

5. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS GENERALES PARA CAPTURA Y TRATAMIENTO DE GASES SECUNDARIOS Y FUGITIVOS

5.1 General

Desde los años 70, comenzó un fuerte impulso en el desarrollo de mejora de los proceso de fusión de concentrados y principalmente del desarrollo de nuevas tecnologías, como consecuencia de las presiones crecientes de sectores ambientalistas, que exigían el cierre de las fuentes generadoras de contaminantes como el SO₂.

En las décadas siguientes no solo se desarrollaron nuevas tecnologías de fusión y refinación, sino que también procesos continuos en los cuales los metales líquidos son transferidos por canales cubiertas, desde la fusión a la conversión y a continuación al refino a fuego, disminuyéndose drásticamente las emisiones de SO₂ a la atmosfera.

Los avances y mejoras tecnológicas se expandieron en todos los procesos involucrados en las fases de fusión, conversión, refino a fuego, limpieza de escoria, manejo de gases y limpieza de polvos, como también en la fijación del azufre como ácido sulfúrico, SO₂ líquido y azufre elemental.

En el presente capítulo nos enfocaremos en los puntos importantes de emisión de contaminantes de las distintas unidades de proceso de una fundición y las mejoras tecnológicas que puedan implementarse, ya que se encuentran maduras luego de largos años en operación y que han mostrado su fiabilidad, desempeño seguro, eficiente y económico, con el objeto de mejorar el desempeño ambiental de ella, con una mirada costo/ efectividad.

Las emisiones a la atmósfera incluyen tanto las emisiones capturadas y emitidas por chimeneas como las emisiones fugitivas no capturadas de dichas fuentes, usualmente por problema de uniones, sellos o roturas (orificios) y transferencias

abiertas (por ejemplo trasvasije de líquidos fundidos con ollas movidas por puente-grúas, realidad en todas las fundiciones chilenas).

Teniendo en consideración los mejores niveles de captación que se han logrado con las modernas tecnologías de fusión y tratamiento de gases, en la actualidad las emisiones fugitivas se han constituido en la principal contribución a las emisiones totales a la atmósfera de las fundiciones de cobre, y que en el caso chileno actualmente superan el 60% del total emitido.

Para fundiciones de cobre primario, las emisiones totales a la atmósfera tienen las siguientes fuentes principales:

- Recepción, almacenamiento, mezcla, transferencia y muestreo de los materiales; secado de concentrados.
- Hornos de fusión, conversión, refinado a fuego y moldeo de ánodos con la transferencia asociada de metal, sistemas de manipulación y limpieza de gases calientes.
- Limpieza de escorias, incluyendo los trasvasijos de sus productos como la granulación de escorias y el sistema de manipulación de escorias; en esto se incluye las emisiones de un eventual procesamiento vía chancado, molienda y flotación.
- La sección de enfriamiento y limpieza húmeda de gases y la planta de ácido sulfúrico.

Para mejorar el desempeño ambiental de la industria de fundición y refinación de metales no ferrosos, la Comisión Europea a través de su Oficina para la Prevención y Control Integrados de la Contaminación, también conocida como la European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (IPPC) publicó en el año 2002 el documento de referencia europeo de la Mejores Tecnologías Disponibles (MTD) en la Industria de Metales No Férreos, conocido también como documento BREF.

En el capítulo 2 de dicho documento, se presenta una revisión general de las mejores tecnologías disponibles para la industria de metales no ferrosos, y en el capítulo 3 una revisión de las MTD en la industria de fundiciones y refinación de cobre.

En base a la información anterior, a continuación se presenta un resumen de las MTD recomendadas por operaciones unitarias de una fundición primaria de cobre, validada, complementada y priorizadas según la experiencia del Consultor.

Tabla 5.1 Mejores técnicas disponibles en Industria de metales no ferrosos

RECEPCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • espesador/filtros (recibe pulpa) • buzones • cancha cerrada/concha/galpón
ALMACENAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • buzones • cancha cerrada o domo/galpón.
MEZCLA	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla en correa o en cañería • Mezcla en buzones c/grúa puente • Mezcla c/reclaimer en galpón
HORNO DE SECADO	<ul style="list-style-type: none"> • Secador indirecto (vapor u otro) • Secador fluosólido c/combustible • Secador rotatorio c/combustible
HORNO DE TOSTACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Horno fluosólido • Horno de pisos
HORNO DE FUSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Vanyukov • Flash Outokumpu • ISA/Ausmelt • Noranda/Teniente • ConTop.
PROCESOS INTEGRADOS	<ul style="list-style-type: none"> • Flash fusión/Flash conversión • Mitsubishi fusión/conversión
LIMPIEZA ESCORIA	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación • Eléctrico rectangular • Mitsubishi
CONVERSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Outokumpu Flash Converter • Hoboken • Peirce Smith
REFINO A FUEGO	<ul style="list-style-type: none"> • Horno basculante cilíndrico • Horno basculante de cuba
CONTROL DE EMISIONES FUGITIVAS	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilador de tiro inducido por equipo de fusión-conversión. • Campana secundaria hornos fusión y conversión • Campanas en sangrías y canales de eje y metal blanco

CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO Y METALES	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriadores de gases(cámaras de expansión) • Filtro de mangas. • Precipitadores electrostáticos secos • Precipitadores electrostáticos húmedos • Scrubber
FIJACIÓN DE AZUFRE	<ul style="list-style-type: none"> • Planta de ácido de contacto doble • Planta de ácido de gases húmedos de baja concentración de SO₂ (WSA) • Planta de ácido por oxidación de SO₂ con agua oxigenada • Desulfuración con lechada de cal

Fuente: European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (IPPC), 2002, Cap. 2 y 3.

Es claro que la forma directa de mejorar el comportamiento ambiental de nuestras fundiciones, sería considerar el reemplazo de las actuales tecnologías de fusión y de conversión, por las mejores tecnologías existentes en la actualidad, pero ello ha sido descartado por corresponder a cambios estructurales de una fundición, que es un aspecto básico del estudio definido como no abordable.

5.2 Recepción y Almacenamiento de Concentrados.

Una operación común en todas las fundiciones es la recepción de concentrados, fundentes y circulantes internos, los cuales deben ser manejados y dispuestos por separado, para la posterior preparación de la carga para la unidad de fusión.

Para un adecuado control de la contaminación por material particulado y pérdidas de concentrados, los camiones tolvas deben ser cubiertos con carpas y la descarga del concentrado efectuada sobre parrillas en piso con tolvas subterráneas y conducción del concentrado en correas transportadoras encapsuladas. El sector de descarga de los camiones tolvas, debe estar cerrado en su perímetro por una cerca de al menos 3 metros de altura y en localidades con vientos reinantes por sobre 50 kph la altura del cierre debe ser mayor.

El acopio del concentrado húmedo (8% a 12% de humedad) debe ser completamente cerrado, idealmente con un domo (tendencia actual por seguridad, costo de inversión y operación).

Con la implementación de las medidas indicadas, se tiene un control adecuado de la emisión de material particulado y un control estrictamente necesario para la recuperación de cobre de la fundición y la viabilidad económica del negocio fundición.

También la preparación y almacenamiento del material circulante (producto del enfriamiento intermedio de materiales como mata/MB y escorias) debe incorporar medidas de control de material particulado.

5.3 Secado de Concentrados.

La totalidad de las fundiciones nacionales tienen la necesidad de secar sus concentrados (como mínimo a 0,2% de humedad), requeridos por las tecnologías de fusión en uso actualmente, esta operación se realiza con secadores de tipo rotatorio, a vapor o de lecho fluidizado.

Una adecuada operación de secado, debe realizarse a temperaturas no mayores a 120° C, para evitar la formación de vapores de elementos volátiles (As, Hg y otros). Los que utilizan combustible de bajo azufre (petróleo diesel o gas natural), generan emisión menor o igual a 50ppm de SO₂. Mayores emisiones de este contaminante, es un indicador de una operación fuera de los parámetros óptimos de diseño.

Para el control del arrastre de material particulado (concentrado seco) se emplean filtros de bolsa o de mangas (eficiencia de captación mayor o igual a 99,5% y una emisión menor o igual a 1 – 5 mg/Nm³) y precipitadores electrostáticos secos (eficiencia de captación mayor o igual a 99% y una emisión menor o igual a 5 – 15 mg/Nm³).⁷

⁷ Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) Documento BREF

Los niveles de captura del material particulado, indicados en el párrafo anterior se refieren a instalaciones operando en óptimas condiciones. Cualquier deterioro en los equipos disminuye fuertemente los niveles de captura del MP.

El transporte del concentrado seco, producto del secado, debe ser transportado sólo mediante transporte neumático hacia silos de almacenamiento especialmente diseñado para este efecto.

5.4 Proceso de Fusión, Conversión, Limpieza de Escoria y Refino

En el análisis de las 7 fundiciones existentes en el país se distinguen 2 configuraciones tecnológicas para los procesos de fusión, conversión y limpieza de escorias:

- Fundición con proceso de secado, fusión flash, conversión batch CPS, refinación batch, en dos fundiciones existentes.

Dentro de esta configuración existen 2 alternativas para el tratamiento de escorias de fusión y conversión.

- a) Tratamiento de escoria vía flotación.
 - b) Tratamiento piro de escorias HLE u HE.
- Fundición con proceso de secado, fusión CT o reactor Noranda, conversión batch CPS, refinación batch, en cinco fundiciones existentes.
- a) Tratamiento de escoria vía flotación.
 - b) Tratamiento piro de escorias HLE u HE.

En el capítulo 3 se indicaron los diagramas de bloques de ambas configuraciones, y en ellos se muestra claramente que las emisiones contaminantes se generan en

puntos específicos de la cadena de procesos unitarios, donde será necesario analizar las soluciones posibles que existen en el mercado.

En la primera configuración tecnológica, los puntos de emisión de contaminantes (gaseosos y material particulado) son los que se indican a continuación:

- Gases fugitivos en sangrías, canales y ollas unidad de fusión
- Gases fugitivos en campana primaria CPS
- Gases residuales en campana secundaria y fugitivo de ollas CPS
- Gases secundarios de limpieza de escoria Piro
- Gases en enfriamiento escoria a flotación.
- Gases secundarios en HA de refinación.
- Gases de cola PAS.

En la segunda configuración tecnológica, los puntos de emisión de contaminantes son los que se indican a continuación:

- Gases fugitivos en boca/campanas unidad de fusión
- Gases fugitivos en sangrías, canales y ollas unidad de Fusión
- Gases fugitivos en boca/campana primaria CPS
- Gases fugitivos en campana secundaria y ollas CPS
- Gases secundarios de limpieza de escoria Piro
- Gases en enfriamiento escoria a flotación
- Gases secundarios en HA de refinación
- Gases de cola PAS

5.4.1 Unidad de Fusión

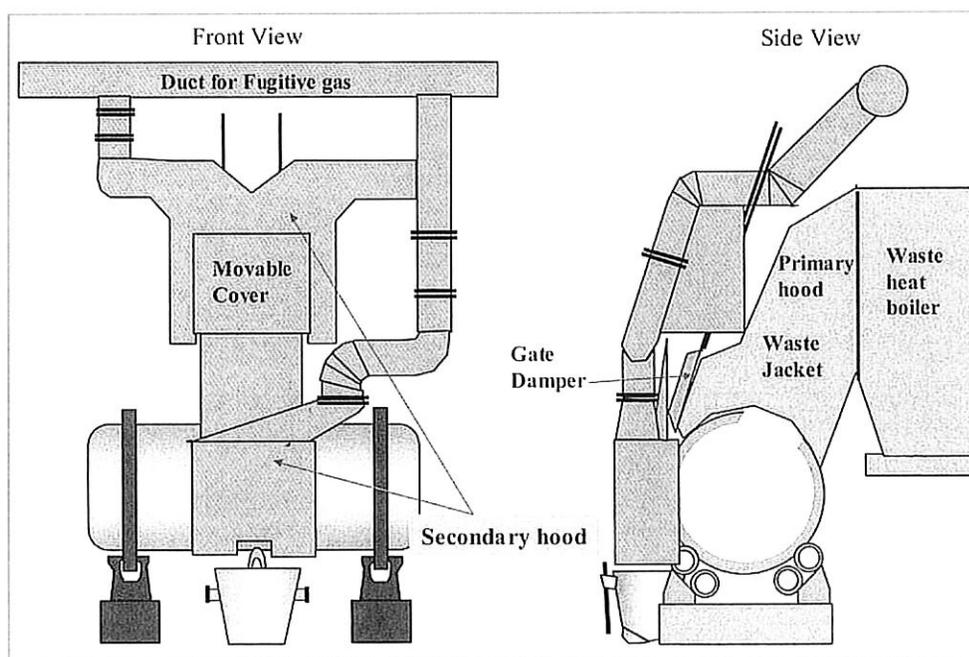
La unidad de **fusión flash** es eficiente ambientalmente por ser una unidad cerrada, donde no se observan gases, salvo en las sangrías de eje, escoria y canales de conducción de los líquidos a las ollas.

Por lo tanto, en esta unidad de fusión solo es necesario el control de los gases fugitivos, los cuales son captados generalmente con pequeñas campanas localizadas sobre las sangrías, canales y ollas. Una vez capturados estos gases, se mezclan en un ducto común y luego son conducidos fuera de la nave para su tratamiento en una planta que idealmente procesa todos los gases fugitivos. En su conjunto, estos equipos de captaciones de gases fugitivos pueden alcanzar captaciones en torno al 50 a 60% de los gases y MP, y la fijación dependería del proceso a utilizar, en torno al 70 a 90% del gas tratado.

En las unidades de **fusión CT y Noranda (similares por su diseño)**, en ciertas circunstancias se producen emisiones de gases de proceso en las campanas, que captan los gases. Esta situación es causada por un tiraje insuficiente del VTI en el tren de gases, generándose internamente una presión positiva en el interior de la campana, que proyecta los gases hacia fuera. Cuando esta situación se hace frecuente, como consecuencia de un desequilibrio entre la generación de gases de fusión y la capacidad de captura de ellos, la solución es instalar una **campana secundaria** que capture estos gases, para ser conducidos fuera de la nave, para su posterior tratamiento, abatiendo el MP, SO₂ y los elementos volátiles como el As, Hg, Pb y otros.

En la actualidad, no existe un CT operando con campana secundaria, sin embargo, conceptualmente esto es posible, una campana secundaria sería similar a la mostrada en el sketch de la figura 5.4.1.a, donde se destaca la campana secundaria diseñada, y los ductos de aspiración y captura de los gases emitidos que se encuentran por sobre la campana primaria.

Figura 5.4.1.a Sketch de una campana secundaria y captación de gases fugitivos provenientes de olla en convertidor Peirce Smith.



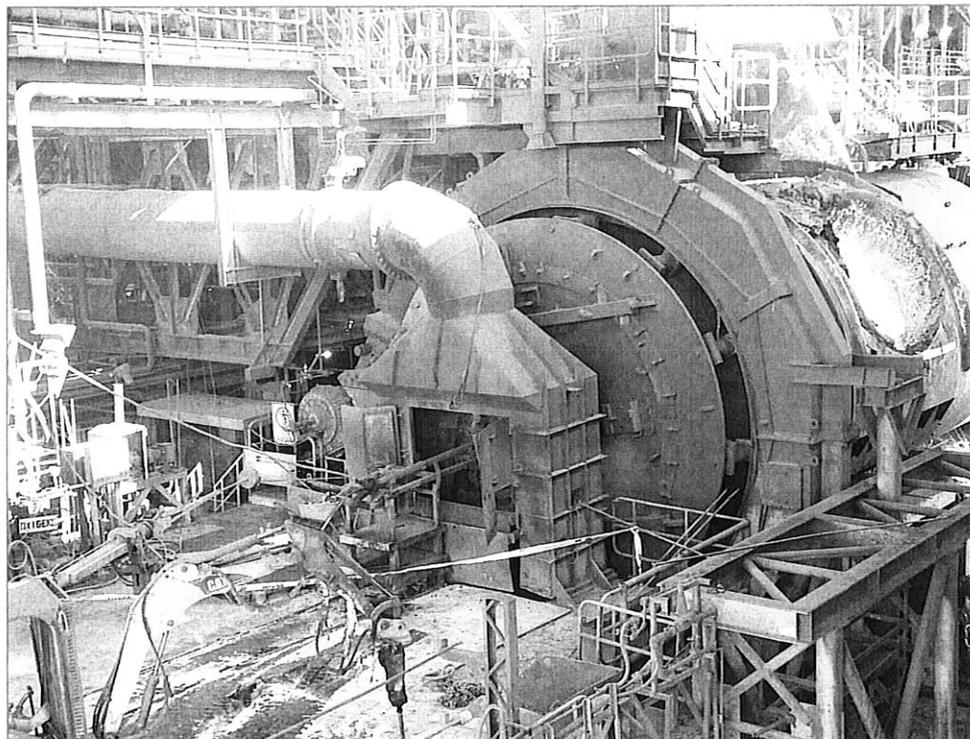
Fuente: International Peirce Smith Converting Centennial, publication of TMS, 2009, p. 158.

Como se aprecia en la figura, se requiere de una altura apreciable entre la campana primaria y los rieles porta grúas, para permitir la instalación de la campana secundaria, situación no siempre posible.

Dichos sistemas deben permitir la operación de equipos mecanizados de apertura y tapado de pasaje de sangría, y el giro del reactor en caso de ser necesario.

En la figura 5.4.1.b se observa una fotografía que muestra una instalación de captación de gases fugitivos, desde la sangría de metal blanco.

Figura 5.4.1.b Sistema de captación de gases fugitivos desde sangría



Fuente: Base de datos Coprim.

5.4.2 Unidad de Conversión

Actualmente entorno al 90% del cobre blíster generado en las fundiciones del mundo se obtiene utilizando convertidores Peirce Smith (CPS), debido a la química elemental e involucrada en el proceso y a la simplicidad de su operación.

El equipo durante el proceso, está en etapa de soplado y la boca está conectada con la campana recolectora de gases, el equipo recibe su carga y descarga de producto por la boca, por lo cual el equipo necesita rotar. Esta necesidad requiere de una cierta holgura entre manto y campana, que posteriormente permitirá el ingreso de aire falso o en su defecto permitirá el escape de gases fugitivos.

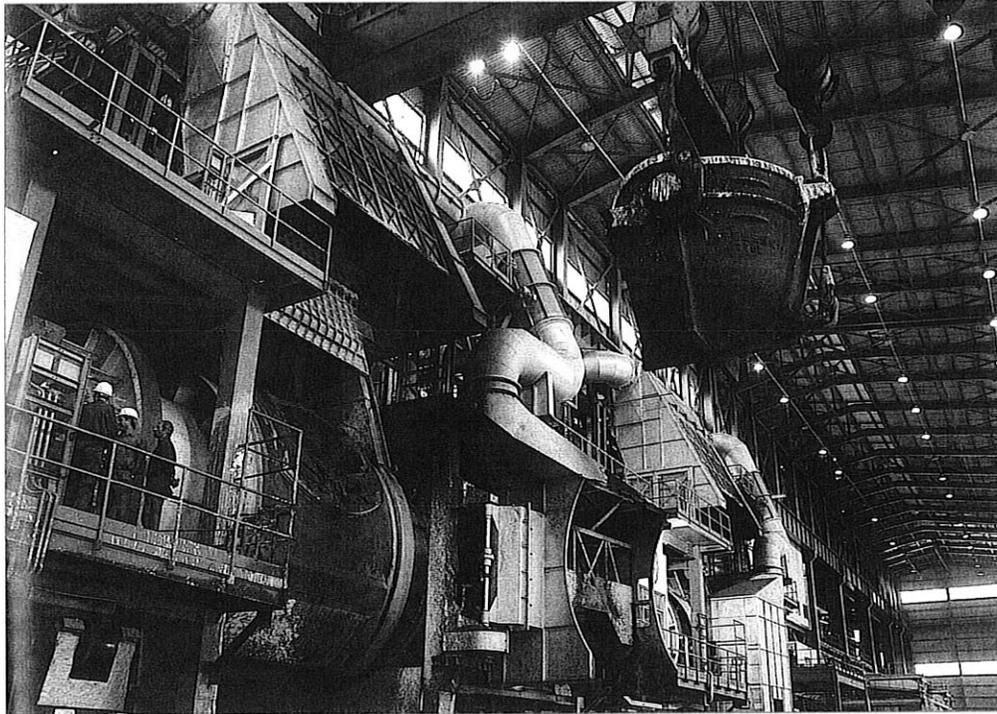
Sin embargo, el equipo presenta deficiencias importantes del punto vista medioambiental, provocadas básicamente por su condición de proceso batch, que requiere de etapas de carguío de eje/MB y vaciado del cobre blíster, operaciones en las cuales el equipo rota, saliendo la boca fuera de la campana de gases y consecuentemente emitiendo estos gases, a la atmósfera.

Por las razones antes indicadas, se han desarrollados soluciones para contrarrestar en parte las deficiencias antes indicadas, como las campanas secundarias, el encierro de la olla durante su vaciado y finalmente el encapsulado del convertidor en su conjunto.

Sin embargo, estas soluciones requieren disponer de altura suficiente de la nave de conversión para su instalación y no interferir el normal desplazamiento de los puentes grúas. Desde este punto de vista, para las fundiciones con naves de poca altura, el único camino es buscar solución en campana secundaria que estén compuestas por ductos aspiradores (picos de pato) transversales y laterales, por sobre la campana primaria.

En fundiciones con tamaño de nave adecuada, la mejor solución es la campana secundaria y además un sistema envolvente para cubrir el vaciado de ollas.

Figura 5.4.2.a Sistema de campana secundaria y captura de gases fugitivos de olla

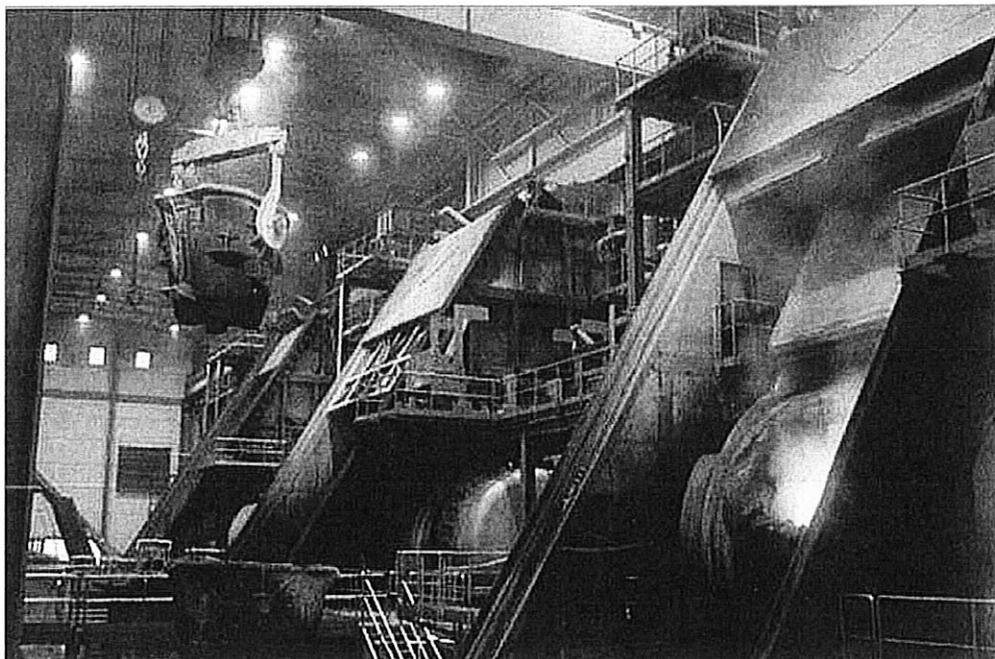


Fuente: Catalogo NICICO, National Iranian Copper Industries Co, Khatoonabad copper smelter.

En la figura se observa con nitidez una campana secundaria diseñada para CPS, por sobre la primaria y que en este caso esta complementada con un sistema envolvente utilizado para el sacado de ollas y por lo tanto, también colecta los gases fugitivos generados en esta operación. Un conjunto de equipos de captación como el indicado puede alcanzar captaciones de S y As por sobre el 98%.

Existen otros diseños desarrollados de campanas secundarias, como el mostrado en la figura 5.4.2.b que es muy diferente al mostrado en la figura 5.4.2.a pero que conceptualmente cumplen con el objetivo de capturar gases fugitivos no captados por la campana primaria y adicionalmente captar los gases fugitivos del vaciado de ollas.

Figura 5.4.2.b Diseño tipo Outotec de campana secundaria



Fuente: International Peirce Smith Converting Centennial, publication of TMS, 2009, p. 58.

5.4.3 Unidad de Limpieza de Escoria

Este proceso tiene como objetivo actuar como reductor y decantador del óxido de hierro para permitir la separación de las partículas de MB, del resto de escoria.

En las unidades de limpieza de escoria como horno eléctrico (HE) y horno de limpieza de escoria (HLE), los principales contaminantes corresponden a pequeñas cantidades de SO_2 , proveniente del combustible derivado del petróleo o carbón (necesario para mantener la temperatura en el horno y el ambiente reductor), elementos volátiles y MP en la forma de hollín, generando humos negros (combustibles sin quemar o residuos de carbón sin combustionar).

Las soluciones para capturar y eliminar estas emisiones son el uso de filtros de mangas o precipitadores electrostáticos secos, dependiendo del tamaño de las partículas emitidas, los que capturan por sobre el 99% de los polvos.

En nuestro país, la experiencia es enfriar los gases y usar precipitadores electrostáticos para limpieza de escoria con HE y filtros de manga cuando se usa HLE. En la práctica, los polvos de electrofiltros corresponden a un concentrado de Zn, lo que corrobora lo indicado en Davenport & Biswas⁸, quienes reportan una distribución del Zn de 84% en la escoria para CT y Noranda.

5.4.4 Unidad de Refino a Fuego

En esta unidad se debe retirar del cobre blíster la totalidad del azufre contenido y la mayor parte del oxígeno. Para conseguir lo anterior en primer lugar se somete al cobre blíster a un proceso de oxidación del baño, mediante la introducción de lanzas con aire, para eliminar el azufre, seguido por una etapa de reducción con el agregado de combustible líquido en exceso al requerido para mantener temperatura, con el objeto de reducir el exceso de oxígeno.

Como consecuencia de esta última etapa, se genera una cantidad de humos negros (combustible sin combustionar) que son visibles a distancia. La solución a esta contaminación por MP es en primer lugar, conseguir la combustión completa de las partículas sin combustionar, mediante incineradores de poscombustión y a continuación usar precipitadores electrostáticos secos, que dependiendo del tamaño de las partículas emitidas, pueden capturan por sobre el 99% de este MP.

Otra solución para el abatimiento, es efectuar un lavado (scrubbing) de los humos negros en contracorriente. Ambas soluciones debieran alcanzar índices de opacidad inferior a 4, potencial límite para su emisión en chimenea.

⁸ W.G. Davenport, A.K. Biswas, Extractive Metallurgy of Copper, cuarta edición.

5.5 Proceso de Limpieza y Tratamiento de Gases (Planta de Ácido)

El proceso de limpieza y tratamiento de gases tiene por misión limpiar los gases metalúrgicos, capturados en las unidades de fusión y conversión, extrayendo principalmente el As y otras impurezas, que permiten alimentar un gas rico en SO₂ a la planta de contacto y absorción, transformándolo en ácido sulfúrico.

La producción de ácido sulfúrico a partir de gases con SO₂ se puede realizar por distintos procesos, dependiendo de las características de los gases en cuanto a su concentración de SO₂, a la presencia de impureza o a la remoción previa de la humedad del gas.

Para los gases de procesos con contenidos > 3 Vol. % SO₂ existen plantas con:

- Proceso de simple contacto
- Proceso de doble contacto
- Proceso de contacto húmedo WCP (Wet Contact Process)

El proceso de conversión de mata/MB, por su condición de proceso batch, tiene una influencia negativa sobre la homogeneidad en la concentración del SO₂ en la mezcla, particularmente en las etapas de carguío, esperas de carga y descarga de cobre blíster, afectando significativamente el proceso de producción de ácido sulfúrico.

Las tasas de conversión obtenidas en los procesos de simple y doble contacto dependen de la concentración inicial de SO₂ en los gases tratados pero también de la razón O₂/SO₂.

Se reportan las siguientes tasas de conversión⁹:

⁹ Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of Sulphuric Acid. 2000.

- Absorción simple: $\text{SO}_2 > 8\%$ y razón O_2/SO_2 1:1, 98% conversión
- Absorción simple: SO_2 5 a 8% y razón O_2/SO_2 1:1, 97% conversión
- Absorción simple: $\text{SO}_2 < 5\%$ y razón O_2/SO_2 1:1, 96% conversión
- Doble absorción 99,6% conversión

Para lograr a plenitud el objetivo de extraer la totalidad del SO_2 de los gases, es necesario una operación en óptimas condiciones de los equipos de captura, manejo y limpieza seca de los gases previo a su ingreso en la planta de ácido y al interior de la planta una rigurosa limpieza húmeda, secado, control de presiones y temperaturas, en los distintos puntos de ella.

Desde un punto de vista del volumen y concentración de los gases a tratar para evitar la generación de gases fugitivos en las campanas, la estrategia operativa debiera corresponder a una operación de la fundición desde planta de ácido, esto es la cantidad de carga a procesar (en fusión y conversión) debe ajustarse al tiraje que en cada momento indique planta de ácido.

Por otro lado, para evitar la emisión de SO_2 , SO_3 o neblina ácida, debe controlarse con finesa las temperaturas de las camadas o lechos de la torre de catálisis, la eficiencia de la etapa de absorción y el limpiado de neblina ácida (demister) de los gases de cola.

Una proporción importante del mejoramiento ambiental de las fundiciones nacionales, pasa por el mejoramiento de las plantas de ácido, haciéndolas más eficiente, para lo cual se puede seguir el siguiente camino por etapas:

- Plantas de ácido de simple contacto optimizarse a doble contacto.
- Plantas de doble contacto con tratamiento de gases de cola.

5.5.1 Planta de ácido de doble contacto

En Alemania se patentó el proceso de doble contacto/absorción que reduce la concentración del SO_2 en los gases de cola a 0,03% SO_2 . El proceso consiste en

la adición al sistema de una torre de absorción adicional, que extrae SO_3 antes de la última etapa de conversión.

La eliminación del SO_3 en este punto da lugar a una conversión global del orden 99,7%. Este diseño no se traduce en una elevación considerable de la inversión y los costos de producción son aproximadamente iguales.

Este proceso, de la casa Bayer, es posiblemente el sistema más seguro hoy día para la reducción de las emisiones de SO_2 en la fabricación de ácido sulfúrico.

En nuestro país existen exitosos ejemplos de plantas de ácido mejoradas de simple contacto a doble contacto (también lo entenderemos indistintamente como doble absorción), como es el caso de fundición Chagres y Ventanas, con la incorporación de la etapa de absorción adicional.

La simplicidad del lay out, con minimización de las pérdidas de carga, y una buena estanqueidad de los ductos y equipos del tren de gases, son relevantes para maximizar el aprovechamiento de la capacidad de la planta de ácido, diseñadas hasta niveles de concentración de 12% de SO_2 y relación O_2/SO_2 mayor o igual a 1,1.

Aspectos relevantes que hay monitorear para un buen del desempeño medioambiental de una planta de ácido, se muestran a continuación:

Los principales contaminantes emitidos son:

- SO_2 resultante de una oxidación incompleta
- SO_3 resultante de una incompleta absorción del SO_3
- Gotas de H_2SO_4 resultantes de la absorción
- H_2SO_4 gaseoso del scrubbing

Otros contaminantes pueden ser emitidos como trazas, dependiendo de la fuente de SO_2 y del proceso de producción de H_2SO_4 :

- NO y NO_2 de todo el proceso pero principalmente del proceso modificado de cámara de plomo, basado en NO_x
- Metales pesados (por ejemplo Hg) cuando ciertos concentrados son tratados

5.5.2 Tratamiento de gases de cola

La mayoría de las emisiones de las plantas de contacto, se deben al gas de cola de la torre de absorción. Cuando se debe cumplir con normas de emisión más exigentes, es necesario considerar el tratamiento de los gases de cola de la torre de absorción, que se descargan a chimenea.

El gas contiene principalmente nitrógeno y oxígeno, pero también SO_2 sin reaccionar, SO_3 no absorbido, niebla de ácido sulfúrico y spray de ácido. Cuando el gas penetra en la atmósfera, el SO_3 absorbe vapor de agua para formar una niebla ácida.

A continuación se entrega una tabla de costos de tratamientos para los gases de cola de una planta de ácido. Se consideran los costos adicionales que representa la instalación y operación de estos sistemas por sobre el costo de la planta de ácido (BAT, 2000)¹⁰.

¹⁰ Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of Sulphuric Acid, p. 38, 2000.

Tabla 5.5.2 Costos de abatimiento secundario en planta de ácido (capacidad 100.000 Nm³/h con 11% SO₂)

Técnica	Niveles de emisión referidos a 11% SO ₂ y 1000 t/d = 100.000		Costo adicional a instalación básica		Residuos
	mg SO ₂ /Nm ³ gas	Kg SO ₂ /t H ₂ SO ₄ 100%	Inversión	Operación	
Lavado gas de cola					
Hidróxido de sodio	200	2	6 MEur	4,5 Eur/t	Sal de sodio
Hidróxido de amonio	200	2	6 MEur	4,4 Eur/t	Sal de amonio
Hidróxido de calcio	200	2	6 MEur	4,0 Eur/t	Yeso
Carbón activado	1.000	2	5,5 MEur	4,0 Eur/t	Ácido diluido
Tratamiento con H ₂ O ₂ después de absorción final	200	2	4,5 MEur	6 Eur/t	Ácido diluido

Fuente: Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of Sulphuric Acid, p. 38, 2000.

Para la fundición Ventanas, que se encuentra emplazada al lado del mar, el proceso de limpieza de gases cola: ALSTOM Seawater FGD, considerada un proceso Best Available Technologies (BAT), puede resultar en una buena posibilidad para reducir sus emisiones de SO₂, particularmente frente a escenarios más exigentes.

El proceso ofrece las siguientes características:

- Eficiencia de reducción de SO₂: 95% a 99%
- Proceso simple, requiere solamente agua, aire y electricidad
- No requiere agentes químicos
- No requiere personal adicional para operación y mantención
- No produce desechos
- Bajo consumo energético

Adicionalmente, las fundiciones también debieran analizarse la posibilidad de aumentar la capacidad volumétrica de procesamiento de gases, si el VTI principal

de planta de ácido tiene holgura en su capacidad de aspirado, lo que redundará en una disminución significativa de las emisiones fugitivas.

5.6 Material Particulado

El material particulado o polvo presente en los gases metalúrgicos tiene 2 orígenes distintos:

- El polvo de arrastre, correspondiente a partículas primarias, son consecuencia del arrastre de partículas de concentrado que no alcanzan a reaccionar completamente y que son llevadas por los gases hacia la salida del equipo. Estas partículas tienen generalmente una composición cercana a la composición del concentrado, con alto contenido de cobre y hierro y un posible déficit de azufre (parcialmente oxidado) y de impurezas más volátiles.
- Por otro lado, están las partículas secundarias, producidas por la sublimación de los compuestos volátiles a medida que se enfrían los gases en el tren de limpieza. Cabe señalar que estos compuestos secundarios pueden también condensar sobre partículas primarias, obteniéndose partículas mixtas. Las partículas secundarias y las partículas mixtas tienen un contenido más bajo de cobre y hierro y un mayor contenido de arsénico, zinc, bismuto y otros metales volátiles.

La cantidad de polvo de arrastre que se produce en los equipos de fusión depende del tipo de equipo y en particular del modo de alimentación del concentrado. En el horno Flash es el equipo donde se genera la mayor cantidad polvo de arrastre. En el Convertidor Teniente/Noranda, donde el concentrado es alimentado por toberas sumergidas en el baño, se produce un menor arrastre de partículas, pero en contraposición tiene mayor capacidad destiladora de volátiles.

El material particulado presente en los gases se recupera en las etapas de enfriamiento y limpieza seca de los gases. La mayor parte de los polvos de arrastre se recuperan en las cámaras mata polvos y de enfriamiento (radiativo y/o

evaporativo) donde, por una disminución de la velocidad de los gases por expansión de la sección de los ductos, se produce una sedimentación de las partículas más gruesas. Estos polvos por su contenido de cobre, son recirculados a la etapa de fusión.

Para captar las partículas más finas, el equipo más difundido en la limpieza seca es el precipitador electrostático, que mediante la aplicación de un campo electromagnético, permite recuperar las partículas en función de su carga superficial, aun cuando son partículas de muy bajo tamaño (micrométricas).

Los precipitadores electrostáticos poseen normalmente tres campos, donde se reciben los polvos. En el primero se obtienen los polvos con el mayor contenido de cobre que son reprocesados, no así los de los campos siguientes que son muy altos en As.

A medida que los gases avanzan en las distintas etapas de limpieza, se van enfriando y disminuye la proporción de polvos de arrastre y aumenta la proporción de polvos de condensación. Estos polvos no son recirculados, para evitar la acumulación de impurezas en la fundición, siendo usualmente tratados externamente vía hidrometalurgia. Existen también sistemas de enfriamiento y limpieza directa vía húmeda como el Dynawet, en que los gases pasan directamente de las calderas a un lavador de anegamiento, como en el caso del horno Flash Inco.

5.7 Tratamiento Gases Fugitivos y Secundarios

Se entiende como gases fugitivos a los gases metalúrgicos que escapan de la campana primaria y/o calderas recuperadoras de calor.

También los gases fugitivos son los que se desprenden de orificios de sangría (eje/MB y escoria), canales y de ollas con productos líquido.

Mientras los primeros son gases metalúrgicos con contenidos variables de diferentes tipos de impurezas, dependiendo de las condiciones de proceso, los

segundos presentan generalmente baja temperatura que favorece la condensación de algunos compuestos volátiles.

En general los gases fugitivos por boca son capturados con equipos adicionales de tratamiento secundario e incorporados a los gases metalúrgicos a su ingreso a la planta de ácido, como regulador del contenido de SO_2 , cuando es posible, de lo contrario ellos deben ser tratados en plantas dedicadas.

Los gases de equipos secundarios como hornos de limpieza de escorias y de hornos de refinación a fuego, son tratados en plantas especiales de limpieza de gases. Otro camino es en una cámara poscombustión, la que efectúa la combustión completa de partículas sin combustionar y posteriormente los emite a la atmosfera.

Como los gases fugitivos de sangrías presentan bajas concentraciones de SO_2 no pueden ser tratados directamente en plantas de ácido y por lo tanto son utilizadas diferentes opciones de abatimiento.

También existen procesos de concentración, los que mediante procesos de absorción selectiva y desorción permitan aumentar la concentración del SO_2 para su posterior tratamiento en plantas de ácido. No obstante, estos procesos son relativamente complejos y de alto costo.

Entre las principales opciones de abatimiento de gases fugitivos con bajas concentraciones de SO_2 (menor a 3%), se tiene:

- Lavado con NH_3 (scrubbing), produciendo sulfato de amonio
- Lavado con NaOH (scrubbing), produciendo sulfato de Sodio
- Lavado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (scrubbing), produciendo sulfato de calcio (yeso)
- Lavado con $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (scrubbing), produciendo sulfato de magnesio.

Entre los procesos existe también la posibilidad de inyectar en el gas partículas de cal seca o bicarbonato de sodio que absorben el SO_2 y que luego son removidas haciendo pasar el gas por filtros de mangas. Naturalmente, estos procesos también son aplicables a la limpieza del SO_2 de los gases de cola de planta de ácido.

5.8 Técnicas de Medición de Fuentes Fijas

El sistema de monitoreo de contaminantes gaseoso de fuentes fijas puede realizarse por medio de dos grandes líneas metodológicas. La primera corresponde a aquellas metodologías pasivas (o tipo discontinuas), las cuales se caracterizan por poseer metodologías que incluyen medir el flujo de gases, extraer una muestra que captura del contaminante de interés en algún medio como filtros, soluciones o similares, y determinando la cantidad capturada y su concentración en laboratorio. Ejemplo de estas técnicas son las conocidas “mediciones isocinéticas”, para cuantificar el contenido de polvo en el gas.

Para implantar este tipo de medida, el Estado ha establecido una serie de normas técnicas con los estándares metodológicos de medición para varios de los contaminantes habituales en la industria. Estas metodologías se encuentran reguladas por medio de una serie de resoluciones emitidas por el Estado, en especial el Ministerio de Salud, regulándose los requisitos de los laboratorios y las metodologías a emplear. Un resumen de las distintas regulaciones se encuentra de la tabla siguiente:

Tabla 5.8 Regulaciones para medición de contaminantes

Cuerpo Legal	Título	Contenido
DECRETO 2.467 18/02/94	Aprueba reglamento de laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes estacionarias	Entrega requisitos de laboratorios autorizados para la realización de mediciones.
RESOLUCION 535 EXENTA 17.03.1999	Aprueba normas técnicas que indica sobre metodologías de medición y análisis de emisiones de fuentes estacionarias	Normas Técnicas de mediciones NOx (varios métodos), CO y COVs.
RESOLUCION 559 EXENTA 17.03.1999	Aprueba normas técnicas que indica sobre metodologías de medición y análisis de emisiones de fuentes estacionarias	Normas Técnicas de mediciones de SO ₂ y COVs (método alternativo)
RESOLUCION N°752 EXENTA 17.04.2000	Aprueba normas técnicas que indica sobre metodologías de medición y análisis de emisiones de fuentes estacionarias	Normas Técnicas de mediciones de CO y COG (método NDIR)
RESOLUCION 1.349 25/10/97	Aprueba normas técnicas que indica sobre metodologías de medición y análisis de emisiones de fuentes estacionarias	Normas técnicas para determinación de parámetros relevantes de campañas de medición. Material Particulado y SO ₂

Fuente: Normativas medio ambientales.

Por otra parte la segunda línea de metodología de medición de fuentes estacionarias o fijas, que es lo que nos ocupa en esta oportunidad, corresponden a los sistemas de monitoreo continuos, conocidos también como SMCEG (sistema de medición continua de emisiones gaseosas).

Estos sistemas de monitoreo se caracterizan por poseer la capacidad de realizar mediciones continuas e instantáneas de los contaminantes emitidos por una fuente, pudiendo ser de gran aporte a los procedimientos de control de las normas de emisión de fundiciones, por su mayor representatividad y precisión de la medición. Sin embargo, son de alto costos de implementación y complejos de mantener y operar.

Los sistemas SMCEG, pueden dividirse en sistemas "extractivos" e "in situ", diferenciándose en la forma de tratamiento de la muestra, siendo los sistemas

“extractivos” aquellos en los que se toma una muestra de la fuente, la que es acondicionada y analizada en línea, en gabinetes generalmente al pie de la fuente.

En cambio los sistemas “in situ”, realizan la medición de concentración al interior de la fuente, generalmente aplicando técnicas ópticas, teniendo al igual que los extractivos, similares nivel de dificultades de calibración, mantención y operación, además de una alta inversión.

La implementación y operación de este tipo de sistemas de medición de contaminantes en fuentes fijas se encuentra regulado por la Resolución N°23.013 del año 2011 que aprueba el protocolo para sistemas de monitoreo continuo de Emisiones, que establece los tipos, condiciones, instalación, cálculos y registro de estas mediciones.

En cuanto a la aplicación de los distintos sistemas de medición de fuentes fijas en fundiciones, es posible mencionar que las distintas técnicas han sido aplicadas en distintas instancias en las fundiciones chilenas, es así como para efectos de determinación de material particulado se ha usado primordialmente mediciones Isocinéticas (método pasivo) y en algunos casos como las fundición Ventanas, mediciones directamente en la fuente con opacímetros (método in situ).

Para la medición de gases de fundición con contenido de SO₂ habitualmente se aplica mediciones del tipo extractivo. En cuanto a las mediciones de NO_x y Hg, estas prácticamente no han sido realizadas con anterioridad en las fuentes estacionarias de las fundiciones.

5.8.1 Control de emisiones de humos negros

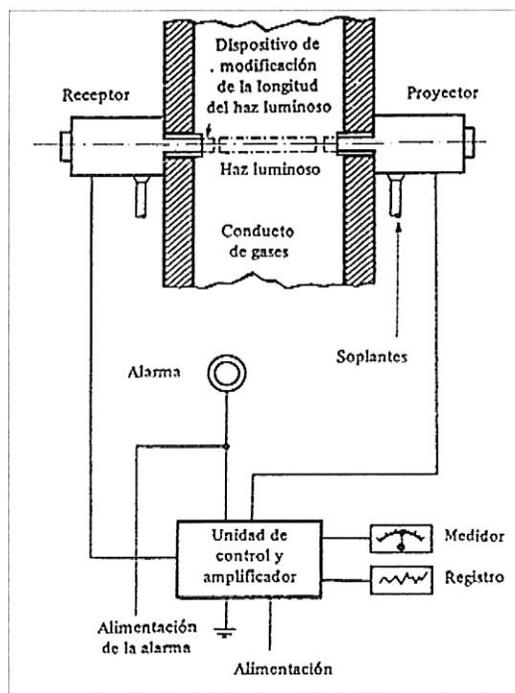
Los humos negros (gases con combustible sin quemar), se generan básicamente en los hornos de refino a fuego y en hornos de limpieza de escorias (HE y HLE), en la etapa de reducción y como consecuencia del ambiente reductor, respectivamente. En los hornos de refino, luego de la etapa de desoxidación, es

necesario controlar el contenido de oxígeno en el cobre refinado a fuego y en los hornos de limpieza de escoria es necesario un ambiente reductor (combustible en exceso), con el objeto de controlar el contenido de magnetita, para hacer la escoria más fluida.

El control continuo de la opacidad de los gases de la combustión se efectúa de la forma siguiente: en un tramo recto de la tubería de conducción de humos (ver figura 5.8.1), se coloca el sistema fotoeléctrico de control, que consta por una parte de un dispositivo de proyección luminosa de intensidad constante, y por otra exactamente en frente de ésta, el sistema receptor, constituido por una célula fotoeléctrica mide la intensidad luminosa recibida y a continuación la registra en un dispositivo de control.

Si se considerase deseable, se puede acoplar a este equipo una unidad de control remoto y un sistema de alarma calibrado de acuerdo con la legislación vigente o bien de tal modo que permita determinar la eficacia de la combustión, pues cuanto mayor sea la intensidad luminosa tanto más eficaz será la combustión.

Figura 5.8.1 Esquema de dispositivo fotoeléctrico de medida de opacidad de los gases



Fuente: Antecedentes del Consultor.

Por regla general, los sistemas emisor y receptor de estos equipos van provistos de unos dispositivos que tienden a acortar o alargar el recorrido del haz luminoso por el humo, si ello es preciso. Además, para evitar los atascos producidos por la acumulación de polvo y hollín en la conducción del equipo, el aparato dispone de un aparato de limpieza automática.

5.9 Medidas de Reducción de Emisiones

A continuación se presenta el listado de medidas de reducción de emisiones agrupado, bajo el criterio de que cada grupo de medidas seleccionado funciona como una solución integral.

Tabla 5.9.a Listado Medidas de reducción de emisiones

Nombre	Medidas de Reducción de emisiones	Efecto de Medidas
Control polvos RAM	Instalación de tolvas, buzones o lugares cerrados.	Eliminar MP y pérdidas en el manejo de materiales secos a granel.
Secado	Instalación de sistema de secado indirecto (vapor o Eléctrico).	Eliminar contaminación por gases de combustión.
Sistema Manejo de Gases de Procesos	Instalar campana primaria de alto rendimiento en CT/Noranda y CPS	Eliminar la generación de gases contaminantes.
	Instalación de sistema óptico de control de procesos (OPC) en CPS.	Establecer el momento óptimo de término de proceso.
	Implementar un sistema de control de tiraje para mejorar captación de gases en campana primaria	Evitar la generación de gases secundarios.
Extracción de Hg	Incluir Sistema De Extracción de Hg en PAS	Evitar contaminación por Hg, del ácido sulfúrico.
	Ampliar planta de tratamiento de efluentes PAS	Asegurar la extracción de este y otros elementos en PAS.
Carga fría a CPS	Instalar sistemas de adición de carga fría laterales en campana(compuerta)	Evitar emisiones secundarias por giro de CPS.
	Instalar sistema para la inyección material granulado por toberas CT/Noranda	Evitar emisiones secundarias por giro de CPS.
Mejoramiento PAS a doble contacto	Realizar up grade de PAS a doble contacto / doble absorción.	Reducir emisiones de azufre en PAS.
Mejoras en PAS.	Reemplazo de sistemas para minimiza las pérdidas de carga.	Mejorar eficiencia de PAS.
	Aumento de capacidad de PAS, reemplazando el rodete o el ventilador principal, por uno de mayor tamaño.	Ampliar capacidad de procesamiento de gases de PAS.
Tratamiento gases de colas PAS	Instalación de sistema de tratamiento de gases colas de PAS.	Eliminar emisiones en PAS.
Manejo polvos	Instalar sistema de transporte neumático de polvos.	Evitar pérdidas y generación de MP.
Tratamiento de escorias	Instalar planta de flotación para limpieza de escorias	Eliminar emisión de As en gases y mejorar recuperación de cobre.
Gases Secundarios	Instalar sistema de campanas secundarias.	Eliminar emisiones secundarias.

Nombre	Medidas de Reducción de emisiones	Efecto de Medidas
Gases fugitivos	Instalar sistemas de captación y abatimiento de gases de sangrías de mata/metal blanco.	Reducir las emisiones fugitivas.
Control Giro CT/CPS	Instalar sistema de control que permita la coordinación durante la salida en línea de CT/Noranda y CPS	Evitar emisiones y dilución de gases a PAS.
Mejoras RAF	Instalar ruedas de moldeo de alta capacidad.	Reducir cantidad de hornos RAF, disminuyendo: tiempo moldeo, emisión fugitiva y combustible.
Mejoras RAF Sistema control combustión	Instalación de ladrillos porosos.	Mejorar la distribución de oxidante/reductor en proceso RAF.
	Instalar sistema de control en línea para asegurar combustión óptima en quemadores.	Optimizar uso de combustible y reducir emisiones.

Fuente: Informe Avance de Smeltec.

5.10 Prácticas Operacionales

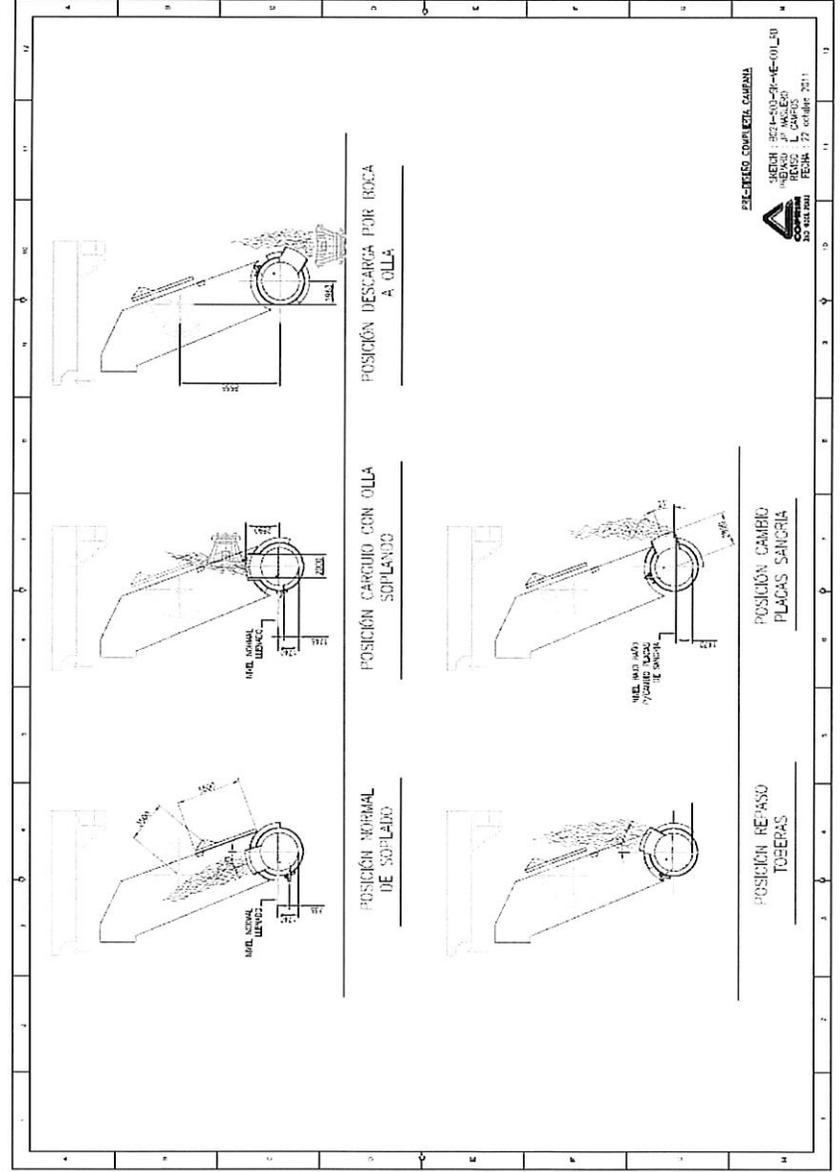
Dentro de las operaciones normales de la Fundición, existen prácticas que favorecen la captura y tratamiento de los gases sulfurosos, que en el marco de la nueva regulación ambiental, debieran constituir mejores prácticas operacionales para la gestión ambiental.

Entre estas prácticas se destacan entre otras:

- Evitar la operación de carguío de materiales por boca, con el convertidor soplando (CT o CPS).
- Utilizar tazas u ollas a un nivel adecuado de llenado, para evitar ensuciamiento de la boca, golpes y deterioro de la boca o compuerta de la campana primaria.
- Evitar el sobrellenado del convertidor, privilegiando el re carguío posterior.
- Privilegiar la coordinación de CPS, evitando el giro de inicio del soplado de una unidad adicional, por sobre la capacidad de diseño del sistema.
- Realizar mantenimiento periódica adecuada a equipos: campanas, compuertas, bombas de agua de refrigeración, cámaras de enfriamiento, dampers, precipitadores electrostáticos y ductos.

- Mantener puertas de inspección o de mantención permanentemente cerradas, para evitar infiltración de aire al sistema.
- Incorporar señales y datos relevantes al sistema integrado de control (PI), para uso de operación desde sala de control (Tirajes en campanas, volumen y concentración de SO₂ en plantas de ácido, así como concentración de descarga de gases por chimenea.
- Realizar seguimiento periódico de control de eficiencia de precipitadores y en el reactor de la planta de ácido.
- Disponer de manuales de operación actualizados y materiales para el manejo de contingencias (quemadores auxiliares y otros.)
- Realizar entrenamiento de operadores, idealmente con simuladores del sistema de manejo gases y certificación de competencias de operadores de convertidores y plantas de ácido.
- Incorporar factores de desempeño tales como ton Acido/ ton concentrado fundido a tableros de control y convenios de desempeño (balance score-card).

Figura 5.10 Esquema Campana campana primaria y posiciones en operaciones rutinarias. Fuente Elaboración propia.



001167