en: <http://www.iso.org/iso/en/stdsdevelopment/whowhenhow/how.html>

Organización Mundial de la Salud (OMS). 2005. Air Quality Guidelines Global Update. Ginebra: OMS. Disponible en: <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>

OMS. 2000. Air Quality Guidelines for Europe. 2nd Edition. Ginebra: OMS. <http://www.euro.who.int/document/e71922.pdf>

Price, L. Worrell, J.S., Sinton, J y J. Yun. 2001. Industrial energy efficiency policy in China. The Proceedings of the 2001 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. Disponible en: <http://ies.lbl.gov/iespubs/50452.pdf>

Unión Europea. 1999. Directorio de Legislación Comunitaria. EurLex. Directiva 1999/30/CE del Consejo de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente. Bruselas: UE. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0030:ES:HTML>

United Kingdom (UK) Department of Environment Food and Rural Affairs. 2000. The Air Quality Strategy for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. Enero de 2000. Working Together for Clean Air. Disponible en: <http://www.defra.gov.uk/environment/airquality/strategy/strategy.htm>

UK Health and Safety Executive. 2006a. Health and Safety Commission. Health and Safety Statistics 2005/06. Disponible en línea en: <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

UK Health and Safety Executive. 2006b. Health and Safety Commission. Statistics of Fatal Injuries 2005/06. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>

United States (US) Department of Labor. 2003. Bureau of Statistics. Injuries, Illness and Fatalities Program. Table R8. Incidence rates for nonfatal occupational injuries and illnesses involving days away from work per 10,000 full-time workers by industry and selected events or exposures leading to injury or illness, 2003. Disponible en: <http://www.bls.gov/iif/oshwc/osh/case/ostb1386.pdf>

United States (US) Environmental Protection Agency (EPA). 2006a. Air Toxics. Final Rules. Emission Standards for Hazardous Air Pollutants. Washington, DC: US EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/atw/mactfnlaph.html>

US EPA. 2006b. Proposed National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Area Sources: Polyvinyl Chloride & Copolymers Production, Primary Copper Smelting, Secondary Copper Smelting, & Primary Nonferrous

Metals Zinc, Cadmium and Beryllium. Washington, DC: US EPA. Disponible en:
<http://www.epa.gov/ttn/atw/mactfnlalp.html>

US EPA. 2005. Final Rule National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Aluminium Reduction Plants: Final rule; amendments. Washington, DC: US EPA. Disponible en
<http://www.epa.gov/ttn/atw/alum/alumpg.html>

US EPA. 2002. Final Rule. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Copper Smelting-Final rule. Washington, DC: US EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/atw/copper/copperpg.html>

US EPA. 2000. Federal Register Effluent Limitations Guidelines 40 CFR 125.30 - 125.32. Effluent Limitations Guidelines, Pre-treatment Standards, and New

Source Performance Standards for the Commercial Hazardous Waste Combustor Subcategory of the Waste Combustors Point Source Category. Washington, DC: US EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WATER/2000/January/Day-27/w2019.htm>

US EPA. 1999. Final Rule. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants Primary Lead Smelting. Washington, DC: US EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/atw/leadp/leadppg.html>

U.S. National Institute of Environmental Health Sciences. 2002. EMF Questions and Answers. EMF Rapid. Electric and Magnetic Fields Research and Public Information and Dissemination Program. Disponible en línea en: <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/booklet>.

Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

Fusión y refinado de metales base

Las fases del proceso de fusión y refinado de metales base (cobre, plomo/zinc y níquel)²⁵ son similares y se muestran en la gráfica A.1. El proceso de fusión del aluminio se describe posteriormente en este anexo. Dependiendo del grado y el tipo de mena (por ejemplo, mena con azufre o laterita) se pueden recuperar ciertos metales residuales, como oro, plata, cadmio, arsénico, selenio, etc., como productos derivados:

Tratamiento previo

El tratamiento previo consiste en la concentración de la mena mediante molturación y secado de los concentrados fluidizados, y la selección/separación de chatarras para obtener una materia prima adecuada para el procesamiento adicional.

Tostación

La tostación es un proceso pirometalúrgico en el que se calienta/seca y oxida el material concentrado para obtener un contenido sulfuroso que se considera óptimo para la fusión. La tostación incompleta sirve para preparar los sulfuros de cobre y níquel para la fusión de matas, mientras que la tostación completa elimina el azufre y se utiliza en la producción de óxido de metal para 1) reducción por carbono o monóxido de carbono o 2) lixiviación en ácido sulfúrico seguida de electroextracción. Cuando es eficaz en función de los costos, se recupera el dióxido de azufre emitido durante la tostación como ácido sulfúrico o dióxido de azufre licuado, o se elimina el dióxido de azufre mediante el tratamiento de los gases de escape.

Fusión

La fusión produce metales fundidos y se emplea para separar los metales valiosos de los menos valiosos y las impurezas

mediante un proceso denominado fundición. El metal concentrado procedente de la tostación se agrega al horno junto con fundentes, combustible y oxígeno. La combustión y la oxidación se producen en el horno y provocan la fundición y la separación parcial de los metales. El resultado de la fusión es la concentración de metales en forma de mata fundida (cobre, níquel, zinc) o bullón (plomo). La mata se puede moldear o se puede dejar enfriar antes de continuar el proceso. Los gases de escape del proceso se capturan en los conductos del horno o las cubiertas superiores y se trata para eliminar el dióxido de azufre, la materia particulada, los humos, etc. La escoria de la fusión se trata normalmente para recuperar los metales valiosos residuales.

Conversión

La conversión se utiliza para eliminar el azufre y el hierro residual en la mata de cobre y níquel. La chatarra de alto grado también se puede procesar en convertidores. Los gases del proceso se enfrían y se eliminan las partículas mediante dispositivos de limpieza. Se emplean convertidores tanto de lote como continuos; los convertidores continuos permiten una mejor captura de los gases emitidos en el proceso y el uso de oxígeno en lugar de aire, lo que genera una alta concentración de dióxido de azufre que puede capturarse para producir ácido sulfúrico²⁶. La mata (sulfuros de cobre-hierro) procedente de la fusión se carga en los convertidores en los que el material molturado se oxida gracias a la presencia de aire para eliminar las impurezas de hierro y azufre (en forma de escoria del convertidor). Los óxidos forman una escoria que se despuma. La escoria con altas concentraciones de cobre/níquel generada durante el proceso de conversión se vuelve a fusionar para recuperar el cobre y el níquel. Se pueden procesar las escorias

²⁵ Environment Canada – Environmental Code of Practice, Canadian Environmental Protection Act. Base Metals Smelters and Refineries.

²⁶ Los metales relativamente volátiles como el zinc y el plomo también pueden recuperarse del gas de escape.

en un horno eléctrico antes de descartar la recuperación del níquel.

Refinado a fuego o anódico

El refinado a fuego se utiliza para eliminar las impurezas y reducir los niveles de azufre y oxígeno en el cobre negro antes de moldearlo o electrorefinarlo. El cobre negro se vuelve a refinar para obtener cobre refinado o cobre anódico (99,5% de pureza), que se utilizan en el subsiguiente electrorefinado. El cobre negro fundido se introduce en un horno de refinado a fuego, en el que se puede agregar fundente, y se ventila la mezcla fundida para eliminar el azufre residual. La ventilación genera oxígeno residual, que se elimina mediante la adición de gas natural, propano, amoníaco o leña. El cobre refinado a fuego se moldea en forma de ánodos para su refinado adicional mediante procesos electrolíticos o se moldea en diferentes formatos para su venta.

Electrorefinado

El electrorefinado se emplea en el refinado de cobre, níquel y plomo con el fin de obtener una forma purificada del metal a partir de un metal menos puro. Se utiliza una cuba electrolítica, en la que el metal forma un ánodo, para disolver el metal en un electrolito ácido y acuoso o sales fundentes. El metal puro se recubre mediante galvanoplastia o se coloca sobre placas de arranque que actúan como cátodos. Las impurezas metálicas se disuelven en el electrolito o se precipitan y forman normalmente un lodo. Los barros anódicos generados en el proceso contienen metales preciosos que se recuperan posteriormente. Los depósitos catódicos se moldean con diferentes formatos. Las soluciones electrolíticas impuras se purifican para eliminar las impurezas no deseadas y reciclarlas en el proceso de electrorefinado. Las impurezas extraídas se vuelven a procesar para recuperar metales valiosos.

Refinado de carbonilo

El refinado de carbonilo sirve para refinar el óxido de níquel bruto. Se agrega monóxido de carbono al óxido de níquel bruto y se forma carbonilo de níquel bajo presión elevada. El carbonilo de níquel es altamente volátil y se separa por lo tanto de las impurezas sólidas y se recupera del flujo de gas de escape. Al aumentar el calor se desprende monóxido de carbono y se produce polvo o gránulos de níquel. En el proceso se recicla el monóxido de carbono emitido.

Lixiviación

La lixiviación, que se produce antes del refinado y la electroextracción, conlleva la disolución del metal procedente de menas/concentrados en ácido o solvente. El metal lixiviado se encuentra generalmente en forma oxidada. Las menas sulfurosas se lixivian con menos frecuencia porque exigen condiciones favorables para la oxidación. La solución resultante, conocida como solución cargada de lixiviación se procesa mediante la extracción con solventes y se purifica antes de la electroextracción y el refinado.

Electroextracción

La electroextracción se usa para refinar el cobre y el níquel y consiste en la recuperación de metales disueltos en la solución "cargada" durante la lixiviación. La solución electrolítica purificada del proceso de lixiviación se introduce en cubas con ánodos inertes y cátodos de arranque. Los iones metálicos disueltos se depositan en el cátodo como consecuencia de la aplicación de corriente eléctrica a la cuba. La electroextracción genera oxígeno, niebla ácida y desechos de electrolitos (que se vuelven a lixiviar para su reutilización). Los cátodos se comercializan y el metal se arranca y moldea.

Moldeo

En el proceso de moldeo, el metal se funde y pasa por un horno de retención y un moldeador en el que se producen diferentes formatos de metal. El moldeo puede ser continuo o estacionario. En el moldeo estacionario se usa una rueda con

una serie de moldes que se enfrían mediante chorros de agua. El moldeo continuo se emplea para la producción de cable. Los tubos se extrusionan a partir de palanquillas calentadas. Las planchas y las barras de metal se producen a partir de placas y tortas precalentadas que se enrollan para darles forma. Para la producción de lingotes se utilizan moldes fijos.

Fabricación de aluminio

La producción de aluminio empieza por la extracción y el beneficio de la bauxita. En la mina se traslada la mena de bauxita a un triturador y el resultado se filtra y almacena para su procesamiento en una planta de alúmina. En algunos casos, se mejora la calidad de la mena mediante beneficio (lavado, clasificación por tamaño, separación líquido/sólido) para eliminar los materiales no deseados como la arcilla y el silicio.

En la planta de alúmina, se vuelve a triturar y/o moler la mena de bauxita hasta obtener el tamaño correcto de las partículas para la extracción eficiente de la alúmina, mediante digestión con licor caliente de hidróxido de sodio. Tras la extracción de una mezcla de óxidos metálicos conocida como "barro rojo" y los sólidos fines del licor de procesamiento, se precipitan e incineran los cristales de trihidrato de aluminio en crisoles rotativos o en incineradores con solera fluidizada. Algunos procesos de la alúmina incluyen una fase de purificación del licor.

El aluminio primario se produce mediante la electrolisis de la alúmina. La alúmina fundida se disuelve en un baño de criolita (Na_3AlF_6) al que se aplica una corriente eléctrica que provoca la disociación de la alúmina en forma de aluminio líquido en el cátodo y oxígeno en el ánodo. El oxígeno hace reacción con el carbono en el electrodo para producir dióxido de carbono y monóxido de carbono. El aluminio fundido se acumula en el fondo de cada cuba o cazo y se extrae mediante sangrado al vacío. Esta electrolisis se realiza gran escala con un alto

número de cazos conectados en serie, lo que genera un fuerte campo magnético en el lugar de producción.

Las materias primas para la producción de aluminio secundario son la chatarra, los chips y la escoria. El tratamiento previo de la chatarra mediante desmenuzado, filtrado, separación magnética, secado, etc., tiene como objetivo la eliminación de sustancias no deseadas, que afectan tanto a la calidad del aluminio como a las emisiones a la atmósfera. El proceso predominante para la producción de aluminio secundario es la fusión en crisoles rotativos bajo una cobertura de sales. Se pueden procesar y reutilizar las escorias de la sal. Otros procesos, como la fusión en hornos de inducción y de reverberado, no necesitan sal o requieren mucha menos sal y conllevan una menor demanda de energía. Sin embargo, sólo son adecuados para la chatarra de alta graduación. Puede ser necesario un refinado adicional dependiente de la aplicación deseada.

Gráfico A.1: Módulos de procesamiento para fusión y refinado

