



**DIVISIÓN DE POLÍTICA Y REGULACIÓN AMBIENTAL
 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE – GOBIERNO DE CHILE**

**EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCENARIOS REGULATORIOS PARA UNA NORMA DE
 EMISIÓN DE FUNDICIONES DE COBRE**

INFORME FINAL

C051-IN-GE-03_R0

REVISIÓN	EMITIDO PARA	FECHA	PREPARÓ	REVISÓ	APROBO
A	REVISION INTERNA	28-03-2012	EM/ET/FV	CDH/CDF	CDF
B	APROBACION CLIENTE	30-03-2012	EM/ET/FV	CDH/CDF	CDF
0	APROBADO	17-04-2012	EM/ET/FV	CDH/CDF	CDF

COMENTARIOS:

**DIVISIÓN DE POLÍTICA Y REGULACIÓN AMBIENTAL
MINISTERIO MEDIO AMBIENTE – GOBIERNO DE CHILE**

**ASESORÍA TÉCNICA
EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCENARIOS REGULATORIOS PARA UNA NORMA
DE EMISIÓN DE FUNDICIONES DE COBRE**

**INFORME FINAL
C051-IN-GE-03_R0**

CONTENIDO:

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	4
2.	RESUMEN EJECUTIVO	10
3.	ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES TECNOLÓGICAS FUNDICIÓN Y FUENTES DE EMISIÓN: AZUFRE- ARSÉNICO	26
4.	CONTRASTACIÓN DE SITUACIÓN DE FUNDICIONES NACIONALES EMISIONES Y FIJACIÓN AZUFRE- ARSÉNICO.....	51
5.	SOLUCIONES TECNOLÓGICAS GENERALES PARA CAPTURA Y TRATAMIENTO DE GASES SECUNDARIOS Y FUGITIVOS.....	74
6.	LÍMITES DE EMISIONES EN CHIMENEAS.....	105
7.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN HERNÁN VIDELA LIRA.....	121
8.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CHUQUICAMATA.....	164

9.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CALETONES	205
10.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN VENTANAS.....	248
11.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICION POTRERILLOS.....	287
12.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CHAGRES	328
13.	SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICION ALTONORTE.....	361
	BIBLIOGRAFÍA.....	399
	ANEXO A: CRITERIOS INCLUIDOS EN LA EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCENARIOS REGULATORIOS	402
	ANEXO B: GLOSARIO	407

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Ministerio de Medio Ambiente, por medio de la División de Política y Regulación Ambiental, encargó a Coprim Ingeniería desarrollar un análisis de evaluación de costos y efectividad de tres posibles escenarios regulatorios, planteados para la elaboración del anteproyecto de norma de emisión, para las Fundiciones de concentrados de cobre del país.

La regulación plantea el establecimiento de escenarios de captura / fijación con cuotas de emisión y contrastación frente a los límites de emisión en chimeneas establecidos por el MMA para procesos unitarios relevantes. Los escenarios a evaluar correspondieron a 95%, 96% y 97% de captura de SO₂, el último de éstos para aquellas fundiciones cercanas a la población (Chuquicamata, Ventanas, Chagres y Hernán Videla Lira), condición requerida, así como el cumplimiento de límites en chimenea.

La evaluación se solicitó para las 7 Fundiciones nacionales (4 en una primera etapa y las 3 restantes en la segunda), considerando:

- Correlacionar el porcentaje actual de captura de SO₂ y validar el de As con el estatus de los procesos y sistemas de captura existentes, mejoras operativas posibles sin y con pérdidas de capacidad.
- Identificar y evaluar el conjunto de medidas para cumplir los escenarios regulatorios propuestos (95%, 96% y 97% de captura de SO₂ ,con porcentajes relacionados de fijación de As, al menos 1% superior) y su relación con:
 - La disponibilidad de tecnología.
 - La confiabilidad operativa y performance promedio.
 - La posibilidad de instalación por espacios físicos, restricciones operativas u otros.

- Los tiempos críticos de adquisiciones, construcción, montaje y puesta en marcha.
 - La valorización de eventuales pérdidas y ganancias de capacidad y/o producción en el proceso, por efecto de las mejoras en cada fundición.
 - El tiempo de desarrollo de los estudios de pre-factibilidad y factibilidad, de autorización de inversiones, ingenierías de detalle, adquisiciones, construcción y montaje.
- Realizar el análisis de efectividad de las soluciones planteadas y el grado de riesgo técnico asociado a las eficiencias de captura y tratamiento.
 - Realizar la evaluación de los costos de inversión y operación de los tres escenarios, considerando el enfoque costo/efectividad (costo por tonelada reducida).

La evaluación de costos, se realizó con un nivel de incertidumbre en promedio de 30% de desviación, considerando los antecedentes de las ingenierías realizadas por las empresas a la fecha entre perfil y conceptual, más datos del consultor, valorando el diferencial de VAC y CAE, con una tasa social de descuento de 6% para un horizonte de 25 años, de las soluciones recomendadas para aumentar la captura y fijación de contaminantes SO₂, As, MP.

Tabla 1.a Escenarios regulatorios

Escenario Regulatorio	Captura y Fijación de SO ₂	Captura y Fijación de As	Límites en chimenea Fu cercanas a Población
1° Escenario	95 %	96%	MP, SO ₂ , As y Hg
2° Escenario	96 %	97%	MP, SO ₂ , As y Hg
3° Escenario	97 %	98%	MP, SO ₂ , As y Hg

Fuente: MMA, Minuta Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión para las fundiciones de cobre.

Se analizó también lograr el cumplimiento de límites de emisión en chimenea, para cuatro instalaciones cercanas a la población, según los conceptos definidos por el MMA de “Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión para las fundiciones de cobre”.

Tabla 1.b Límites máximos de emisión en chimenea (s) en mg/Nm³

Chimenea (s) de operaciones unitarias Fuente Existentes	Límites máximos de emisión en chimenea (s) en mg/Nm ³			
	MP	SO ₂	As	Hg
Planta de ácido		400 ⁽³⁾	0,5 ⁽²⁾	0,07 ⁽¹⁾
Limpieza de escoria	50 / (5 ⁽¹⁾)	400 ⁽³⁾ /200 ⁽¹⁾	0,5 ⁽²⁾	0,1 ⁽³⁾
Secador de concentrados de cobre	Informar	Informar		
Planta de tostación	50 ⁽³⁾	400 ⁽³⁾	0,5 ⁽²⁾	0,1 ⁽³⁾
Hornos de refino	Opacidad <4%			

Fuente: MMA, Minuta Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión para las fundiciones de cobre.

Notas:

- (1) Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, 2001. Valor para plantas de ácido, p. 146. Para limpieza de escoria, p. 268.
- (2) Tomado y adaptado de la Guía sobre medio ambiente, salud y seguridad. Fusión y refinado de metal base, del IFC del Banco Mundial, 2007. p. 18 y 19.
- (3) Valores considerados en la regulación de otras megafuentes existentes reguladas en Chile: incineradores y plantas de generación.
- (4) Para fuentes nuevas se exigirán valores de acuerdo a mejor tecnología disponible.

Las medidas de control de emisiones incorporadas, implican soluciones con diseños tecnológicos probados, proyectos aprobados y mejoramientos de prácticas operativas. En el caso específico de la Fundición Chuquicamata el cambio del esquema operativo a una línea de fusión (FSF-CPS), fue incorporado como solución predefinida por el MMA.¹

¹ Evaluación Preliminar COCHILCO escenarios frente a una nueva normativa de Emisiones Atmosféricas para fundiciones chilenas, el caso de la fundiciones Codelco.

Como situación base del estudio, se consideraron las capacidades y porcentajes de captura de SO₂ declarados al 2010 (a excepción de Fundición Chuquicamata), los niveles de S y As promedios proyectados para el período 2011 al 2016 y la consideración de un contenido máximo de As de 0,5% para la estimación de cuotas de fijación de As (abatimiento por escenario un 1% superior al de SO₂).

Tabla 1.c Criterios adoptados de capacidad y proyecciones de S y As para cada fundición

Instalación	Capacidad nominal conc nuevo 2010 kta	Porc Captura S dec 2010 %	Porc Captura As dec 2010 %	Proyección % S prom/ periodos				Proyección % As prom/ periodos			
				2011-12 Conc	2013-14 +	2014-16 Calcina	Promedio	2011-12 Conc	2013-14 +	2014-16 Calcina	Promedio
Chuquicamata	1650	91,0	N/d	33,50	32,01	30,98	32,16	0,890	0,890	0,800	0,860
Chuqui. 2013 (*)	1350	93,5	N/d	Conc	+	Calcina	28,80	Conc	+	Calcina	0,640
Potrerrillos	680	83,5	N/d	32,00	32,00	32,00	32,00	0,500	0,500	0,500	0,500
Ventanas	436	93,8	N/d	30,50	30,85	32,53	31,29	0,180	N/d	N/d	0,180
Caletones	1372	88,0	N/d	32,50	32,50	32,23	32,41	0,170	0,160	0,170	0,167
Altonorte	1160	93,7	N/d	32,35	32,60	32,60	32,52	0,420	0,420	0,420	0,420
Chagres	660	95,7	N/d	30,10	28,60	29,40	29,37	0,062	0,108	0,124	0,098
HVL	350	89,4	N/d	32,83	32,83	32,83	32,83	0,050	0,050	0,050	0,050

Fuente: MMA, Minuta Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión para las fundiciones de cobre.

(*) Chuquicamata 2013 por consultor según decisión Codelco-MMA

Tabla 1.d Cuotas máximas de emisión a evaluar

Instalación	Cuotas Máximas Emisión a evaluar					
	SO ₂ (t/a) 95%	As (t/a) 96%	SO ₂ (t/a) 96%	As (t/a) 97%	SO ₂ (t/a) 97%	As (t/a) 98%
Chuquicamata	53.070	330	42.456	248	31.842	165
Chuqui. 2013 (*)	38.861	270	31.089	203	23.316	135
Potrerrillos	21.760	136	17.408	102	13.056	68
Ventanas	13.644	87	10.915	65	8.186	44
Caletones	44.467	274	35.573	206	26.680	137
Altonorte	37.719	232	30.175	174	22.632	116
Chagres	19.382	132	15.506	99	11.629	66
HVL	11.491	70	9.192	53	6.894	35

Fuente: Coprim según antecedentes MMA: Minuta Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión al aire para las fundiciones de cobre.

Para el análisis del aumento de captura de S se ha evaluado en orden de prioridad: aumentar la captura de gases primarios; la modificación de la(s)

planta(s) de ácido a doble contacto y doble absorción; la captura y tratamiento de gases fugitivos (diluidos) de fusión y conversión con la disposición o ventas de los productos generados; el tratamiento de gases de cola de la producción de ácido y otras soluciones para el cumplimiento de límites en chimenea, en SO₂, As, eventualmente Hg y MP.

Dentro de los planes de control y monitoreo, se han incluido inversiones en infraestructura y gastos de operación para el seguimiento y control de mediciones discretas o continuas en función de los niveles de emisión límites establecidos para chimeneas de plantas de ácido, hornos de tratamiento escoria (HE/HLE), hornos de refino, además de las medidas de control.

La metodología del análisis de costo-efectividad realizado por Coprim, consideró las siguientes etapas de análisis genérico, a las que se les incluyeron las particularidades de cada instalación:

- Análisis Teórico de 4 configuraciones tecnológicas de fundición y fuentes de emisión para azufre-arsénico, en base a coeficiente de distribución, balances y eficiencias, influencia de los procesos de limpieza de escorias.
- Determinación en base a porcentajes por fuentes de emisiones, fijación de S y As por instalación y contrastación con valores declarados 2010, definiendo rango de dispersión.
- Soluciones tecnológicas generales para reducción de emisiones de Azufre y arsénico, material particulado y mercurio, por procesos y fuentes, dimensionamiento según antecedentes de encuesta general a Fundiciones, datos de proveedores, publicaciones y experiencia del consultor.
- Análisis de Límites de emisiones en chimeneas, soluciones propuestas por proceso unitario, análisis situación de mercurio y material particulado.
- Para la valorización de las soluciones, se consideraron: soluciones de control, niveles de reducción de emisiones para el cumplimiento de escenarios, determinación de inversiones y costos de operación por instalación, plazos y secuencias constructivas e interferencias. Todos estos elementos permitirían

finalmente la determinación del VAC, CAE, costo-efectividad CUE (costo unitario por tonelada de SO₂) y proyecciones de futuro.

El equipo del Consultor (Coprím Ingeniería S.A.) que participó en el desarrollo de este Estudio, estuvo constituido por las siguientes personas:

- Claudio Dodds Figueroa
- Claudio Dodds Hermosilla
- Margarita Edith Torres Gaete
- Edmundo Morales Espinoza
- Fabiola Valdebenito Norambuena

Como contraparte Técnica del Estudio, actuó el siguiente Equipo Técnico.

- Carmen Gloria Contreras F. MMA
- Priscilla Ulloa, MMA
- Francisco Donoso, MMA
- Adolfo López, COCHILCO
- Pedro Santic, COCHILCO
- María de la Luz Vásquez, Ministerio de Minería

2. RESUMEN EJECUTIVO

El análisis contenido en este informe, considera lo solicitado por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) al consultor Coprim. Para tal fin, se desarrolló la revisión de los criterios consolidados con el área de Normativa de Asuntos Atmosféricos del MMA, a través de un primer informe denominado de entendimiento, que entre otros: definió los escenarios a evaluar; la incorporación de límites de chimenea para instalaciones con área poblacional cercana y el cambio operacional para la Fundición Chuquicamata a una sola línea de fusión flash (HF), eliminando la operación del Convertidor Teniente, junto a la reducción de su capacidad de fusión.

El estudio de costo/efectividad realizado, se inició con una distribución teórica – másica modelada, de las fuentes esperables de emisiones para configuraciones tecnológicas típicas, existentes en las Fundiciones chilenas. Lo anterior junto a antecedentes recibidos de la encuesta realizada por MMA a las fundiciones del país, permitieron al consultor, calcular y contrastar abatimiento o fijaciones de S y As, versus los valores declarados. De acuerdo a este análisis, se utilizó un valor medio entre la fijación declarada y la modelada, dándole así una mayor representatividad al nivel de fijación base. Los valores se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Niveles de Fijación Base y Fuentes relevantes

Fundición	Hernán Videla L	Chuquicamata	Caletones	Ventanas	Potrerillos	Chagres	Afonorte
Esquema Operativo	1CT-1 de 2CPS-2PLG 1 HE-1 de 2HA	1HF-2 de 4CPS-2PLG PFE-3 de 6HA	2CT-2 de 4CPS-2PLG 4HLE-4 de 5HA	1CT-1 de 2CPS-1PLG 1HE-3HA	1CT-1 de 3CPS-1PLG 2 HLE-1 de 2HA	1HF- 1 de 3CPS-1PLG 2HLE- 1 de 2HA	1CN-2 de 4CPS-2PLG PFE- 2 HA
Capacidad conc. (kta)	350	1350	1372	436	680	660	1160
Fijación S base (%) (*)	89,2	93,2	87,8	93,3	82,3	95,6	92,7
Fijación As base (%) (*)	91,3	93,2	90,9	95,1	88,1	94,3	96,0
Fuentes relevantes de Emisiones	Colas de PAS, simple absorción	Colas de PAS simple absorción	CPS 4 sin conexión a PLG	Fugitivos Campanas primarias CT y CPS	MALGAS, CPS	Fugitivos campanas CPS	Fugitivos campanas CN y sangría MB
	Fugitivos campanas CT y CPS	Fugitivos campanas primarias CPS	Fugitivos campanas CT y CPS	Tratamiento gases chimeneas (límites), incluyendo lavado gases cola PAS de doble absorción.	Fugitivos campanas CT	Colas de PAS, doble contacto	Fugitivos campanas CPS
	Gases chimeneas secundarias, HE, HA, (límites)	Gases chimeneas secundarias, HA, (límites)	Colas de PAS simple absorción		Colas de PAS, simple contacto	Sangría de HF y HLE	Colas de PAS, una simple contacto

Fuente: Elaboración propia, en base Antecedentes recopilados por el MMA; (*) Considerado por el consultor

De las instalaciones analizadas, todas cuentan con tratamiento de los gases primarios en plantas de ácido, los cuales provienen de las etapas de conversión y fusión.

En la etapa de conversión, todas las instalaciones cuentan con Convertidores Peirce Smith (CPS), que mantendrán en el mediano plazo. El convertidor Peirce Smith posee una operación batch y realiza frecuentes giros, que dejan la unidad fuera del sistema de captura de gases denominado campana primaria, constituyendo así una fuente emisora importante.

En la etapa de fusión cinco de las instalaciones permanecerán con Convertidor Teniente (CT) o Reactor Noranda (CN), implicando ventajas y carencias ambientales, en tanto dos fundiciones centrarán la fusión solo en el Horno Flash de mayor hermeticidad y eficiencia energética.

Se mantiene en todas las instalaciones, el transporte de materiales calientes mediante ollas o tazas y grúas puente, que constituyen una fuente móvil de emisiones de difícil control, solo abordable con cambios estructurales de proceso.

La principal medida de control ambiental, con la que todas la fundiciones cuentan, es por tanto la limpieza y tratamiento de gases primarios, de alta concentración en SO_2 (PLG), que en primera instancia permite la fijación de material particulado y volátiles en polvos (cámaras y precipitadores electroestáticos), luego la de arsénico en una planta de lavado, neutralización y disposición de efluentes (PTE), y posteriormente la fijación del SO_2 como ácido sulfúrico de calidad comercial en plantas de ácido (PAS) de simple o doble contacto.

La captura y tratamiento de gases primarios, como medida base de abatimiento de azufre, se sitúa entre 82,3% y 95,6%, vale decir las fundiciones analizadas presentan altas diferencias de desempeño ambiental.

Como característica global del diseño de las plantas de ácido, éstas se encuentran también acotadas en volumen, concentración ($<11\%\text{SO}_2$) y capacidad de enfriamiento para tratar los gases primarios, no permitiendo en consecuencia, procesar gases fugitivos (diluidos) factibles de capturar en las sangrías o descargas de metal o escoria de las unidades de fusión, o fugitivos desde las campanas de CT y CPS, fuentes de emisiones, para lo cual se valorizan soluciones independientes. Existen en operación, plantas nuevas de alta eficiencia como las de Ventanas y en el extremo opuesto, de bajas eficiencias y antiguas como las de la Fundición Hernán Videla Lira, que hacen conveniente su reemplazo.

El diseño del sistema de manejo de gases y las campanas primarias sobre las bocas de reactores basculantes, como los CT y los CPS, determinan básicamente la real captura de los gases primarios a través de la geometría, sellado y tiraje o succión generada por el sistema de manejo de gases, situación que junto a los giros fuera de campana, constituyen una fuente importante de emisiones de gases

fugitivos, y cuyas medidas de control son abordados en el análisis incremental de escenarios de captura y fijación.

Para el tratamiento de escorias de fusión, las fundiciones analizadas usan hornos eléctricos de escoria (HE), en Chuquicamata, Ventanas y HVL, y Hornos de reducción y sedimentación (HLE) en Caletones, Potrerillos y Chagres, que constituyen en ambos casos, fuentes de emisiones de material particulado y arsénico, por lo que en la medida de lo técnico y económicamente factible, por menores costos en soluciones ambientales, se proyecta reemplazarlos por flotación de escorias, como en el caso de la Fundición Altonorte, que utiliza este proceso. El cambio involucrará operaciones de enfriamiento, chancado, molienda, flotación, disposición de relaves, con las medidas de control ambiental y autorizaciones pertinentes.

Los nuevos procesos, como la Tostación en Fundición Chuquicamata, deben ser diseñados para el cumplimiento de límites y nuevas normativas.

2.1 Medidas de control de emisiones como soluciones incorporadas para el análisis de escenarios

Para incrementar la fijación de SO_2 y As, se han priorizado, proyectado y valorizado, soluciones probadas en otras instalaciones, factibles de implementar en las fundiciones bajo análisis, que van desde el reemplazo de campanas primarias, nuevas campanas secundarias, modificaciones a sistemas de enfriamiento hasta el tratamiento de gases capturados desde campanas secundarias, o el tratamiento de gases de cola de las plantas de ácido (lavado alcalino), previa evacuación por chimeneas, para lograr el cumplimiento de límites en estudio.

El informe destaca también, que existen diseños mejorados de soluciones como las campanas integradas (primarias más secundarias); procesos en consolidación para el tratamiento de gases diluidos, como el Cansolv, Peracidox, Superox para

la generación de ácido, que las fundiciones pueden revisar en fases de ingenierías siguientes.

En este estudio de costo/efectividad, el consultor incluyó la optimización de la campana primaria en primera instancia, que permita la instalación de campanas secundarias con sistemas de ventiladores de tiro inducido y una planta de lavado alcalino previa evacuación de gases por chimenea, para el tratamiento de gases diluidos, ya limpios de polvo, como solución convencional, efectiva y consolidada en otras instalaciones.

Asimismo, según requerimiento de instalaciones cercanas al área poblacional, se incorporaron soluciones para el cumplimiento de límites en chimenea. Estas incluyen el tratamiento de gases de cola PAS, los hornos de tratamiento de escoria (HE), sistemas de postcombustión y opacímetros para los Hornos Anódicos, e inclusión de uso de torre des-mercurizadora en las fundiciones con presencia de mercurio (Paipote y Ventanas), así como inversiones y costos de operación para monitoreo y control de estos límites.

Las medidas de control incorporadas, incluyen soluciones generales y algunas particulares de cada instalación, incorporadas progresivamente para aumentar la captura y la fijación. En la tabla 2.1 se detallan las soluciones consideradas para cada fundición.

Tabla 2.1 Medidas de control Fundiciones

Medidas de Control / Fundición	Hernán Videla	Chuquicamata	Caletones	Ventanas	Potrerillos	Chagres	Altonorte
Captura total gases primarios			✓		✓		
Campanas Primarias CT	✓		✓		✓		
Mejoras MAGA, VT, PPEE	✓		✓		✓		
Campanas Primarias CPS	✓	✓			✓		
Nueva Planta ácido, doble absorción	✓						
Doble absorción PAS existentes		✓	✓		✓		✓
Captura y trat. gases sangría CT o HF, HE	✓	✓		✓			
Planta flotación escorias reemp. HLE		base	✓		✓	✓	existente
Campanas Secundarias y lavado gases CPS	✓	✓	✓	✓		✓	
Campanas Secundarias y lavado gases CT	✓		✓	✓	✓		✓
Límites por Chimeneas							
Tratamiento Gases cola PAS	✓	✓		✓		✓	
Post Combustión H. anódicos/opacímetros	✓	✓		✓		✓	
Torre des-mercurizadora en PLG	✓			existente			
Potenciamiento filtros mangas secado conc.				✓			✓

Fuente: Elaboración propia, incorporando soluciones recopilados por Cochilco y otros antecedentes disponibles.

2.2 Cumplimiento de Escenarios de Fijación de SO₂ y As

Con las soluciones analizadas, se ha determinado el cumplimiento cercano a los escenarios requeridos, y las toneladas de emisión residual de SO₂, con el cumplimiento adicional de límites de chimeneas para las 4 fundiciones que por ubicación les serían requeridos, Ventanas, Hernán Videla Lira, Chuquicamata y Chagres.

En relación a la temporalidad, para alcanzar el escenario de mayor exigencia, el desarrollo gradual de proyectos y cumplir las fases de ingeniería necesarias, se estima que la fijación requerida se podría lograr, a partir del año 2018. A modo de resumen, en la tabla 2.2.a se detallan las fijaciones y emisiones residuales de SO₂, estimadas para cada fundición.

Tabla 2.2.a Fijación y emisión residual SO₂ Fundiciones

Fundición % Fijación SO ₂	Hernán Videla		Chuquicamata		Caletones		Ventanas	
	Fijación %	t/a	Fijación%	t/a	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a
Escenario Base	89,2 ± 0,2	24.800	93,2 ± 0,3	53.000	87,8 ± 0,2	108.400	93,3 ± 0,6	18.300
Escenario 95%	95,8	9.700	95,3	36.700	95,6	38.800	95,4	12.700
Escenario 96%	96,6	7.800	97,3	20.700	96,4	32.000	96,9	8.600
Escenario 97%	97,5	5.900	97,3	20.700	n/a	n/a	no alcanza	no alcanza

Fundición % Fijación SO ₂	Potrerillos		Chagres		Altonorte	
	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a
Escenario Base	82,3 ± 1,2	77.200	95,6 ± 0,07	17.000	92,7 ± 1,3	58.600
Escenario 95%	94,7	23.000	cumple	0	95,4	34.400
Escenario 96%	96,1	16.920	96,3	14.460	96,7	25.000
Escenario 97%	n/a	n/a	97,7	9.060	n/a	n/a

Fuente: Elaboración propia, según lo indicado en capítulos 7 al 13.

Se destaca al respecto que la meta de fijación de 97% SO₂, adicional al de las cuotas anuales de emisión, se ve poco viable por la alta exigencia y confiabilidad requerida de cumplimiento en el mediano plazo de esta performance promedio, ante la usual variabilidad operativa de las Fundiciones y la ausencia de holguras para recuperar mayores abatimientos, frente a fallas de eficiencias temporales de los equipos o sistemas de control.

Lo anterior aplica a sistema complejos concatenados, tales como las operaciones unitarias en línea de las fundiciones de concentrados, que son sometidas a una detención anual para mantención cada 18 meses, interviniendo cada Planta de á como solución convencional Acido como equipo relevante de la operación y deteniendo la línea de procesos pertinente entre 20 a 25 días. Tal situación permite intervenir los equipos de la línea, realizar correcciones para recuperar rendimientos o eficiencias perdidas, y realizar los proyectos de inversión, minimizando pérdidas económicas. Es así como los rendimientos decrecientes del proceso se podrán recuperar cada 18 meses de manera relevante.

El cumplimiento de los escenarios de abatimiento, está también en forma importante suscrito al: abastecimiento de concentrados (para fundiciones maquiladoras); al cumplimiento de procedimientos de trabajo; el expertizaje de los operadores en el manejo y operación del sistema de gases no automático y al riguroso cumplimiento de los planes y programas de mantención preventiva.

Los niveles de captura y abatimiento de As asociados a la fijación de azufre, permitirían el cumplimiento de las cuotas de emisión en todas las instalaciones a excepción del escenario mas exigente para Chuquicamata, en que, a pesar de adecuar sus líneas de proceso con tostación previa de los concentrados MMH, está expuesta a concentrados variables provenientes desde la Mina Chuquicamata, que superan el 0,5% de As contenido. La tabla a continuación, detalla las fijaciones y emisiones residuales de As, estimadas para cada fundición.

Tabla 2.2.b Fijación y emisión residual As Fundiciones

Fundición % Fijación As	Hernán Videla		Chuquicamata		Caletones		Ventanas	
	Fijación %	t/a	Fijación%	t/a	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a
Escenario Base asoc. S	91,3	15	98,2 (*)	158	90,9	208	95,1	39
Escenario 95% S	97,2	5	98,2	156	93,3	153	96,8	25
Escenario 96% S	97,2	5	98,3	143	97,8	49	97,6	18
Escenario 97% S	97,6	4	98,3	143	n/a	n/a	no alcanza	no alcanza

Fundición % Fijación As	Potrerillos		Chagres		Altonorte	
	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a	Fijación %	t/a
Escenario Base asoc. S	88,1	405	94,3	97	96,0	195
Escenario 95% S	96,1	134	94,3	97	97,7	107
Escenario 96% S	97,3	92	94,3	97	98,8	58
Escenario 97% S	n/a	n/a	98,2	12	n/a	n/a

Nota (*): Incluye tratamiento de gases de campana secundaria CPS, existente.

Fuente: Elaboración propia, según lo indicado en capítulos 7 al 13.

El cumplimiento de límites en chimeneas, se ve factible, a excepción de niveles de As en los gases evacuados de Hornos de Tratamiento de escoria (HE) de la Fundición Ventanas, aunque las soluciones de control de límites, tales como el tratamiento de gases de cola de las plantas de ácido, representan un alto costo y un bajo nivel de reducción de emisiones de SO₂, tema a analizar por la autoridad ambiental.

2.3 Costos de Inversión y Operación de Implementación de los escenarios

La evaluación de costos de escenarios para cada instalación fue realizada considerando:

- Los costos de inversión asociados a cada una de las medidas de control sobre las fuentes de emisiones, considerando la reposición de los nuevos equipos o plantas al término de su vida útil en el horizonte de evaluación de 25 años. Fuente de estimación de estas inversiones fueron antecedentes de estudios previos recepcionados del MMA y estimaciones propias del consultor, de sus bases de datos
- Costos incrementales de operación por los sistemas de control incorporados, que incluyeron básicamente los mayores gastos energéticos, de mantenimiento de equipos, insumos, otros gastos y los costos de disposición de sólidos, en depósitos autorizados de los productos de la fijación de S y As, provenientes de plantas de lavado de gases, si éstos son pertinentes, en las soluciones incorporadas. La mayor producción de ácido generada fue incorporada, valorizada como un ingreso por ventas en condición local como crédito al costo.
- El análisis independiente de los costos de inversión y operación con y sin la aplicación de límites en chimenea, para determinar finalmente indicadores con y sin su inclusión.

- La determinación del Valor total actualizado de costos (VAC) y el Costo Anual Equivalente (CAE), así como las toneladas medias por año abatidas por proyecto y finalmente escenarios a evaluar.
- Determinación como medida de costo efectividad, del costo unitario por tonelada abatida, en base la relación CAE/tonelada media abatida.
- Análisis complementario de los requerimientos de energía eléctrica y agua por escenario, consumos que, aunque incorporados a los costos de operación, no incluyen los costos de distribución interna de los nuevos requerimientos (subestaciones, switchgear y otros).

2.4 Valorización Integrada de Costos de cumplimiento de escenarios

En base a la evaluación de costos realizado para cada Fundición, se reporta el costo integral del cumplimiento de planes en VAN y CAE, que representan cantidades de recursos significativos, para las empresas en particular y el país en su totalidad, a contrastar por el MMA, con el beneficio social asociado. Dicha evaluación se puede ver de manera resumida en las tablas 2.4.a y 2.4.b siguientes:

Tabla 2.4.a VAC Cumplimiento escenarios regulatorios kUS\$

VAC (KUS\$)	Hernán Videla	Chuquicamata	Caletones	Ventanas	Altonorte	Chagres	Potrerrillos	Total 7 Fu (kUS\$)
Fijación base SO ₂ %	89,2 ± 0,2	93,2 ± 0,3	87,8 ± 0,2	93,3 ± 0,6	92,7 ± 1,3	95,6 ± 0,07	82,3 ± 1,2	
Escenario	244.271	98.615	435.895	77.384	142.778		249.563	
Límites chimeneas	69.698	41.849	n/a	98.105	n/a	Cumple	n/a	209.652
Escenario 95% Total Acum	313.969	140.464	435.895	175.489	142.778	Cumple	249.563	1.458.159
Escenario	258.116	287.336	491.660	188.186	262.792	2.667	337.065	
Límites chimeneas	69.698	123.765	n/a	98.105	n/a	67.207	n/a	358.775
Escenario 96% Total Acum	327.814	411.101	491.660	286.291	262.792	69.874	337.065	2.186.598
Escenario	350.974	287.336	n/a	No alcanza	n/a	150.013	n/a	
Límites chimeneas	69.698	123.765	n/a	No alcanza	n/a	67.207	n/a	358.775
Escenario 97% Total Acum	420.673	411.101	n/a	No alcanza	n/a	217.220	n/a	2.426.802

Tabla 2.4.b CAE Cumplimiento escenarios regulatorios kUS\$/año

CAE (KUS\$/año)	Hernán Videla	Chuquicamata	Caletones	Ventanas	Altonorte	Chagres	Potrerrillos	Total 7 Fu (kUS\$/año)
Fijación base SO ₂ %	89,2 ± 0,2	93,2 ± 0,3	87,8 ± 0,2	93,3 ± 0,6	92,7 ± 1,3	95,6 ± 0,07	82,3 ± 1,2	
Escenario	19.108	7.714	34.099	5.489	11.169		19.523	
Límites chimeneas	5.452	3.274	n/a	7.051	n/a	Cumple	n/a	
Escenario 95% Total Acum	24.561	10.988	34.099	12.539	11.169	Cumple	19.523	112.878
Escenario	20.192	21.209	38.461	13.646	20.557	209	26.368	
Límites chimeneas	5.452	9.682	n/a	7.051	n/a	5.257	n/a	
Escenario 96% Total Acum	25.644	30.891	38.461	20.697	20.557	5.466	26.368	168.083
Escenario	27.456	21.209	n/a	No alcanza	n/a	11.735	n/a	
Límites chimeneas	5.452	9.682	n/a	No alcanza	n/a	5.257	n/a	
Escenario 97% Total Acum	32.908	30.891	n/a	No alcanza	n/a	16.992	n/a	186.874

Fuente: Elaboración propia, según lo indicado en capítulos 7 al 13.

De los antecedentes indicados, se destaca que para el escenario de 96% de fijación de SO₂, el mayor Valor Actualizado de Costos necesario para el cumplimiento de normativas, es requerido por la Fundición Caletones, que también tiene la mayor capacidad de fusión de concentrados, como instalación integrada a la mina El Teniente.

La fundición de Chagres, por el otro extremo, es la instalación que requeriría menores recursos, dado su situación de un mayor nivel de captura y abatimiento de S inicial y disponer de un horno tipo flash, como unidad de fusión mas estanca, y menores emisiones fugitivas.

Lo anteriormente mostrado, destaca también y avala el alto impacto del cumplimiento de límites en chimeneas, sobre el gasto total por escenario, que junto a un bajo nivel de fijación de SO₂, conlleva un significativo costo unitario de la tonelada abatida por tal efecto, frente al de la tonelada abatida promedio para el cumplimiento por escenario. Esto se detalla en los gráficos 2.4.a y 2.4.b.

Gráfico 2.4.a VAC para cumplimiento de Escenario 96% fijación SO₂

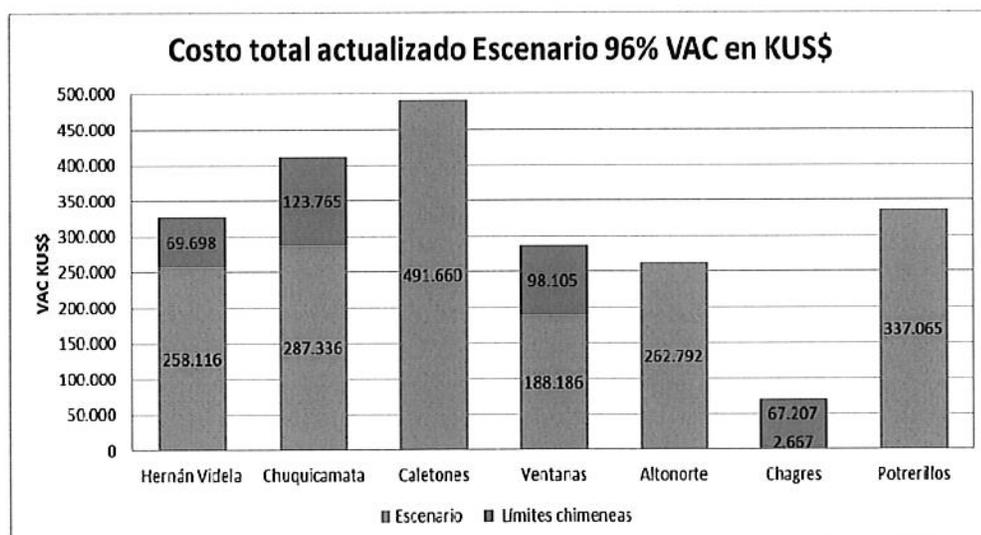
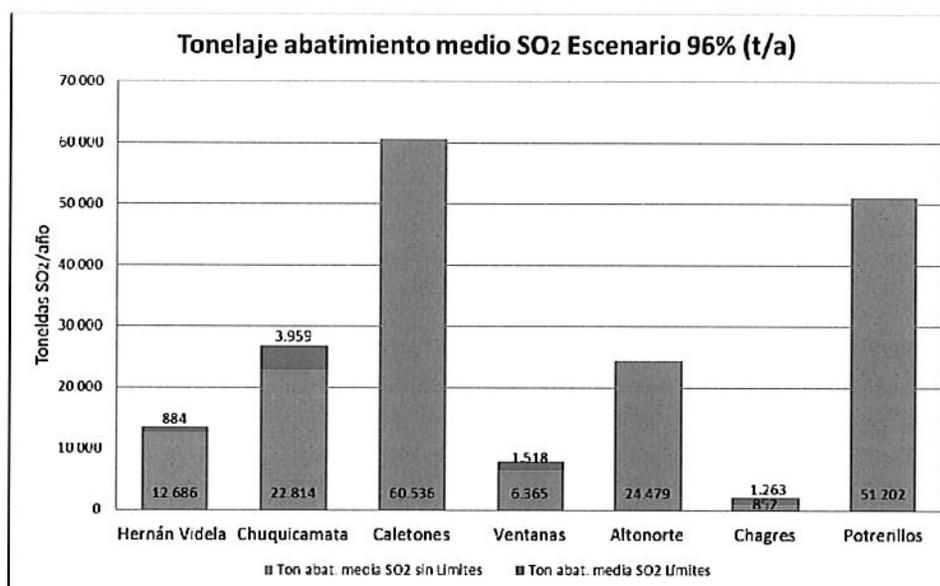


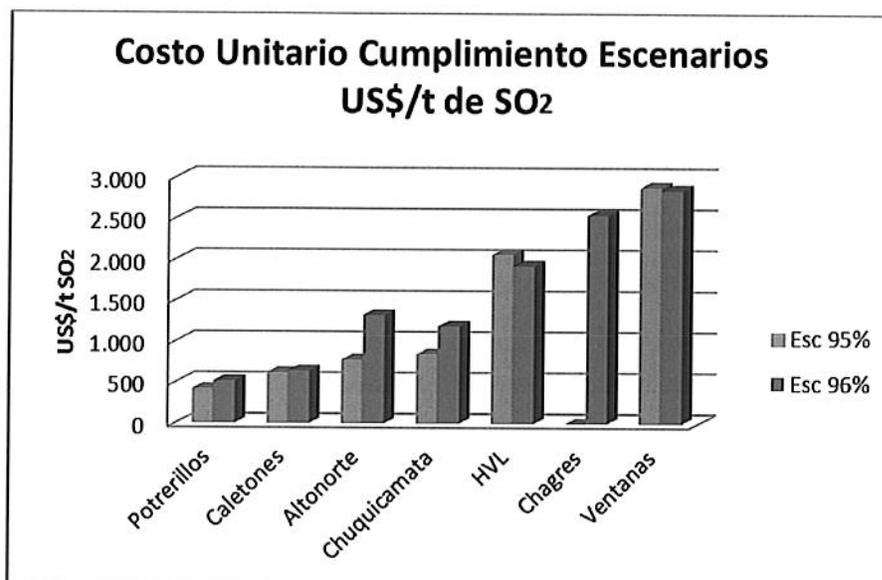
Gráfico 2.4.b Fijación de SO₂ para Escenario 96%

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 2.4.a anteriormente mostrado para el escenario de 96% de fijación de SO₂, evidencia también el impacto económico del cumplimiento de límites en chimeneas, para las cuatro instalaciones cercanas a la población, valor que para éstas representa cerca del 33% del costo total del escenario. El abatimiento comparativo en SO₂, indicado en gráfico 2.4.b destaca también en color rojo, la fijación de SO₂ por límites en chimeneas para esas instalaciones, que conlleva el tratamiento de gases de colas de las plantas de ácido, las cuales son una principal fuente emisora.

Como medida de costos/efectividad, se ha valorado la relación CAE/tonelada media de SO₂ abatida, la que a ordenado en orden creciente, para los escenarios de 95% y 96%) de fijación, según indicado en gráfico 2.4.c siguiente.

Gráfico 2.4.c Costo-efectividad Fundiciones por Escenarios



Fuente: Elaboración Propia.

Los costos unitarios a nivel país determinados por escenario, muestran el alto impacto en las instalaciones de menor capacidad de tratamiento y maquiladoras, (Ventanas y HVL), hasta triplicando el costo unitario medio de las instalaciones de actual mayor nivel de tratamiento y emisión, según se indica en gráfico anterior.

Agravan esta situación, los proyectos requeridos para el cumplimiento de límites de chimenea, para las instalaciones anteriormente mencionadas por su ubicación adyacente a centros poblados, instalaciones en que el costo de la tonelada abatida para cumplimiento de límites alcanza hasta 6.166 US\$/t, como en el caso de la Fundación Hernán Videla Lira para el escenario de 95%, que absorbió el total de cumplimiento de límites, con el tratamiento de gases de colas de la planta de ácido, en este escenario.

En general los costos se incrementan por mayores niveles de abatimiento de SO₂, y disminuye la cantidad de abatimiento factible de tratar desde fuentes fijas, por lo

tanto, para lograr mayores abatimientos se requerirá evaluar cambios de tecnología de fusión o estructurales a los procesos, situación que el sector de la industria debe considerar, así como las condiciones particulares de cada instalación: capacidad, abastecimiento de concentrados, ubicación y otros.

Como medida comparativa, se referencia lo acontecido en otras realidades, tal es el caso de la legislación de Canadá para las fundiciones de concentrados de cobre², que ha considerado exigencias disimiles para cada fundición en función de capacidad y mayores criterios de gradualidad.

2.5 Sensibilidad del efecto valor residual de reinversión posterior a 25 años

Se analiza el impacto del valor residual de reinversión posterior a 25 años en cada una de las fundiciones. El valor residual se establece en base a la vida útil determinada en la inversión, criterio que no considera los proyectos como un negocio en marcha. Para este análisis se considera un valor residual al 20% del libro (uso como chatarra), dado que los componentes de planta son bienes no fácilmente transables.

La tabla 2.5 muestra el efecto del valor residual en el VAC para los escenarios de 95%, 96% y 97% S. Los valores indicados, representan la reducción porcentual en el VAC que implica tomar este criterio.

² Technical Assessment of Environmental Performance and Reduction Options for the base Metals Smelter, Canada 2004.

Tabla 2.5 Efecto del valor residual de reinversión en el VAC

Efecto en VAC (%)	Hernán Videla	Chuquicamata	Caletones	Ventanas	Altonorte	Chagres	Potrerillos	Total 7 Fu (%)
Escenario 95%S	8,6	1,8	1,4	3,8	4,3	Cumple	3,5	2,9
Escenario 96%S	8,4	5,8	1,2	4,6	4,1	1,6	3,8	3,3
Escenario 97%S	6,6	5,8	n/a	No alcanza	n/a	6,3	n/a	3,5

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar de la tabla que la reducción es marginal, considerando las 7 fundiciones el VAC disminuye para el escenario 95% S un 2,9%, para el escenario 96% S un 3,3% y finalmente para el escenario 97% S un 3,5%.

3. ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES TECNOLÓGICAS FUNDICIÓN Y FUENTES DE EMISIÓN: AZUFRE- ARSÉNICO

3.1 General

- Objetivo

El presente capítulo tiene por objetivo:

- Estimar y analizar las emisiones típicas de S y As generadas en los procesos de Fundición, bajo configuraciones tecnológicas existentes (base de procesos), expresando estas fuentes en función del contenido del elemento en el concentrado.
- Disponer de una base cuantitativa para revisar individualmente en cada instalación, las diferencias existentes que avalan sus desiguales niveles de captura y fijación de S y As, y luego en una siguiente etapa, los proyectos de mejora individuales necesarios para enfrentar los nuevos escenarios de fijación y emisiones de S, As, MP y Hg, así como su relación de beneficio costo.
- Contrastar simplificada en el siguiente capítulo, el nivel de captura declarado en cada instalación para el año 2010, principalmente la distribución de las fuentes de emisión, haciendo diferencias por mejoras o falencias existentes en cada instalación, frente a las consideradas en la distribución de su configuración, priorizando las fuentes de mayor cuantía.

3.2 Procesos en Fundición Existentes en Chile

Las operaciones unitarias que caracterizan el proceso de Fundición de concentrados de cobre y por ende también hoy, el de las instalaciones chilenas son:

- La recepción, almacenamiento y dosificación de la carga, con concentrados sulfurados de 28% a 30% de cobre y contenidos de hierro, azufre y arsénico dependientes de sus mineralogía.
- El secado de concentrados desde 8%-9% hasta 0,2% humedad para su posterior transporte neumático hasta la etapa de fusión.
- La fusión de concentrados en hornos de alto uso de oxígeno, estáticos como el Horno Flash (FSF) o de fusión sumergida en un baño en rectores basculantes como el Convertidor Teniente (CT) o Reactor Noranda (RN), que generan matas de cobre o metal blanco, escorias silícico-ferrosas, y gases primarios ricos en SO₂, los cuales contienen volátiles y material particulado.
- El tratamiento de escorias de fusión y de conversión para la recuperación del cobre contenido, ya sea por procesos pirometalúrgicos (HLE/HE) o por enfriamiento- chancado y flotación (PFE). Para las escorias de refinación se utiliza la separación de la fracción metálica y tratamiento hidro- metalúrgico de la fracción con cobre oxidado, proceso también usado para el tratamiento de polvos recuperados (precipitadores electrostáticos).
- La conversión de la mata o metal blanco por oxidación en convertidores Peirce Smith (CPS), genera cobre blister, escoria con el hierro residual y gases primarios ricos en SO₂, con contenidos de volátiles y material particulado.
- La captura, enfriamiento, manejo y limpieza de los gases primarios, para su posterior tratamiento en Planta de ácido.

Este sistema cuenta con campanas primarias colectoras de los gases sobre los equipos (CT, RN y CPS), enfriamiento de gases (enfriadores radiativos, caldera o cámaras evaporativas), limpieza de los gases en precipitadores electrostáticos secos (PE), Ventiladores de Tiro inducido intermedios (VTI), eventualmente cámara de mezcla y limpieza húmeda de los gases (mediante scrubber de lavado), generando una solución a tratar en una planta de efluentes y gases limpios de polvo e impurezas que se dirigen al área de conversión (SO_2 a SO_3) de la Planta de ácido sulfúrico (simple o doble contacto), que después de pasar por la torre de absorción genera ácido sulfúrico y gases de cola a chimenea.

Como se indicará en otros estudios de respaldo³, la fusión en el Horno Flash presenta la ventaja de hermeticidad y de obtener un menor volumen de gases de salida, lo que potencia el enfriamiento de los gases con recuperación del calor en una caldera adyacente al horno, generando vapor previo a su limpieza en precipitadores electrostáticos (PE), los cuales recuperan el polvo arrastrado y volátiles sedimentados, dejando a los gases aptos para su posterior tratamiento en la Planta de ácido sulfúrico.

- El refinado del cobre blíster se realiza en Hornos Basculantes mediante procesos de oxidación y reducción (procesos batch de soplado y escorificado del cobre). El refinado alimenta finalmente a una rueda de moldeo de ánodos, obteniendo el producto final de 99,6% Cu con forma definida, que se despacha hacia una Refinería.

Estas operaciones permiten el transporte de materiales y líquidos en caliente de matas, metal blanco, escorias y cobre blíster, que se realiza mediante tazas u ollas, que movilizadas mediante grúas puentes, posibilitan el flujo de materiales

³ Informe Final "Antecedentes Técnicos y Económicos para elaborar una norma de emisión para Fundiciones de Cobre", Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Dic. 2009.

para la continuidad operativa y provocan el enfriamiento parcial del material, generando circulantes a reprocesar, emisiones de gases y componentes volátiles.

3.2.1 Operaciones Unitarias relevantes

Bajo la perspectiva de reducción de emisiones e incremento de la fijación de Azufre y Arsénico, la operación de mayor continuidad y cuantía en generación de gases primarios con S y As la constituye el **Proceso de Fusión** y oxidación parcial del azufre libre pirítico y el sulfuro de hierro, que en Chile se realiza en dos tipos de tecnologías:

- a) Horno Flash: Horno estático donde el concentrado en presencia de oxígeno industrial se combustiona en un quemador ubicado en una torre de reacción, separa fases en un settler y evacua gases en un shaft, conectado directamente con una caldera de gases, que los enfría previo al paso a precipitadores electroestáticos, donde se separa el polvo que contiene volátiles sedimentados y parte del concentrado, y fundente arrastrado en la corriente gaseosa.

Altos niveles de enriquecimiento de oxígeno, permiten la generación de un flujo menor de gases (40 a 60 kNm³/h con alto contenido de SO₂), que mezclados con otros gases de menor concentración (usualmente del proceso de conversión), son tratados en la planta de ácido sulfúrico.

La mata o eje generado con contenido de cobre entre 63% a 66% y las escorias generadas con contenidos de cobre entre 3% a 5% son corrientes periódicamente extraídas mediante sangrías, pasajes y canaletas usualmente cubiertas hasta las tazas u ollas de transporte.

- b) Convertidor Teniente y Reactor Noranda: Son reactores basculante, los cuales a través de toberas de inyección y soplado insuflan el concentrado y el aire enriquecido con oxígeno (30% a 38%) directamente a la fase de metal del

baño fundido, donde se realiza la fusión continua y oxidación del azufre pirítico y del sulfuro de hierro.

El metal blanco o mata y la escoria se evacuan mediante sangrías laterales, ubicadas en los extremos del horno (culatas). El contenido de cobre en el metal blanco es de 73% - 76% y el de la escoria es de 8% - 10%.

Dependiente del nivel de fusión alcanzado, 1.500 a 2.500 tpd. de concentrados, los gases generados con 25% a 34 % de SO₂ y alto contenido de volátiles, más una cantidad significativa de aire de dilución infiltrado (entre 100% a 140%) en la captura primaria de gases, son captados por succión mediante una campana primaria colectora de gases ubicada sobre la boca del horno. La succión es mediante el tiro forzado, generado por Ventiladores de Tiro Inducido (VTI) o directamente por los ventiladores de la Planta de Ácido. Los gases son así conducidos a través de un sistema de manejo de gases que comprende cámaras de enfriamiento y limpieza de gases en precipitadores electrostáticos, con flujos entre 120 a 150 kNm³/h. Las concentraciones en SO₂ de los gases son estables, con contenidos entre 9% a 14%. Por cinética y nivel de oxidación, estas unidades presentan un mayor nivel de destilación de As que la fusión flash, así como también un menor arrastre de material particulado en los gases evacuados.

En las instalaciones de fundición de concentrado de cobre existentes en Chile, para los procesos de fusión se usa mayoritariamente la fusión en CT o RN (cinco instalaciones), situación generada principalmente por los menores niveles de inversión que conllevaron estas unidades, sus bajos costos de operación, know how de desarrollo interno propio, facilidades de adaptación del tipo de horno a las instalaciones que anteriormente operaban con hornos tipo reverberos de alto consumo energético y experiencia en el uso de Convertidores. Parte de estos reactores, mantienen un sistema de adición de carga fría y fundentes por un garrun localizado en el manto del reactor, con adición de aire e insumos, que debidamente molidos pueden ser inyectados junto al concentrado.

Cada unidad de fusión genera una línea de producción cuya capacidad de producción anual fluctúa entre 350 kta a 750 kta de concentrados (según el tamaño del reactor), generando metal blanco, escorias y gases primarios de alto contenido de SO_2 . El horno flash con una mayor disponibilidad operativa permite procesar tonelajes superiores, condición aún no alcanzada en los hornos existentes en Chile.

La siguiente operación unitaria relevante de los procesos de fundición, la constituye el **Proceso de Conversión**, que mediante ciclos batch implica la oxidación del FeS y posteriormente del Cu_2S , con generación de escorias, gases sulfurosos y finalmente cobre blíster, con una ley de 99,3% cobre.

Esta operación en Chile, al igual que en la mayor parte de las fundiciones existentes en el exterior, se realiza en reactores cilíndricos basculantes, denominados Convertidores Peirce Smith, que cuentan con una boca central para el carguío de materiales (mata o metal blanco líquido y materiales molidos como; fundente si es requerido, carga fría o material circulante utilizado para controlar la reacción exotérmica de oxidación) y evacuación de gases en forma permanente durante el proceso de soplado, insuflando mediante toberas bajo el baño, aire levemente enriquecido con oxígeno (niveles inferiores al 30%).

Dependiente del tamaño de los reactores y del número de toberas que disponen, se procesan 3 a 5 tazas u ollas de mata, a través de tiempos de ciclo que fluctúan entre 4 a 6 horas con 55% a 70% de tiempo de soplado, obteniendo entre 70 t a 100 t de cobre blíster por ciclo, el cual es extraído al igual que la escoria por la boca, para ser trasladadas mediante ollas o tazas a la etapa siguiente de refinación, también de tipo batch.

Dado que el proceso de oxidación es exotérmico para controlar la temperatura del baño y por ende la vida útil de los reactores se utiliza carga fría, material circulante o fusión de scrap de refinería que usualmente mediante tazas, ollas o contenedores, son agregados sobre el baño a través de la boca. De esta manera

la unidad esta expuesta a frecuentes giros del reactor para el agregado de materiales, que implican dejar la boca del reactor fuera de la campana primaria colectora de gases y por ende la generación de gases denominados fugitivos. La campana por su parte es un radiador y un intercambiador de calor enfriado por agua, que presenta una inclinación definida y una holgura en el sello contra la boca, usualmente alta por deformaciones de material, ensuciamiento, impactos en el manejo de tazas, factores que junto al tiraje definen la eficiencia de captura, alta al inicio de una campaña y baja al término de ésta, provocando una alta infiltración de aire y dilución, y enfriamiento de los gases captados.

Característico de este proceso de conversión es la generación de gases sulfurosos en concentración decreciente durante el ciclo, que producto de la dilución generada por la infiltración de aire en la campana primaria colectora presenta concentraciones de SO_2 entre 12% a 4%. Estos gases de conversión junto a los gases de fusión, deben ser tratados en la Planta de ácido sulfúrico, con un proceso previo de enfriamiento y posterior limpieza de polvos e impurezas sedimentadas (As, Sb, Pb), que se han distribuido hacia la fase gaseosa.

Las instalaciones en la conversión operan con dos o más unidades en caliente, desfasando la etapa de soplado entre ellas, de manera tal de dar continuidad al flujo de gases hacia la planta de ácido.

Las debilidades de la conversión batch, han sido tecnológicamente superadas por la tecnología de conversión continua, denominada Flash Converter, ésta mantiene sobre tres fases coexistentes (escoria-mata-cobre) la adición y oxidación de mata fría y fundente granulados en la zona de reacción, una zona de separación de fases y un shaft de evacuación de gases. La conversión continua flash genera en una unidad sellada gases de alta concentración de SO_2 , factibles de ser diluidos con gases captados desde las sangrías laterales del horno para su posterior tratamiento. Este cambio tecnológico estructural, permite separar las instalaciones de fusión de las de conversión, a través del enfriamiento, molienda de la mata o metal y opera ya consolidado en una instalación de USA y dos en China,

implicando una alta inversión y costos de operación superiores a los de manejo en caliente del metal.

Codelco Chile estuvo desarrollando también un proceso metalúrgico continuo de conversión en un horno basculante de tipo cilíndrico y de mínimo giro, que para la evacuación de gases podría contar con una campana-caldera recuperadora de calor, y descarga de escorias y blíster por sangrías en las culatas del horno.⁴

3.2.2 Fuentes de emisiones

Definidos por los procesos, ubicación y geometrías de equipos, estado mecánico y otros factores, se generan fuentes de emisiones por:

- La ineficiencia en la captura de gases por campanas primarias (CT y CPS), en zonas no afectas a la succión o tiraje del sistema de manejo de gases, generado variaciones en los ventiladores de tiro intermedio del sistema (idealmente uno por unidad), por competencia de gases en la descarga o unión con los gases del CT o en la succión desde la Planta de ácido.
- Las pérdidas de gases en los giros de los reactores fuera de campana, genéricamente llamados gases fugitivos (fuera de sistema de captura), para adicionar o extraer materiales por boca (usual en los CPS), o por operaciones propias de estos reactores, como el reemplazo de toberas de inyección, cambio de pasajes, mediciones de niveles y repaso de toberas obstruidas en el CT. Se intenta colectar estos gases a través de campanas secundarias, que alimentan un circuito independiente al de los gases primarios, como el antiguo existente en la Fundición Chuquicamata, con adición de cal pulverizada y filtración para limpieza del As.

⁴ The Carlos Díaz Symposium on pyrometallurgy. Pilot-scale evaluation for the Codelco continuous converting process, p 49.

- También se generan gases fugitivos en menor escala en la extracción de productos, a través de sangrías y canaletas, en el transporte de líquidos fundidos y el vaciado mediante ollas hacia los equipos, principalmente en el manejo de matas.
- Existen también otros gases denominados secundarios, por su menor contenido de SO_2 , aunque contienen otros contaminantes y material particulado los que se generan en otras operaciones unitarias o reactores existentes.

Entre estos gases secundarios están las chimeneas de los Hornos Secadores Rotatorios o tipo Fluosólido producto del azufre contenido en el combustible combustionado para generar el secado y del material particulado producto de la ineficiencia de colección de polvos del sistema.

También en los Hornos de Tratamiento de escoria (HLE, HE) se generan gases secundarios de baja concentración de SO_2 con presencia de As por desorción de la fase metal, CO y hollín por el uso de reductores, para su control se utilizan incineradores o quemadores de post combustión previa evacuación por chimenea, como en el Horno Eléctrico de operación más continua que los HLE.

En los Hornos de Refinación donde se oxida el azufre residual del blister y se usan quemadores, se generan gases que presentan menor contenido de SO_2 , presencia de carbón incombusto y algunos volátiles residuales, gases que son directamente evacuados a través de chimeneas.

Estas emanaciones de gases, volátiles y sólidos sublimados genéricamente denominadas emisiones, impactan directamente la condición de trabajo del medio laboral, condición regulada por normas de Higiene Industrial y al Medio Ambiente circundante, condición que debe ser hoy revisada con nuevas normativas ambientales.

La cuantía de estas emisiones es de difícil determinación por mediciones empíricas, y corresponden mas bien a criterios propios de cada instalación, producto de su experiencia operativa y de resultados de soluciones de diseño, criterios por fuentes priorizados anteriormente por mediciones en el ámbito de Higiene Ambiental y límites de exposición de los trabajadores, que han llevado a las instalaciones a diseñar sistemas de captura en sangrías de reactores, ventiladores y evacuación de gases pre-limpiados hacia una chimenea, como la mejor solución hoy existente para flujos intermitentes de alta dilución. Solo la Fundición Altonorte ha concebido a la fecha un proyecto con tratamiento de gases fugitivos de alto volumen y baja concentración, cuyo tratamiento debería implementar el año 2012.

Ante la inexistencia de metodología estándar y la existencia de coeficientes de distribución por fases en los procesos de S y As que están científicamente determinados en rangos definidos, junto a balances de masa teóricos y criterios de eficiencia de equipos, permiten generar **estimaciones razonables**, que para efectos de este estudio de efectividad-costos de soluciones serán consideradas. Para este efecto en este capítulo se caracterizan 4 esquemas operativos generales de Fundición, existentes en las fundiciones chilenas, para a continuación ser contrastadas con el nivel de captura global determinado para cada instalación en el año 2010, según su estatus operacional.

Las fuentes de emisiones de SO₂ y As, con los criterios así establecidos, constituyen parámetros comúnmente usados en la industria, utilizables para proyectos, con contrastación de éstos sólo por balances exhaustivos de materiales (S y As), criterios finalmente incorporados en el balance de masas y energía del sistema, que en este estudio se resumen en los diagramas por esquema operativo mostrados en puntos siguientes para instalaciones típicas, tales como:

- Fundición con CT-CPS y Horno Tratamiento de escoria (HLE/HE)
- Fundición con CT-CPS y Tratamiento de escorias vía flotación, retorno de concentrado de escoria a fusión.

- Fundición con HF-CPS y Hornos de tratamiento de escorias.
- Fundición con HF-CPS - Planta Flotación de escorias (PFE)

Se destaca en especial para la consideración de eficiencias de equipos de captura que los procesos piro metalúrgicos existentes en el país, son operaciones en general de alta antigüedad con limitaciones de espacio en ancho y altura de la nave o edificio que alberga los equipos y el sistema de transporte de materiales en caliente y que han tenido una adecuación gradual a incrementar en el tratamiento de gases sulfurosos primarios hasta ácido sulfúrico, producto de los Planes de descontaminación y los límites de emisión existentes de S y As.

Para efectos de esta modelación simplificada, elaborada a partir de balances másicos, coeficientes de distribución típicos de la tecnología, equilibrio en la generación y consumos de circulantes, exceptuando la salida a ventas o tratamiento externo de los polvos de Precipitadores Electrostáticos del sistema primario (0,32% y 22% del S y As alimentados respectivamente), se consideran las siguientes fuentes de emisión:

- Emisiones de S desde chimeneas de secado, producto del Azufre contenido en los combustibles utilizados en el secado directo de concentrados, con gases de combustión.
- Emisiones de S y As, generadas por la no captura de gases primarios desde la boca del CT, durante el soplado por ineficiencia de la campana y/o variaciones del tiraje (1mm de agua y eficiencia media de captura de 97% durante la campaña de 12 a 18 meses del reactor) o emisiones durante los giros para operaciones de carguío de materiales o volteo para reparación de toberas de inyección o mantenciones de pasajes. Consideración de distribución de estas fuentes entre 61% y 31% del total asignado en la modelación.
- Emisiones de S y As pertinentes a gases generados en la extracción y transporte del metal blanco líquido desde el CT y HE/HLE (subsistema fusión)

hacia la fase siguiente de conversión. Elemento de despresurización determinado en el balance de masas, como una fracción menor de los gases generados.

- Emisiones de S y As pertinentes a gases generados en la extracción, transporte y vaciado de escorias desde el CT u horno Flash, en general de menor valor que el de mata o metal blanco.
- Emisiones secundarias generadas por las chimeneas de los Hornos de Limpieza (subsistema HLE), basadas en el uso de materiales para este proceso endotérmico y coeficientes de distribución por fases corroborados por muestreo y análisis de los líquidos de alimentación y descarga.
- Emisiones de S y As, generadas por la no captura de gases primarios desde la boca de los CPS por emanaciones de gases fuera de campana durante los giros y por ineficiencia de la campana durante el soplado normal, consideración como distribución entre estas fuentes 70% y 30% respectivamente del total asignado en la modelación.
- Emisiones de S y As, generadas por gases primarios fugitivos desde la campana de los CPS, durante los giros para las operaciones de carguío de mata o metal blanco y adición de carga fría.
- Emisiones de S y As en CPS, por ineficiencia de la campana y/o variaciones del tiraje (1mm de agua y eficiencia media de captura de 95%) considerada durante la campaña de 4 a 5 meses por reactor si disponen de reparaciones parciales de línea de toberas.

Fundamental en esta operación, es la regulación del tiraje, determinado por el VTI asociado a la unidad y su sistema de control, que normalmente no es una unidad dedicada y es compartida por todas las unidades de conversión instaladas.

La modelación asume 30% de las emisiones por esta causa, y el 70% restante por emisiones durante los giros para operaciones de carguío de materiales o volteo que dejan fuera de la campana la boca generando emanaciones instantáneas de corta duración hasta la estabilización de presiones, durante los giros del CPS fuera de campana o cortina, como una parte del gas evacuado, ya que por concepción el volteo de los reactores se realiza con soplado por toberas, para evitar su obstrucción.

Estas emisiones de S y en menor nivel de As se generan principalmente en el carguío de metal o mata al CPS, adición de carga fría y scrap por la boca y en menor grado el vaciado mediante ollas del blíster generado y en la extracción y transporte de la escoria de conversión.

- Emisiones generadas en las chimeneas de evacuación de gases de los HLE o HE, producto del uso de combustible y reductor en el proceso endotérmico de la etapa de reducción y de mantención de temperatura durante sedimentación de los semi-ciclos del HLE, y con mayor continuidad en los HE, que usualmente cuenta con post-quemadores para el carbón incombusto o usan gas natural de menor contenido de S.
- Emisiones secundarias de S y As de los proceso de oxidación del cobre blíster en los hornos de refino, que descargan sus gases por chimeneas independientes a baja altura.
- Emisiones de gases de cola de las plantas de ácido sulfúrico, dependientes de su proceso de contacto y eficiencia de reacción (simple o doble del reactor de transformación de SO_2 a SO_3) y del equipo de absorción, descargando gases con SO_2 residual y eventualmente SO_3 por chimenea independiente.

3.2.3 Criterios utilizados para estimación de emisiones Fugitivas por Boca y Chimeneas

Las emisiones generadas desde la boca de los reactores, constituyen la fuente más importante relacionada con la existencia de puntos de presión dentro de la campana primaria, no compensadas con el tiraje aplicado a la descarga de ésta, aun existiendo infiltración de aire frío. Se cuantifican en base a una eficiencia asignada a la campana, que para los CT existentes se proyecta de 97%.

La antigüedad, deformaciones y situación de las campanas decreciente durante la campaña de los reactores, junto a la interacción del soplado de ciclos de conversión batch en 2 o 3 unidades hacen proyectar una eficiencia media de campana de CPS existentes no superior al 95%, dependiente de su estado mecánico y mantención.

3.2.4 Emisiones generadas por gases primarios fugitivos desde reactores CT y CPS, por emanaciones durante giros fuera de campana o la cortina.

Como antes se indicó, la fuente principal de emanaciones de gases fugitivos es producida durante las operaciones de carguío de ollas con metal blanco, circulante, scrap o carga fría durante los tiempos que toman dichas operaciones. Éstas pueden ser significativas si la unidad continúa soplando ya que se deja la boca fuera de campana (emisión estimada del 100% de gases en boca durante el tiempo fuera de campana) o en menor escala de despresurización del reactor con el baño expuesto, en el caso de giro normal con bajo nivel de baño, común en las operaciones iniciales de carguío de CPS o descarga del blíster o escoria, razón por la cual como base de estimación se considera que durante los giros, emiten el 50% del flujo medio de gases por boca, durante el tiempo total de eventos de giro y carguío. La duración de estas operaciones dependerá directamente del tipo de ollas utilizado y disminuyen con el uso de elementos de mayor tamaño y para efectos de esta modelación base se han considerado ollas de 6 metros cúbicos, alimentando CPS de 4 metros de diámetro y 9,15 m de longitud.

3.2.5 Emisiones fugitivas en descarga de pasajes de sangría metal blanco, vaciado a ollas y transporte de materiales líquidos.

Son las emisiones pertinentes a gases desorbidos durante la sangría, el transporte mediante canal del metal blanco y escoria de la unidad de fusión bajo la consideración de que el gas desorbido por el líquido en la descarga y transporte es el equivalente a una fracción menor de los gases por boca que representaría alrededor del 3% del S contenido en la corriente de metal como principal fuente.

Para el mejoramiento del medio ambiental laboral, las instalaciones en general han instalado un sistema de captación de gases en las sangrías y canal de descarga de mata o metal blanco del FSF o eventualmente del CT, que capta los gases diluidos con aire, evacuándolos mediante una chimenea auxiliar o son tratados por inyección de cal y filtración como en el caso de Chuquicamata.

La eficiencia de captura de estos sistemas incluyendo la olla receptora es baja ya que fluctúa entre 50% a 70%, y está condicionada por el tiraje e infiltración de aire necesaria para barrer los gases generados en forma periódica. Estos sistemas secundarios que son de baja concentración y alto volumen, en relación al volumen de gas primario a tratar en la plantas de ácido sulfúrico.

3.2.6 Emisiones pertinentes a gases generados en el transporte y vaciado mediante ollas del blíster a los Hornos de Refino por desorción de azufre

La desorción de Azufre y absorción de oxígeno desde el blíster, fue comprobada analíticamente en las pruebas de conversión continua, constituyendo una fuente de emisión, que en un proceso optimizado de conversión continua puede ser controlada a través del transporte por canal cubierta hacia los Hornos de refino.

3.2.7 Emisiones pertinentes a gases generados en el transporte y vaciado mediante ollas de la escoria de conversión a enfriamiento o reproceso en caliente en el CT

La estimación considera una pérdida asociada del 10% del Azufre y 0,5% de la escoria contenida, calculada por el balance de masas.

3.2.8 Emisiones pertinentes a gases de cola de la Plantas de ácido sulfúrico

Consideración genérica de una eficiencia de conversión de 97% para las plantas de simple contacto y de 99,0% para las plantas de doble contacto, considerado para la modelación como situación base simple contacto, condición más frecuente en las instalaciones existentes.

3.3 Resultados de Estimaciones por Esquema Operativo

Figura 3.3.a Distribución fuentes de emisión S CT-CPS-HLE/HE

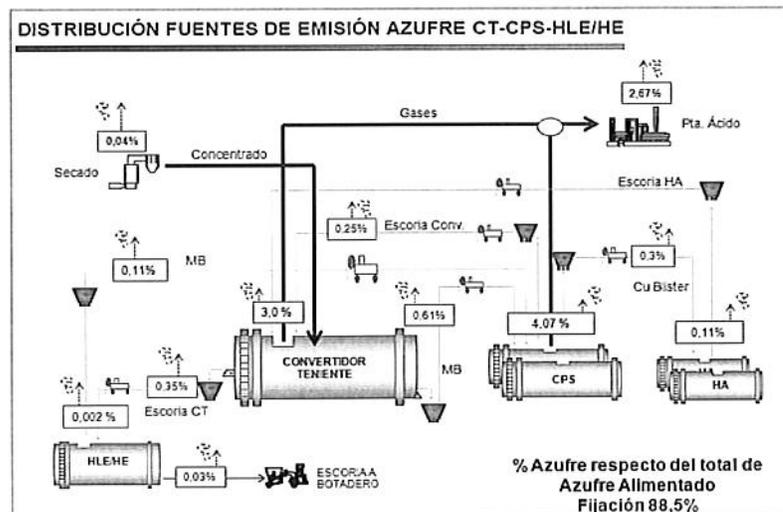


Gráfico 3.3.a Distribución fuentes de emisión S CT-CPS-HLE/HE

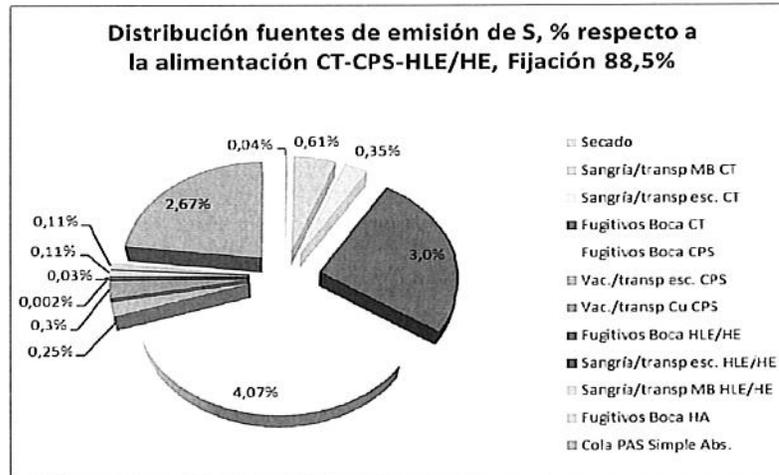


Figura 3.3.b Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-HLE/HE

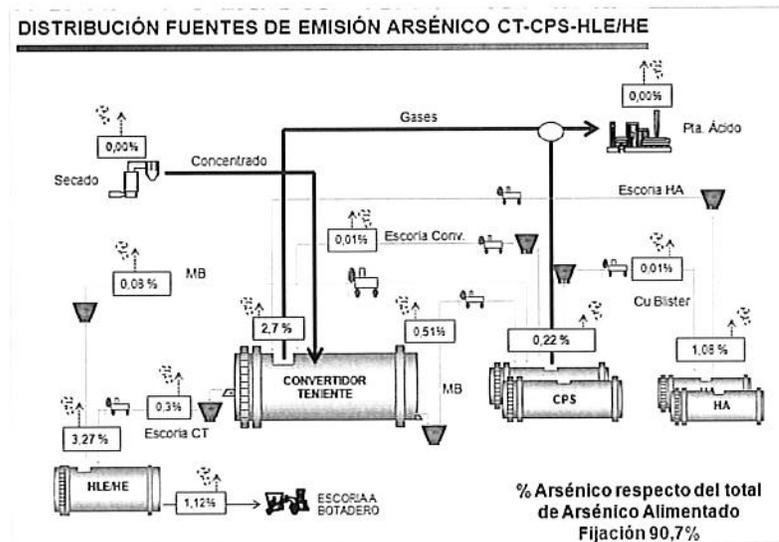


Gráfico 3.3.b Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-HLE/HE

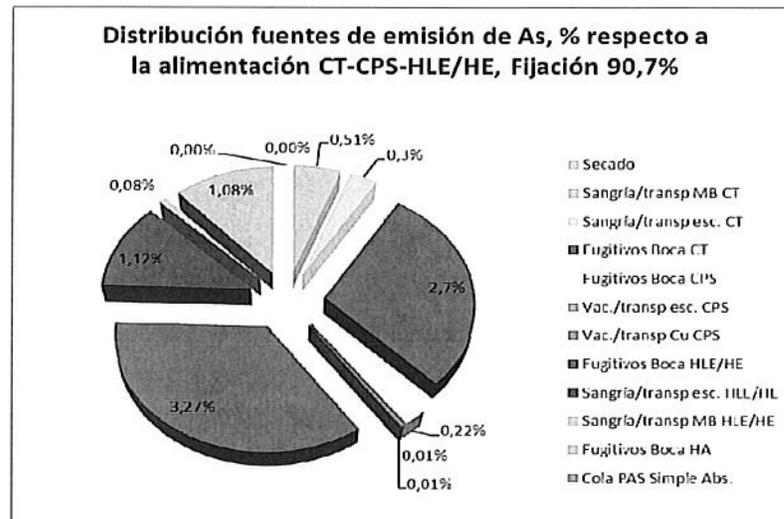


Figura 3.3.c Distribución fuentes de emisión S CT-CPS-PFE

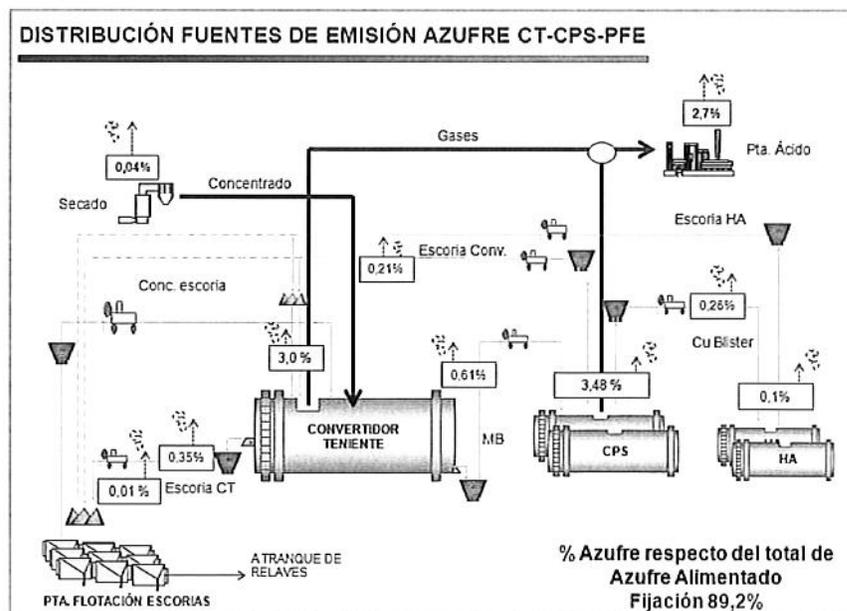


Gráfico 3.3.c Distribución fuentes de emisión S CT-CPS-PFE

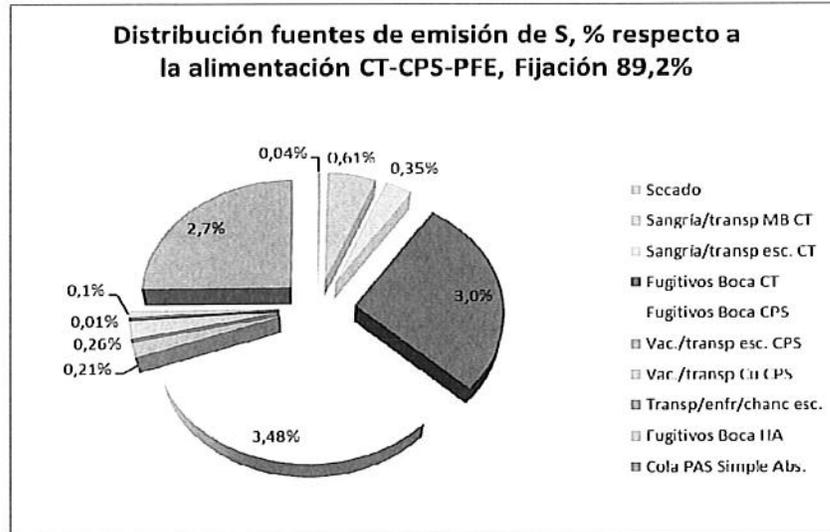


Figura 3.3.d Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-PFE

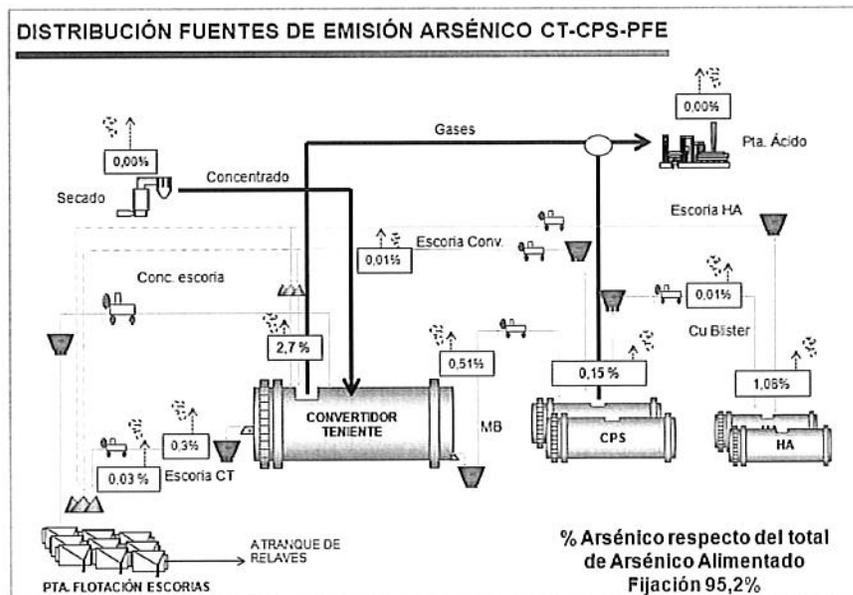


Gráfico 3.3.d Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-PFE

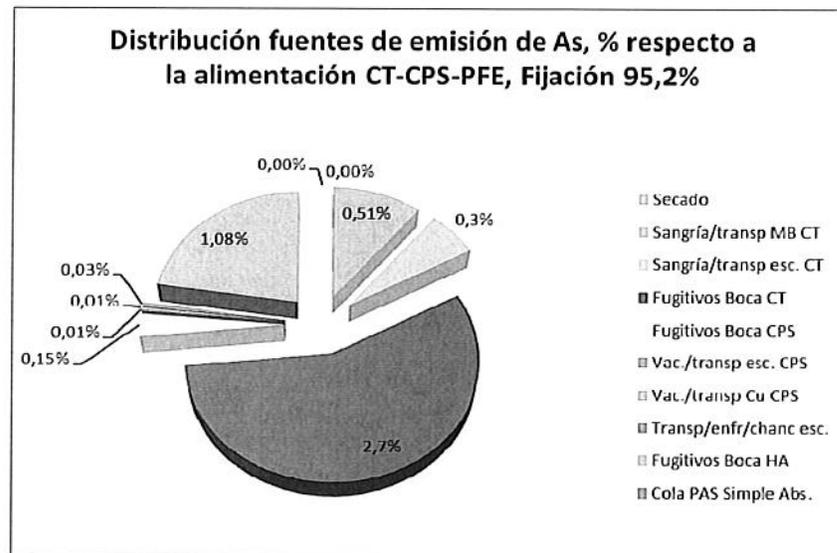


Figura 3.3.e Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-HLE/HE

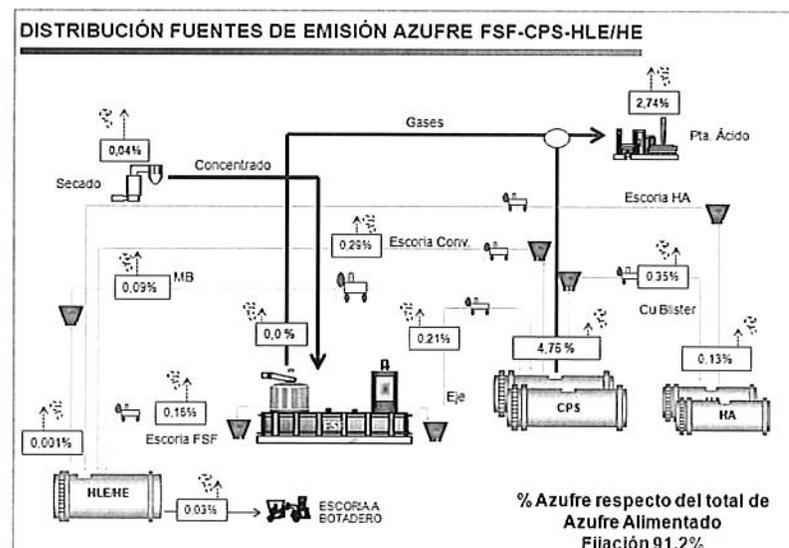


Gráfico 3.3.e Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-HLE/HE

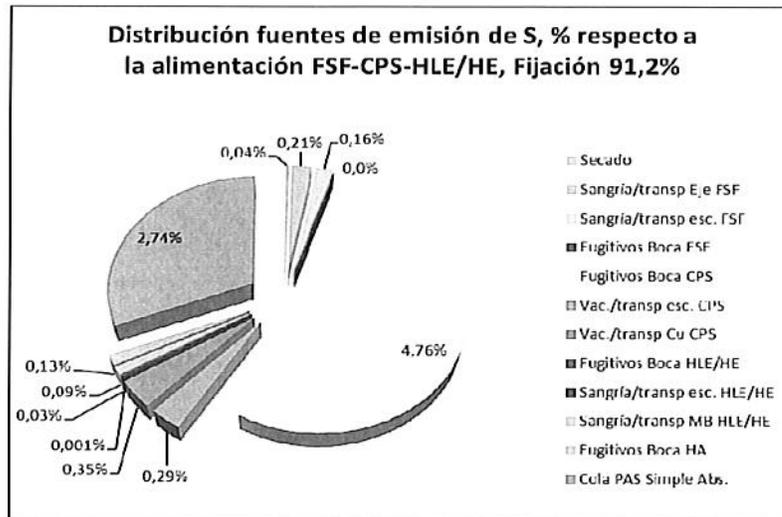


Figura 3.3.f Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-HLE/HE

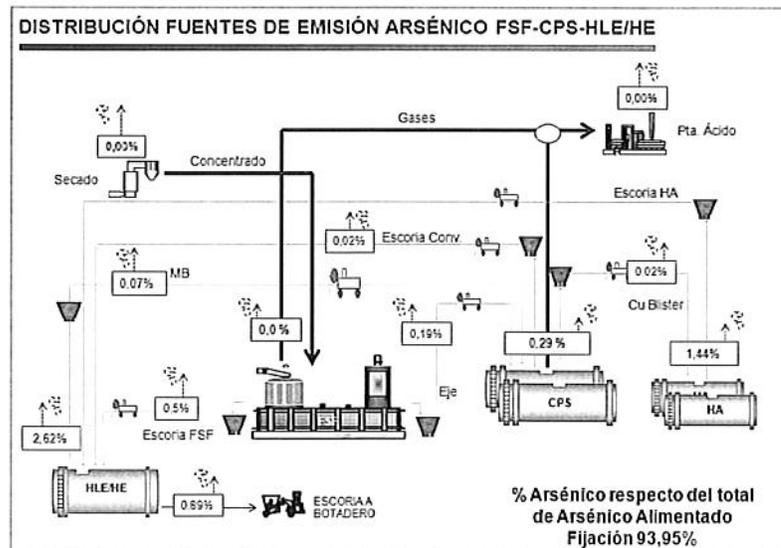


Gráfico 3.3.f Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-HLE/HE

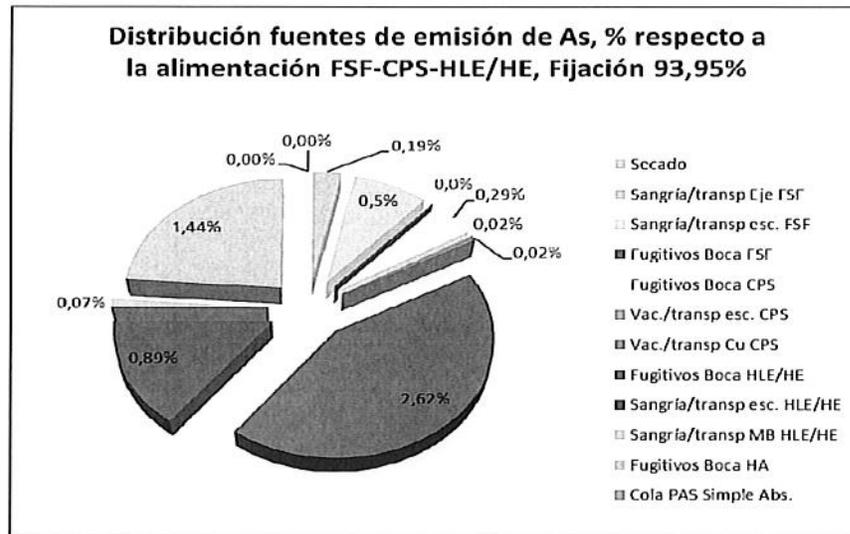


Figura 3.3.g Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-PFE

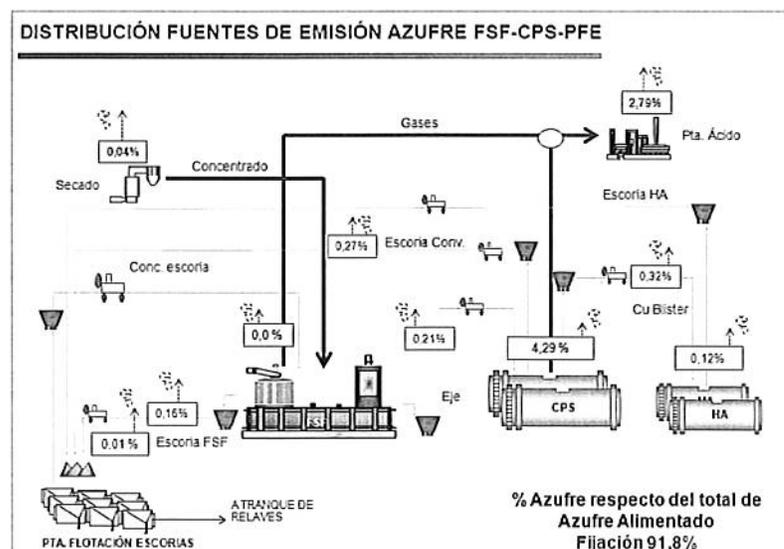


Gráfico 3.3.g Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-PFE

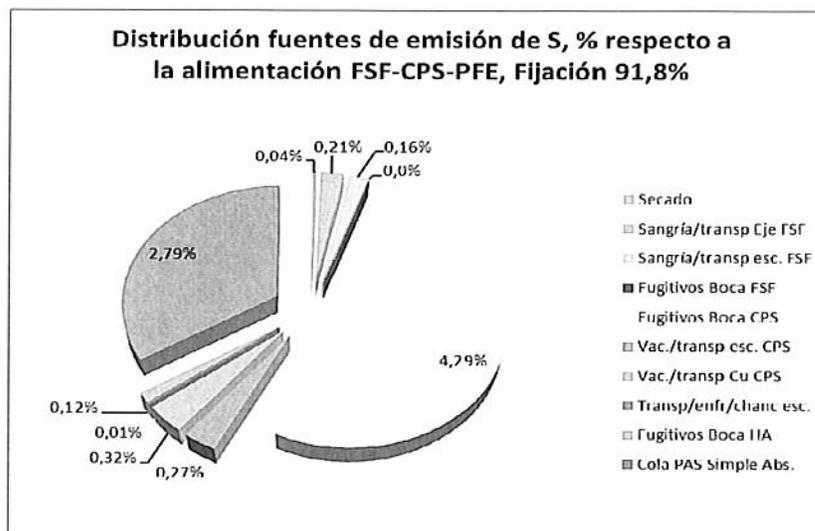


Figura 3.3.h Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-PFE

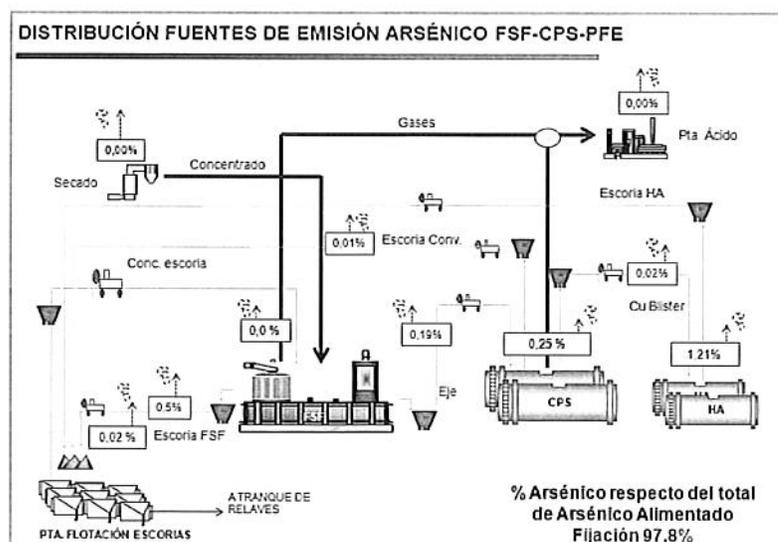
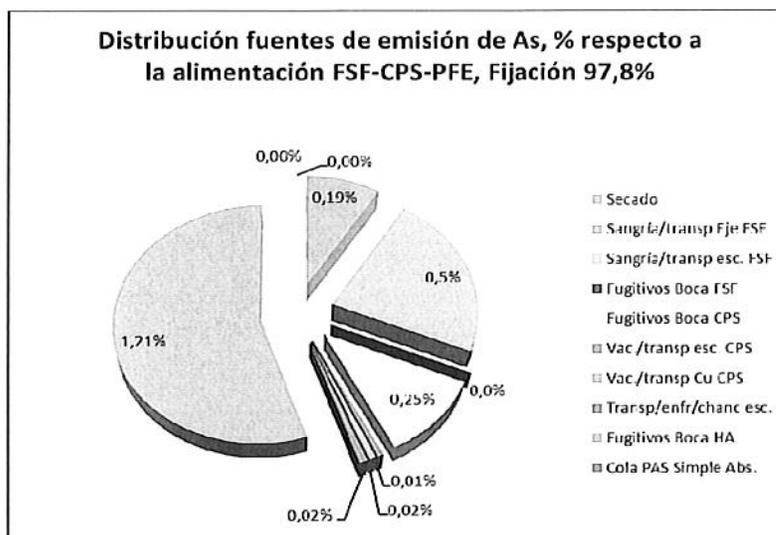


Gráfico 3.3.h Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-PFE



Fuente Figuras y Gráficos: Elaboración propia.

Bajo los diagramas mostrados y los criterios considerados, las diferencias relevantes en las fuentes de emisión estimadas por esquema son:

- Las instalaciones con Horno Flash por su mayor hermeticidad, presentan una reducción de emisiones de S cercana a 2,7% frente a las con Convertidor Teniente y también permiten una mejor fijación de As en el sistema entre 2,6 y 3,3% del As alimentado.
- Para todos los esquemas modelados la fuente más relevante de emisión de S la constituyen las emisiones del proceso de conversión, proceso presente en todos las Fundiciones existentes, sobre el que se deberán centrar los esfuerzos de mejoramiento.
- El Esquema CT-CPS-HLE/HE, más frecuente de las fundiciones en estudio, presenta como principales fuentes las emisiones por boca de CPS, en

segunda prioridad las emisiones por boca de CT y en tercer lugar los gases de cola de la Planta de ácido de simple contacto, que a través de la mejora en el reactor de conversión, pueden incrementar la fijación (1,8%) y generar una mayor producción de ácido, para cumplir escenarios más exigentes o por límites en chimeneas al lavado y tratamiento final de gases, previa evacuación.

- El reemplazo del proceso de limpieza piro-metalúrgica de escorias por Flotación, permite generar una reducción de emisiones principalmente de As y menor en S, lo anterior en base a condiciones proyectadas de arrastre de As hacia los relaves del proyecto Potrerillos.

El diferencial de fijación de Arsénico respecto al de Azufre es superior al 1%, para todos los esquemas analizados cuyas fijaciones calculadas se indican a continuación:

Tabla 3.3 Fijación S y As en configuraciones tecnológicas.

Esquema Operacional Base	Captura y Fijación S (%)	Captura y Fijación As (%)
CT-CPS- HLE/HE	88,5	90,7
CT-CPS- PFE	89,2	95,2
FSF-CPS- HLE/HE	91,2	93,9
FSF-CPS- PFE	91,8	97,8

Fuente: Elaboración propia.