

**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	APROBÓ
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:**

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

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 SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>, As, MP.

Tabla 1.a Escenarios regulatorios

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

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

<sup>1</sup> 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 SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub>).

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

Instalación	Capacidad nominal conc nuevo 2010	Porc Captura S dec 2010	Porc Captura As dec 2010	Proyección % S prom/ periodos				Proyección % As prom/ periodos			
				2011-12	2013-14	2014-16	Promedio	2011-12	2013-14	2014-16	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
Potrerillos	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 <sub>2</sub> (t/a) 95%	As ( t/a) 96%	SO <sub>2</sub> (t/a) 96%	As ( t/a) 97%	SO <sub>2</sub> (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
Potrerillos	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 SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>) y proyecciones de futuro.

El equipo del Consultor (Coprim 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	Potrerosillos	Chagres	Altonorte
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	98,2	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	MALIGAS, 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<sub>2</sub> (PLG), que en primera instancia permite la fijación de material particulado y volátiles en polvos (cámaras y precipitadores electrostáticos), luego la de arsénico en una planta de lavado, neutralización y disposición de efluentes (PTE), y posteriormente la fijación del SO<sub>2</sub> 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%SO<sub>2</sub>) 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  $\text{SO}_2$  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, VTI, PPEE	✓		✓		✓		
Campanas Primarias CPS	✓	✓			✓		
Nueva Planta ácido, doble absorción	✓						
Doble absorción PAS existentes		✓	✓		✓		✓
Captura y trat. gases sangrías CT o HF, HE	✓	✓		✓			
Planta flotación escorias reemp. HLE		base	✓		✓	✓	existente
Campanas Secundarias y lavado gases CPS	✓	✓	✓	✓		✓	
Campanas Secundarias y lavado gases CT	✓		✓	✓	✓		✓
<b>Límites por Chimeneas</b>							
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 SO<sub>2</sub>, y As

Con las soluciones analizadas, se ha determinado el cumplimiento cercano a los escenarios requeridos, y las toneladas de emisión residual de SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>, estimadas para cada fundición.

Tabla 2.2.a Fijación y emisión residual SO<sub>2</sub> Fundiciones

Fundición % Fijación SO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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% SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>, 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 mantención 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 <sub>2</sub> %	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	Cumple	249.563	
Límites chimeneas	69.698	41.849	n/a	98.105	n/a		n/a	209.652
<b>Escenario 95% Total Acum</b>	<b>313.969</b>	<b>140.464</b>	<b>435.895</b>	<b>175.489</b>	<b>142.778</b>	<b>Cumple</b>	<b>249.563</b>	<b>1.458.159</b>
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
<b>Escenario 96% Total Acum</b>	<b>327.814</b>	<b>411.101</b>	<b>491.660</b>	<b>286.291</b>	<b>262.792</b>	<b>69.874</b>	<b>337.065</b>	<b>2.186.598</b>
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
<b>Escenario 97% Total Acum</b>	<b>420.673</b>	<b>411.101</b>	<b>n/a</b>	<b>No alcanza</b>	<b>n/a</b>	<b>217.220</b>	<b>n/a</b>	<b>2.426.802</b>

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 <sub>2</sub> %	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	Cumple	19.523	
Límites chimeneas	5.452	3.274	n/a	7.051	n/a		n/a	
<b>Escenario 95% Total Acum</b>	<b>24.561</b>	<b>10.988</b>	<b>34.099</b>	<b>12.539</b>	<b>11.169</b>	<b>Cumple</b>	<b>19.523</b>	<b>112.878</b>
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	
<b>Escenario 96% Total Acum</b>	<b>25.644</b>	<b>30.891</b>	<b>38.461</b>	<b>20.697</b>	<b>20.557</b>	<b>5.466</b>	<b>26.368</b>	<b>168.083</b>
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	
<b>Escenario 97% Total Acum</b>	<b>32.908</b>	<b>30.891</b>	<b>n/a</b>	<b>No alcanza</b>	<b>n/a</b>	<b>16.992</b>	<b>n/a</b>	<b>186.874</b>

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 SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>

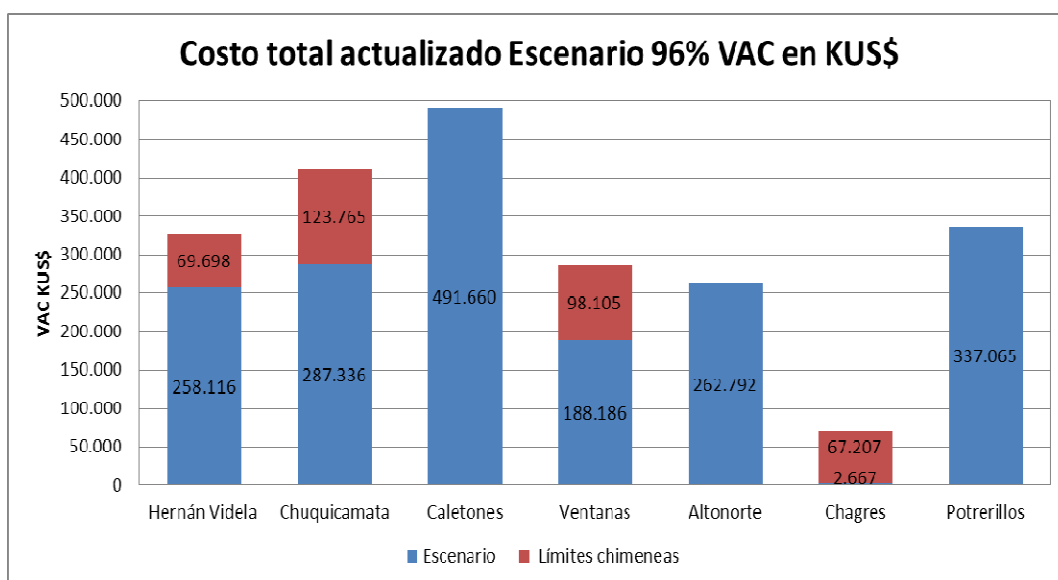
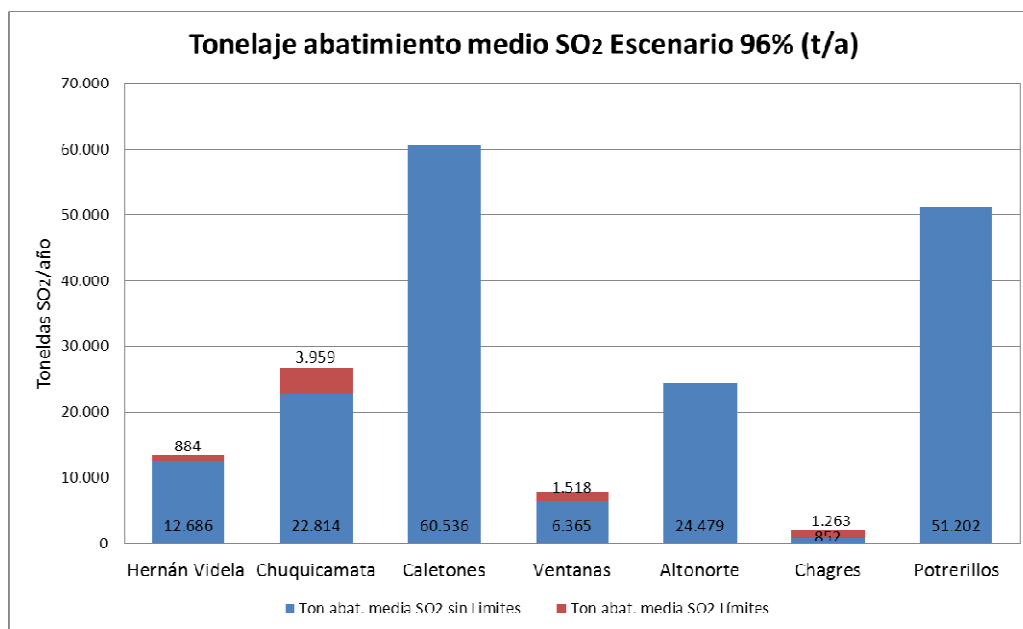


Gráfico 2.4.b Fijación de SO<sub>2</sub> para Escenario 96%

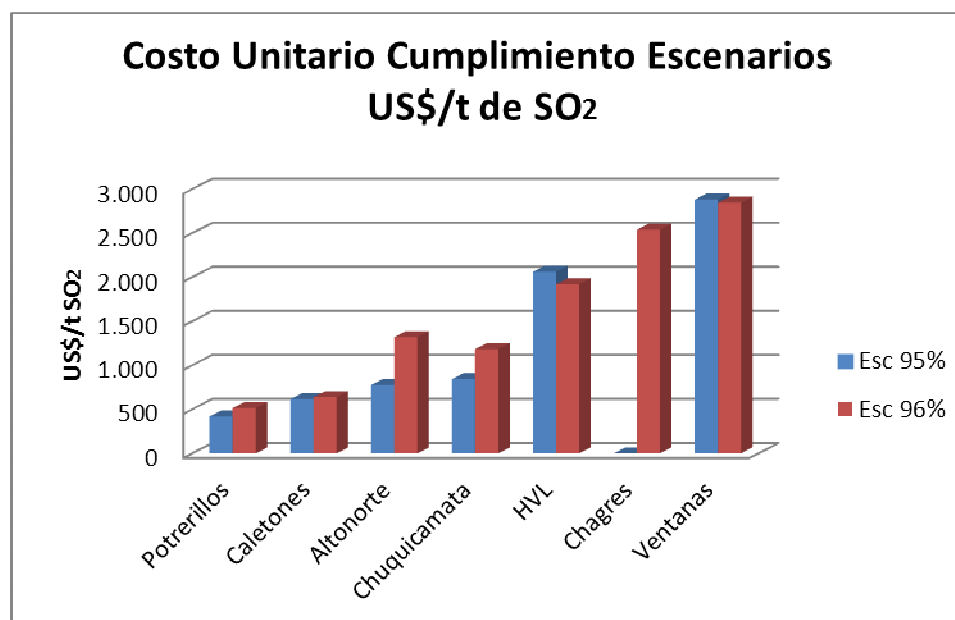


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 2.4.a anteriormente mostrado para el escenario de 96% de fijación de SO<sub>2</sub>, 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 SO<sub>2</sub>, indicado en gráfico 2.4.b destaca también en color rojo, la fijación de SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub> 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 Fundición 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 SO<sub>2</sub>, 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 cobre<sup>2</sup>, 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.

---

<sup>2</sup> 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 simplídicamente 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 fierro, 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  $\text{SO}_2$ , 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 fierro residual y gases primarios ricos en  $\text{SO}_2$ , 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 ( $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ ) 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 respaldo<sup>3</sup>, 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 refino del cobre blíster se realiza en Hornos Basculantes mediante procesos de oxidación y reducción (procesos batch de soplado y escorificado del cobre). El refino 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

---

<sup>3</sup> 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 electrostáticos, 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 kNm<sup>3</sup>/h con alto contenido de SO<sub>2</sub>), 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 fierro.

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 SO<sub>2</sub> 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 kNm<sup>3</sup>/h. Las concentraciones en SO<sub>2</sub> 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  $\text{SO}_2$ . 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  $\text{FeS}$  y posteriormente del  $\text{Cu}_2\text{S}$ , 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$ , 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.<sup>4</sup>

### 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.

---

<sup>4</sup> The Carlos Díaz Symposium on pyrometallurgy. Pilot-scale evaluation for the Codelco continuos 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  $\text{SO}_2$ , 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  $\text{SO}_2$  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 blíster y se usan quemadores, se generan gases que presentan menor contenido de  $\text{SO}_2$ , 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 SO<sub>2</sub> 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  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ ) y del equipo de absorción, descargando gases con  $\text{SO}_2$  residual y eventualmente  $\text{SO}_3$  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.





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

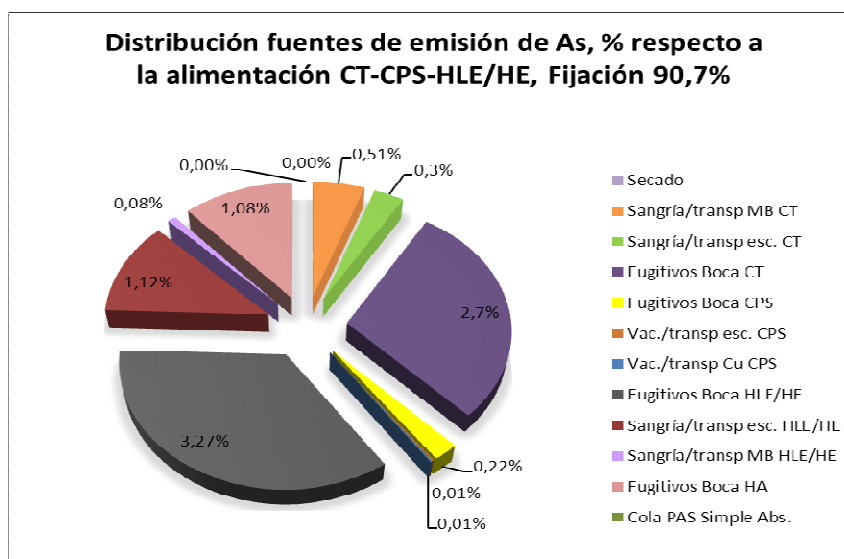


Figura 3.3.c Distribución fuentes de emisión S CT-CPS-PFE



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

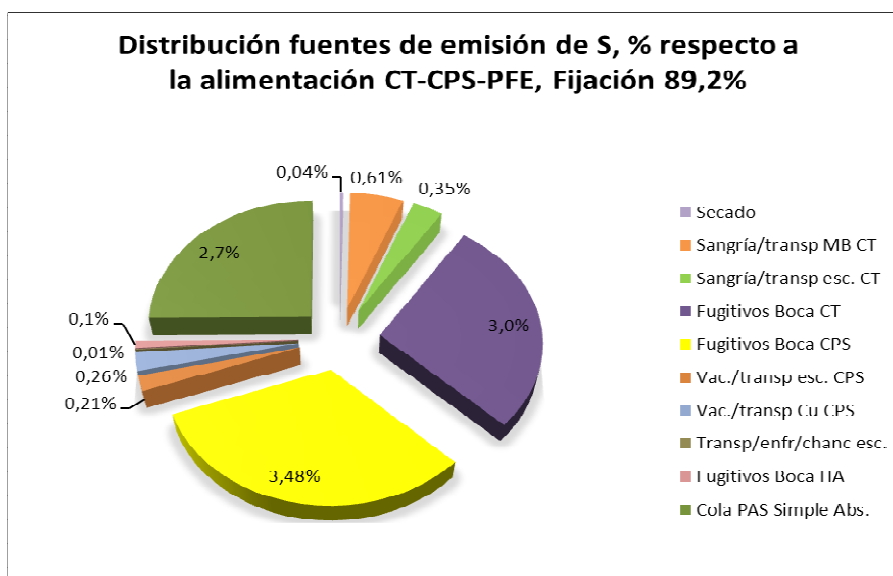


Figura 3.3.d Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-PFE

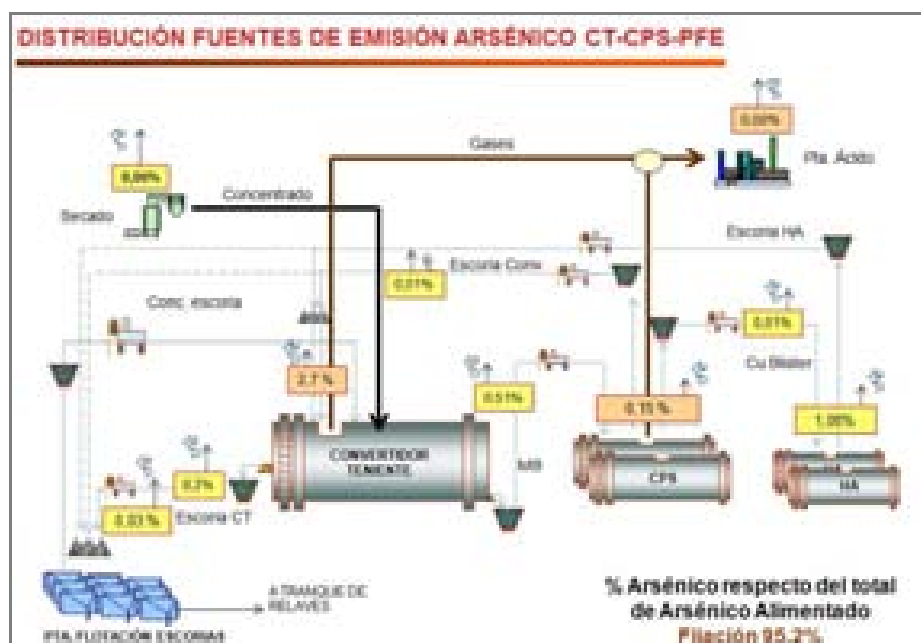




Gráfico 3.3.d Distribución fuentes de emisión As CT-CPS-PFE

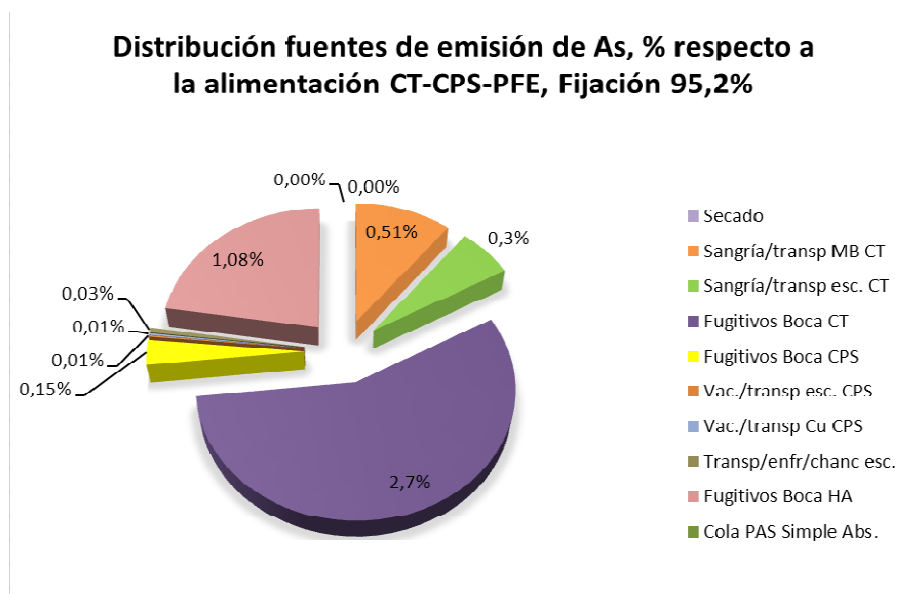


Figura 3.3.e Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-HLE/HE

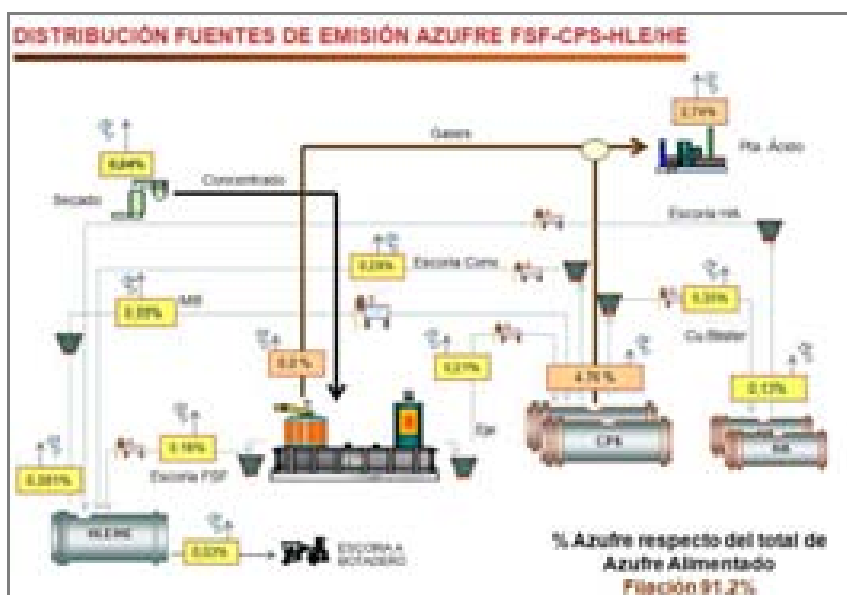






Gráfico 3.3.g Distribución fuentes de emisión S FSF-CPS-PFE

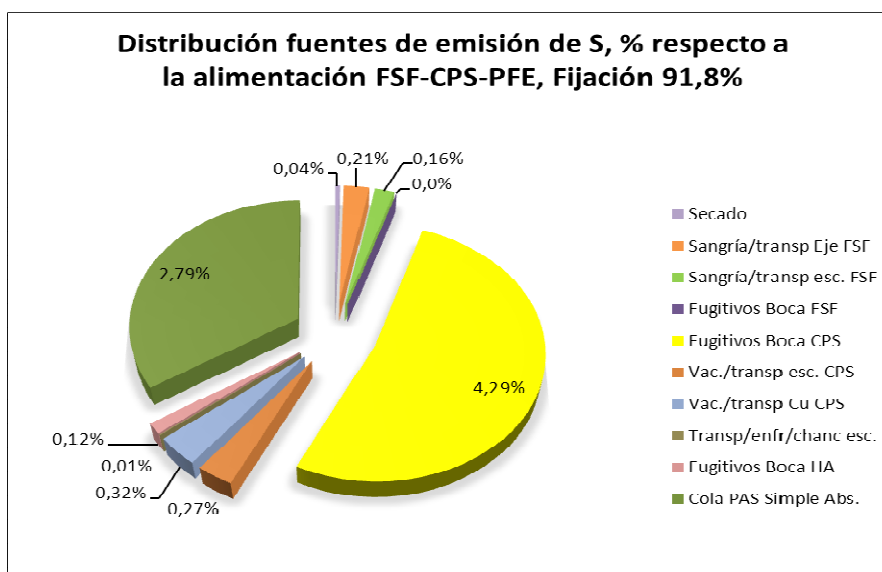


Figura 3.3.h Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-PFE

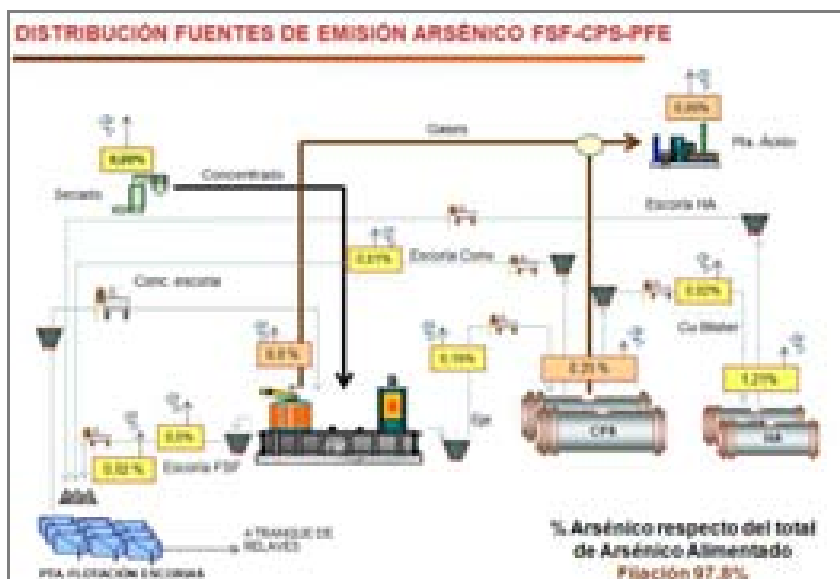
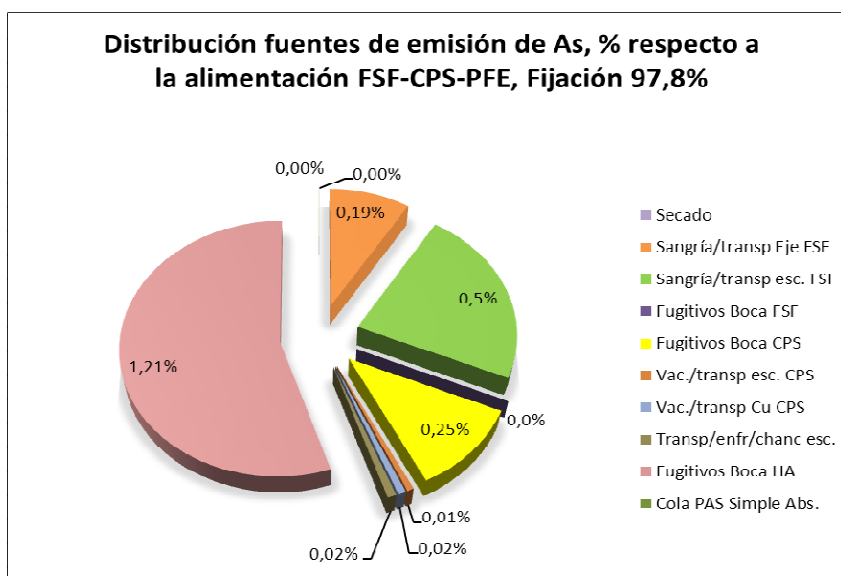


Gráfico 3.3.h Distribución fuentes de emisión As FSF-CPS-PFE



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.

#### **4. CONTRASTACIÓN DE SITUACIÓN DE FUNDICIONES NACIONALES EMISIONES Y FIJACIÓN AZUFRE- ARSÉNICO**

##### **4.1 General**

- **Objetivo**

El presente análisis tiene por objetivo:

- Valorar las emisiones por fuentes de S y As, y la captura y fijación de estos elementos, para cada una de las instalaciones de Fundición durante el año 2010, determinadas en base a la capacidad de tratamiento de concentrados informada, los parámetros por fuente determinados en función del contenido del elemento en el concentrado y la configuración tecnológica con que opera, incorporando singularidades de cada instalación, para calcular el nivel de fijación y captura, el que es comparado con el valor declarado 2010, definiendo factores de incerteza de las estimaciones.
- Disponer de una base distribuida 2010 para cada instalación del aporte estimado de emisiones por fuentes, para valorar en función de nuevas medidas de control de emisiones proyectadas, la reducción de éstas, necesaria para la siguiente evaluación de los escenarios solicitados, de 95%, 96% y 97% de captura de SO<sub>2</sub>, y los relacionados en As.
- Agregar al análisis de soluciones de control de emisiones, parámetros característicos de cada instalación, relativos a los volúmenes de gases necesarios de tratar, así como sus limitaciones existentes para el tratamiento de gases en su situación al año 2010.

#### 4.2 Distribución de Emisiones por Fundición Año 2010

Las toneladas de Azufre emitidas por procesos para el año 2010, estimadas en base a los niveles de fusión por instalación y los antecedentes entregados de ley de azufre y niveles de captura declarados, se estima a nivel país en 178.266 t, para las 7 fundiciones de concentrados de cobre existentes.

En base a la herramienta desarrollada por el consultor para la estimación por fuentes emisoras, distribuciones por configuración tecnológica y singularidades propias de cada instalación, se han calculado emisiones por fuentes para cada instalación, que en general totalizadas presentan rangos de diferencias razonables con los valores globales de captura declarada (-8,4% de desviación global, -4,2% excluyendo Altonorte). Ver tabla 4.2.

Las diferencias positivas o negativas de estas estimaciones, se explicitan como emisión no distribuida y evidencian la incertidumbre asociada a la incapacidad de medición del parámetro emisiones, usualmente determinado como diferencias de balances de materiales, parcialmente medibles por períodos.

La diferencia fuera de rango, la constituye la Fundición Altonorte, que presenta una significativa diferencia entre el valor calculado (90,9%) y el valor de captura declarado por la fundición (93,7%), posiblemente atribuido a la interpretación fiel del concepto de captura de gases, ya que cuenta con un sistema tecnológico operativo similar al de la mayor parte de las fundiciones Codelco, aunque relativamente nuevo, al que ha incorporado una planta de ácido de doble contacto y un sistema de captura de gases fugitivos, con campanas secundarias en el reactor de fusión (RN) y en los Convertidores Peirce Smith, y sistemas de tiro inducido (4 VTI) para los gases, que transitoriamente evacua por chimeneas. El tratamiento de estos gases fugitivos en una planta dedicada, permitirá la fijación de azufre y arsénico de éstos.



Tabla 4.2 Distribución de Azufre por Procesos e Instalaciones 2010

Emisiones de Azufre Distribución por fuentes Coprím		Chuqui	Altonorte	Potrerrillos	FHVL	Ventanas	Chagres	Caletones	Total	% Fuente
RAM	t/a			544					544	0,3
Secado	t/a	133	6.639	81	40	0	-	169	7.061	4,0
Fusión	t/a	9.732	6.428	13.404	3.786	3.532	598	16.881	54.363	30,5
Limpieza de Escorias	t/a	324	21	292	247	298	199	607	1.987	1,1
Conversión	t/a	21.768	7.680	15.306	2.858	4.326	5.417	25.105	82.460	46,3
Planta de Acido	t/a	10.258	6.917	10.384	4.405	894	736	11.409	45.003	25,2
Refino a Fuego	t/a	553	162	233	114	50	207	484	1.802	1,0
Emisión no distribuida	t/a	1.301	- 8.286	- 4.324	- 437	- 1.307	- 221	- 1.681	- 14.955	- 8,4
Desviación	%	3,0	- 42,4	- 12,0	- 4,0	- 16,8	- 3,2	- 3,2	- 8,4	- 4,2
Total Emisión Declarada	t/a	44.070	19.561	35.921	11.012	7.793	6.937	52.974	178.266	100

Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes entregados por MMA (Encuesta, Minuta Criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión al aire para fundiciones de cobre y otros.

En la distribución por procesos realizada, la fuente de emisión mayoritaria, tanto para el azufre como para arsénico, la constituye el proceso de conversión, que en todas las instalaciones se realiza en los Convertidores Peirce Smith y en equipos de dimensiones variables, pero que en común conllevan ciclos batch de operaciones; con operaciones de giro para el carguío de ollas de metal o mata, adición de carga fría y fundentes, y descarga de escorias y cobre a través de la boca, sobre la que se ubican campanas primarias para la colección de gases de soplado, durante el 60 a 70 % del tiempo del ciclo.

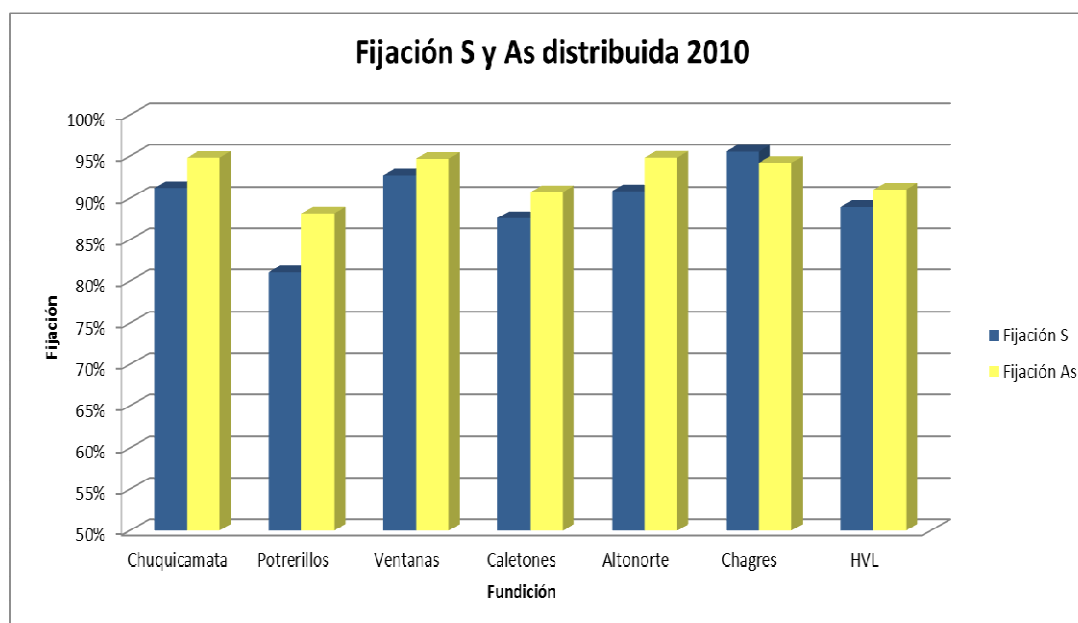
De similar relevancia, los procesos de fusión realizados en hornos basculante tipo Convertidor Teniente o Noranda, generan importantes emisiones por boca, por ineficiencias de campanas y también giros, situación inexistente en las instalaciones con Horno flash, como la Fundición Chagres, que presenta las menores emisiones por este concepto, solo atribuibles a la descarga de mata y escorias por sangrías y canales, y su transporte en tazas u ollas.

La tercera fuente de mayor emisión, la constituye las plantas de ácido, especialmente las de simple contacto y absorción, que en todos los casos evacuan directamente sus gases de cola a la atmosfera.

La emisión de S declarada, y la calculada se han comparado también con la fijación en ácido sulfúrico 100%, calculada en base a la producción y calidad del ácido informado para el año 2010, según se detalla en encuesta realizada por el MMA, que constituye la fuente principal de fijación de Azufre, frente a otras menores, como la fijación en polvos metalúrgicos recolectados en los precipitadores electrostáticos (fracción normalmente a procesamiento externo), escorias de descarte, relaves, rises y riles de la planta de limpieza de la planta de ácido y una fracción muy menor en el cobre anódico, componentes que en total no conforman mas allá del 3% de la fijación total de azufre.

La fijación de Arsénico estimada para cada instalación, fue normalmente superior en un 2 % a la declarada para el Azufre, a excepción de la estimada por el modelo para Chagres que con bajos contenidos de As en concentrados, presenta un valor inferior a las de azufre. Lo anterior se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 4.2 Fijación de Azufre y Arsénico distribuida en el año 2010 para cada fundición



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2.1 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Chuquicamata

Fundición Chuquicamata Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	133	0	Dos secadores rotatorios directos 150 t/hr, Enap 6, separación de sólidos mediante PE, evacuación gases por chimenea (57.200 Nm <sup>3</sup> /hr).
Fugitivos Sangrías de Mata/ Escoria HF	916	13	Considera campanas de captura de gases en las sangrías eficiencia 50%, que trata por filtración y agregado de cal seca junto a gases de CPS.
Fugitivos Boca CT	6.683	72	Considera pérdidas en campanas primarias y giros de gases de alta dilución, EFI: 97% a tratamiento gases primarios-Limpieza- Planta de ácido- Chimenea.
Fugitivos Sangrías de MB/ Escoria CT	2.133	21	
Fugitivos Boca CPS	18.975	8	Considera campanas primarias y secundarias de baja eficiencia por estado y antigüedad (95% y 50% respectivamente), gases de alta concentración a tratamientode gases primarios, gases diluidos captados a tratamiento con cal y filtración EFI 80 % As y 15% S.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	2.793	2	Determinados por el sistema de transporte de materiales y ollas de alta capacidad 6,9 m <sup>3</sup> .
Limpieza de Escorias HLE/HE/PFE; Chimena y Sangrías	324	120	Considera un horno eléctrico con sistema de lavado de gases 7.000 Nm <sup>3</sup> /hr y 95% captura. HLE descarga chimenea sin tratamiento.
Chimenea Hornos Refino	553	68	Seis hornos basculantes sin sistemas de control, emisiones discretas.
Chimeneas Plantas de Ácido Sulfúrico	10.258	0	Considera cinco plantas de limpieza (501.000 Nm <sup>3</sup> /hr- 11,7% SO <sub>2</sub> ), tres de contacto y absorción simple, eficiencia de conversión de 97,7%.
Emisión distribuida calculada (t/a)	42.768	304	
Fijación distribuida calculada (%)	91,3	94,8	
No identificada para distribución	1.301	9	Desviación emisión S calculada frente a la declarada de 3,0%.
Emisión declarada (t/a)	44.070	313	
Captura /Fijación situación base (% declarado 2010)	91,0	94,7	
Alimentación en concentrado (t/a)	489.662	5.870	

Fuente: Elaboración propia.

En relación al Arsénico, con una fijación calculada de 94,8%, las fuentes relevantes de emisión las constituyen los Hornos de Limpieza de escoria, Horno Eléctrico y los fugitivos desde la boca del Convertidor Teniente, situación que en el futuro será mejorada con la flotación del total de escorias generadas y principalmente con la detención del Convertidor Teniente, dejando solo una línea de proceso con 1.350 kta de capacidad de procesamiento constituida por un modulo de tostación, Horno de fusión Flash, convertidores Peirce Smith, refino y moldeo existentes.



Las principales fuentes de emisión de S calculadas las constituyen en orden de magnitud, las emisiones fugitivas por boca del CT y los CPS, y las colas de la planta de ácido de simple contacto, que en este caso operaría con una eficiencia de 94,5%.

Tabla 4.2.2 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Potrerillos

Fundición Potrerillos Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Manejo Materiales	544	6	Perdidas Manejo materiales +CF
Secadores	81	0	Un secador fluo-sólido 125 t/hr, Enap 6 y un secador rotatorio 55 t/hr, separación de sólidos mediante filtros de manga
Fugitivos Boca CT (Una unidad)	11.370	123	Considera campanas primarias en mal estado, de baja eficiencia 94%, afectadas por mal estado MALIGA (baja recuperación de gases), más emisiones por giros.
Fugitivos Sangrías de MB/Escoria CT	2.035	21	Considera sistema de captura de gases de sangrías MB y escoria, evacuado por chimenea. Mejoramiento ambiente laboral 0% Fijación.
Gases CPS a chimenea	2.124	1	Emision por deficit Maliga, puede ser mas
Fugitivos Boca CPS (Tres unidades, una en soplado)	12.006	8	Considera campanas primarias de baja eficiencia 92%, antiguas y afectadas por mal estado MALIGA (baja recuperación de gases), más giros para carga de materiales proporcionales al tonelaje a tratar.
Fugitivos Transporte cobre, escorias CPS	1.176	1	Determinados por el sistema de transporte de materiales, ollas de alta capacidad 7,9- 6,9 m3.
Limpieza Escorias HLE chimena y sangrías	292	114	Tres hornos de limpieza de escoria, con evacuación de gases independiente por chimeneas.
Chimenea Hornos Refino	233	28	Dos hornos basculantes ,sin sistemas de control de emisiones, tipo discretas.
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	10.384	0	Considera una planta de limpieza y producción de ácido simple contacto con problemas, eficiencia de conversión de 95% , flujo 200.000 Nm3/h 9,5% SO <sub>2</sub> .
Emisión distribuida calculada (t/a)	40.244	302	Informacion actualizada 2012 indica 39500 t/a S
Fijación distribuida calculada (%)	81,1	88,2	
No identificada para distribución	-4.324	5	Desviación emisión S calculada frente declarada de 12%
Emisión declarada (t/a)	35.921	308	
Captura /Fijación situación base (% declarado 2010)	83,5	88,0	
S, As Alimentado en concentrado (t/a)	217.701	2.561	

Fuente: Elaboración propia

Se destaca en especial para esta fundición, que la baja fijación de Azufre y Arsénico estaría acorde al carácter deficitario actual de su sistema de gases MALIGA y del sistema de lavado de gases.

En relación al arsénico, las principales fuentes emisoras para esta instalación, las constituyen las emisiones generadas en los Hornos de Limpieza de escoria, a través del proceso de reducción, las fugitivas por boca del Convertidor Teniente, las fugitivas por boca de los CPS y las chimeneas de los hornos de refino.

La desviación de la fijación de azufre respecto de la declarada de esta fundición está en el rango superior, y estaría avalada por la mayor producción de ácido informada.

#### 4.2.3 Fundición Ventanas

La Fundición Ventanas emplazada en el sector costero de la V región, cercana a centros poblados y agrícolas, es una instalación parcialmente maquiladora que procesó 400 kta de concentrados durante el año 2010, a través de una configuración tecnológica constituida principalmente por un Convertidor Teniente como equipo de fusión (4 m Ø y 15 m L), tres CPS para la conversión (3 m Ø y 8 m L), un Horno Eléctrico para el tratamiento de escoria del CT, tres unidades de refino (dos tipo reverbero y una basculante) y una planta de ácido de doble contacto y absorción, potenciada recientemente en volumen y concentración.

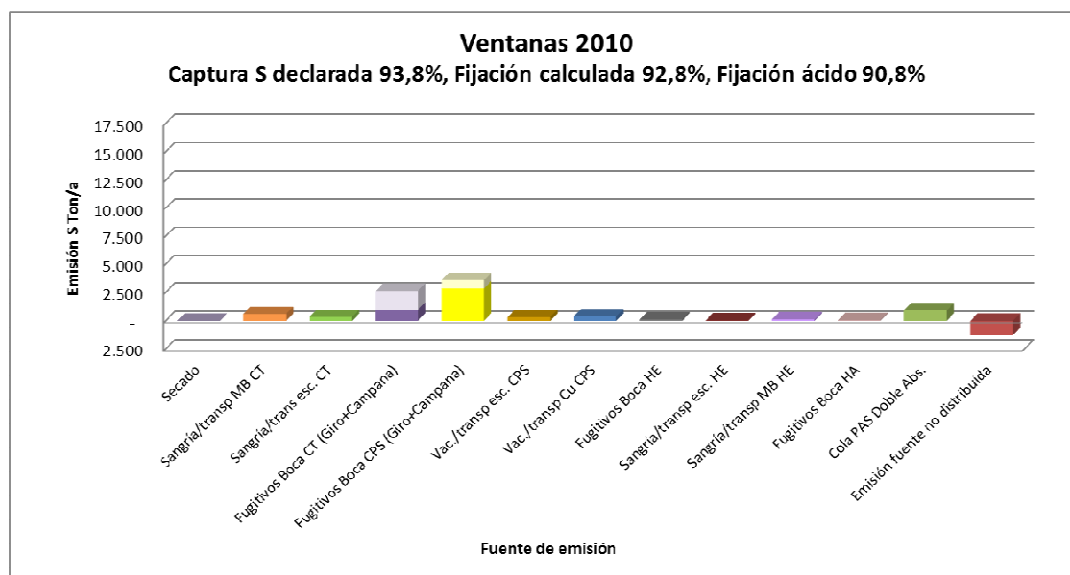
Su nave es larga y ancha, pero comparativamente una de las la más bajas (203 m \*20 m \*15 m) y para el transporte de materiales en caliente opera con grúas puente de 60 t y tazas u ollas de 6 m<sup>3</sup>.

Por condición particular y para el mejoramiento de la condición ambiental local, la fundición dispone de gas natural que usa en los procesos de secado y refino, captación de gases fugitivos en las sangrías del Horno Eléctrico, y limpieza para el material particulado mediante precipitadores electrostáticos de los gases

evacuados del horno eléctrico. También dispone de un conveniente sistema de recepción y acopio de los concentrados procesados.

Las emisiones calculadas para esta fundición y criterios de instalaciones considerados se indican en el gráfico y tabla siguiente:

Gráfico 4.2.3 Distribución de Emisión de Azufre Fundición Ventanas 2010



Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de Azufre, comparativamente mostradas en similar escala para todas las instalaciones, mantiene como fuentes prioritarias la emisiones fugitivas por campana de los Convertidores Peirce Smith, las del Convertidor Teniente y las residuales de la Planta de ácido, que aunque informa una alta eficiencia de conversión 99,2%, en razón al contenido de  $\text{SO}_2$  y volumen, las emisiones por chimenea superarían ampliamente el límite por chimenea pensado establecer de  $400 \text{ mg/Nm}^3$  de  $\text{SO}_2$ , como un criterio de igualdad frente a otros sectores industriales normados, pero que comparativamente con las fundiciones, procesan materiales con un contenido de azufre ínfimamente menor.



Tabla 4.2.3 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Ventanas

Fundición Ventanas Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	0	0	Un secador rotatorio directo 60 t/hr, con gas natural, separación de sólidos mediante filtros de manga.
Fugitivos Boca CT (Una unidad)	2.629	13	Considera campanas primarias en buen estado, de eficiencia 97% favorecida por buen tiraje, emisiones por giros menores por uso de tazas de 6 m3.
Fugitivos sangrías de MB/ escoria CT	903	4	Considera sistema de captura de gases sangrías de metal y escoria, evacuado por chimenea. Mejoramiento ambiente laboral 0% Fijación.
Fugitivos Boca CPS (Tres unidades, una en soplado)	3.630	1	Considera campanas primarias de regular eficiencia, favorecida por línea independiente para el CPS en soplado, con flujos menores al modelado, (97,5% EFI neta), menores giros por uso de tazas grandes para carguio de materiales, dependiente del tonelaje a tratar.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	696	0	Determinados por el sistema de transporte materiales, ollas de alta capacidad 6 m3.
Limpieza Escorias, HE chimenea y sangrías.	298	10	Considera un homo eléctrico de limpieza escoria, con limpieza de gases en PE y evacuación de gases por chimenea (50.000 Nm3/hr con 0,4% SO <sub>2</sub> ).
Chimenea Hornos Refino	50	7	Considera un homo basculante y dos tipo reverbero, control de emisiones de material particulado (cámara de polvos), flujo de 32.000 Nm3/hr con 0,1% SO <sub>2</sub> . Uso de gas natural.
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	894	0	Considera una planta de limpieza y producción de ácido doble contacto eficiencia de conversión 99,2%, flujo 140.000 Nm3/h 10,5% SO <sub>2</sub> , gases a chimenea con SO <sub>2</sub> 1.830 mg/Nm3.
Emisión distribuida calculada (t/a)	9.101	36	
Fijación distibuida calculada (%)	92,8	94,7	
No identificada para distribución	-1.307	-5	Desviación emisión S calculada frente declarada de - 16,8%
Emisión declarada (t/a)	7.793	31	
Captura /Fijación situación base (% declarada 2010)	93,8	95,5	
Alimentado en concentrado (t/a)	125.698	681	

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca en esta instalación que la estimación de emisiones realizada supera en 16,8% la emisión declarada, y aunque procesa concentrados de bajo contenido de Arsénico, los fugitivos por boca de los CPS y del Convertidor Teniente, y las emisiones de la chimenea del Horno Eléctrico, siguen constituyendo las fuentes más relevantes, pese a que su fijación en Arsénico es de 94,7%.

#### 4.2.4 Fundición Caletones

Constituye una de las instalaciones más antiguas del país, adscrita a la Mina El Teniente que bajo un sistema just in time la provee de concentrados normalmente limpios, los cuales procesa hasta cobre anódico y cobre refinado a fuego, generando un producto directamente a ventas.

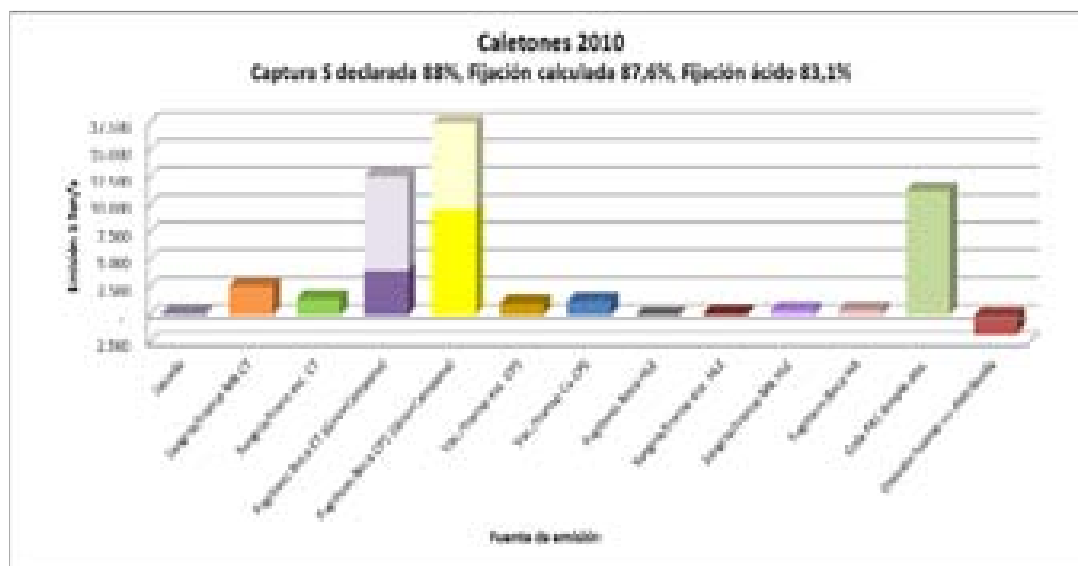
Durante el año 2010 procesó 1.372 kta de concentrados a través de dos Convertidores Teniente, de 5 m Ø y 22 m L, cuatro Convertidores Peirce Smith 4,65 m diámetro \* 10,67 longitud (tres unidades) y uno de menor tamaño 3,96 m Ø y 10,67 m L, éste último posee un uso ocasional durante períodos de mantención de las otras unidades y no se encuentra conectado al sistema de enfriamiento, manejo y tratamiento de gases primarios de las dos plantas asimétricas de simple contacto, las cuales procesan en total un volumen de gases de 452 kNm<sup>3</sup>/hr, con contenido de gases no superiores al 9% de SO<sub>2</sub>.

Los gases de los CT, con tiraje directos desde las Plantas de ácido, son enfriados en cámaras de enfriamiento evaporativo, que incorporan un volumen de agua adicional al sistema, generando junto a la dilución por aire en las campanas primarias un alto volumen de gases a tratar de menor concentración.

Para el tratamiento de escoria, la fundición cuenta con cuatro hornos basculantes y cinco hornos de refino (dos para la obtención de cobre anódico y tres para refinación a fuego, ultima información no indicada en la encuesta), que evacuan gases directamente a la atmosfera.

Las emisiones calculadas para esta fundición y criterios de instalaciones considerados se indican en el gráfico y tabla siguiente:

Gráfico 4.2.4 Distribución de Emisión de Azufre Fundición Caletones 2010



Fuente: Elaboración propia.

Las principales fuentes de emisión de S calculadas, las constituyen en orden de magnitud, las emisiones fugitivas por boca de los CPS y de los CT, y las colas de las plantas de ácido de simple contacto, que en este caso no informan la eficiencia de conversión, aunque podrían evidenciar problemas por el menor nivel de ácido informado como generado, excluyendo las emisiones por chimenea del CPS N°4 que será próximamente conectando al sistema de enfriamiento, limpieza y tratamiento de gases primarios, con VTI independientes para los CPS y tiraje desde las Plantas de ácido para los CT.

Tabla 4.2.4 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Caletones

Fundición Caletones Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	169	0	Tres secadores fluio-sólido de 60-80-130 t/hr, con Enap 6, separación sólidos mediante filtros de manga.
Fugitivos Boca CT (Dos unidades)	12.652	53	Considera campanas primarias eficiencia 97% y emisiones por giros, corrección por flujo de soplado menor al modelado.
Fugitivos sangrías de MB/ Escoria CT	4.230	17	
Fugitivos Boca CPS (Cuatro unidades, dos en soplado)	22.660	6	Considera campanas primarias de eficiencia 97%, favorecida por línea independiente para el CPS en soplado, con flujos mayores al modelado, (95% EFI neta), menores giros por uso de tazas grandes para carguo de materiales, dependiente del tonelaje a tratar. CPS N°4 no conectado, usado ocasionalmente o como horno de retención, evacuación directa por chimenea.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	2.445	1	Determinados por el sistema de transporte de materiales y ollas de alta capacidad 11 m3.
Limpieza Escorias HLE chimenea y sangrías	607	93	Cuatro hornos de limpieza de escoria, con evacuación directa de gases por chimenea.
Chimenea Hornos Refino	484	22	Dos horno basculante para refinación anódica y tres hornos para refinación a fuego.
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	11.409	0	Considera dos plantas de limpieza y producción de ácido simple contacto, eficiencia de conversión de 97% , flujo tratado 452.000 Nm3/h 8,5% SO2 gases a chimeneas. Parametrizado por captura MAGA a PAS.
Emisión distribuida calculada (t/a)	54.655	192	
Fijación distribuida calculada (%)	87,6	90,8	
No identificada para distribución	-1.681	-6	Desviación emisión S calculada frente declarada de - 3,2%
Emisión declarada (t/a)	52.974	186	
Captura /Fijación situación base (% declarada 2010)	88,0	91,0	
Alimentado en concentrado (t/a)	441.448	2.075	

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca en esta instalación que la estimación de emisiones realizada supera en 3,2% la emisión declarada, y que para el caso del Arsénico los Hornos de Limpieza de escoria y los gases fugitivos por boca de los Convertidores Teniente, constituyen las fuentes más gravitantes, alcanzando una fijación de Arsénico cercana al 91%.

#### 4.2.5 Fundición Altonorte

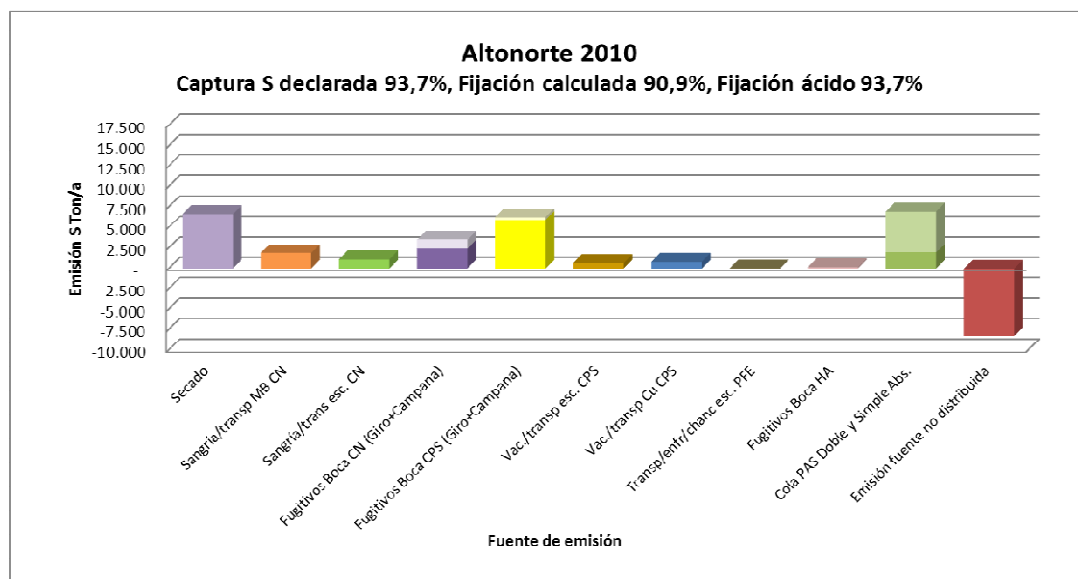
Esta instalación, cercana a la ciudad de Antofagasta, con un nivel de fusión de 983 kta durante el año 2010, declara 93,7% de captura de  $\text{SO}_2$ , compatible con niveles óptimos de fijación alcanzables con solo el tratamiento de gases primarios de campanas del reactor Noranda que posee como unidad de fusión y de los gases de conversión, en los que ha incorporado un sistema de campanas secundarias para la captura de gases fugitivos, con un sistema de tratamiento de éstos, que a la fecha no se encuentra instalado.

La unidad de fusión similar al Convertidor Teniente, aunque de mayor tamaño 5,3 m Ø y 26,4 m de longitud y con mayores flujos de soplado cuenta con un sistema independiente de manejo y limpieza de gases; con enfriadores radiativos, precipitadores electrostáticos (dos unidades), VTI independientes, que alimenta también con los gases de los Convertidores Peirce Smith (CPS N°1 4,5 m Ø \*14 m L, CPS N°2 y N°3 4,5 m Ø \*11 m L, y el CPS N°4 de 4 m Ø \*11 m L, de los cuales utilizaría dos unidades en soplado), dos plantas de ácido que dispone de 190  $\text{kNm}^3/\text{hr}$  cada una, la primera de simple contacto (96,3%) y la segunda de doble contacto con una eficiencia media informada de 99,2% .

La Fundición Altonorte modernizada en el último decenio, procesa sus escorias en una Planta de Flotación, cuenta con tres hornos de refino basculantes y con campanas secundarias para la captación de gases del RN y los CPS, que mediante tiro inducido evacua por chimenea a la atmosfera en un volumen estimado de 600  $\text{kNm}^3$  y 0,32% de  $\text{SO}_2$ .

Las emisiones calculadas para esta fundición y criterios de instalaciones considerados se indican en el gráfico y tabla siguiente:

Gráfico 4.2.5 Distribución de Emisión de Azufre Fundición Altonorte 2010



Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones calculadas para esta instalación, difieren significativamente de la emisión declarada, pero mantiene como principales fuentes los gases fugitivos en boca del RN y los CPS, y las colas de las plantas de ácido, cuyo nivel de  $\text{SO}_2$  sobrepasa en ambos casos el posible límite a establecer.

Por otra parte, su unidad de secado, le genera tostación parcial del concentrado y por ende una anormal fuente de gases con  $\text{SO}_2$  por sobre lo normal para este tipo de unidad.

Tabla 4.2.5 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Altonorte

Fundición Altonorte Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	6.639	41	Un secador rotatorio (4 m D-38 m L) de 185 t/hr, con Enap 6, separación de sólidos mediante Filtros de Mangas (Dos), 80.000-85.000 Nm <sup>3</sup> /hr.
Maga Primarios /Fugitivos //(sin tratamiento)	s/a	s/a	Línea RN :Campanas primarias -Campanas Secundarias-Dos ESP-Dos plantas de ácido, línea CPS: Campanas Primarias-Campanas Secundarias-Dos ESP-[Quench - Torre flujo radial - WESP's - secado - contacto (PA N <sup>3</sup> absorción simple - PA N <sup>1</sup> absorción doble)]
Fugitivos Boca RN	3.516	20	Considera campanas primarias en buen estado, de buena eficiencia <b>99%</b> favorecida por buen tiraje, emisiones por giros menores uso de tazas de 6,9 m <sup>3</sup> .
Fugitivos sangrias de MB/Escoria CT	2.913	16	Considera sistema de captura de gases sangrias de metal y escoria, evacuado por chimenea. Mejoramiento ambiente laboral 0% Fijación.
Fugitivos Boca CPS (Cuatro unidades, dos en soplado)	6.240	2	Considera campanas primarias en buen estado, de buena eficiencia <b>98%</b> favorecida por buen tiraje, emisiones por giros menores uso de tazas de 6,9 m <sup>3</sup> .
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	1.440	0	Determinados por el sistema de transporte materiales, ollas alta capacidad 6,9 m <sup>3</sup> .
Limpieza Escorias, por Flotación	21	1	Flotación del 100% de la escorias 2.800 t/d, recuperación Cu 93% SAG (5,5m*2,7)más Bolas (4,3*10,1).
Chimenea Hornos Refino	162	21	Tres hornos basculante
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	6.917	0	Considera dos Plantas de limpieza y producción de ácido de igual volumen, una de simple con eficiencia de conversión 96,35% y una de doble contacto con EFI 98,6%, flujo total tratado 380.000 Nm <sup>3</sup> /h 11% SO <sub>2</sub> , gases a chimeneas.
Emisión distribuida calculada (t/a)	27.847	102	
Fijación distribuida calculada (%)	90,9	94,8	
No identificada para distribución	-8.286	-30	Desviación emisión S calculada frente declarada de -42,4%
Emisión declarada (t/a)	19.561	72	
Captura /Fijación situación base (% declarada 2010)	93,7	96,4	
Alimentado en concentrado (t/a)	310.484	1.975	

Fuente: Elaboración propia.

Aunque Altonorte procesa concentrados de bajo arsénico, la emisión calculada de este contaminante presenta como mayores fuentes, la potencial eliminación de arsénico en el secado (por tostación en secador) y los gases fugitivos del RN, así como en las chimeneas de los hornos de refino, fijando el 96,4% de As ingresado. En base a la producción de ácido informada, la fijación de Azufre y As puede plantear desviaciones más significativas dependientes del azufre fijado en los polvos metalúrgicos y relaves, cuyas cantidades extraídas del sistema han sido

solo inferidas y dependen básicamente de la eficiencia colectora y diseño de las campanas primarias, temperatura de los enfriadores radiantes y de los precipitadores electrostáticos que dispone esta instalación de menor antigüedad que las otras en análisis.

#### 4.2.6 Fundición Chagres

Esta instalación ubicada en la comuna de Catemu, que procesó el año 2010 un total de 529 kta de concentrados de 31% de azufre y bajos contenidos de Arsénico, presentó la mayor fijación de Azufre 95,7% y arsénico, producto de su configuración tecnológica; con dos secadores de vapor, un horno de fusión flash, con recuperación de calor. El proceso de conversión batch lo realiza en CPS (cuatro unidades de menor tamaño (3,05 m Ø\* 6,55 m L), con solo campanas primarias, disponiendo para el tratamiento de escorias dos HLE tipo Teniente y para el refino dos hornos basculantes.

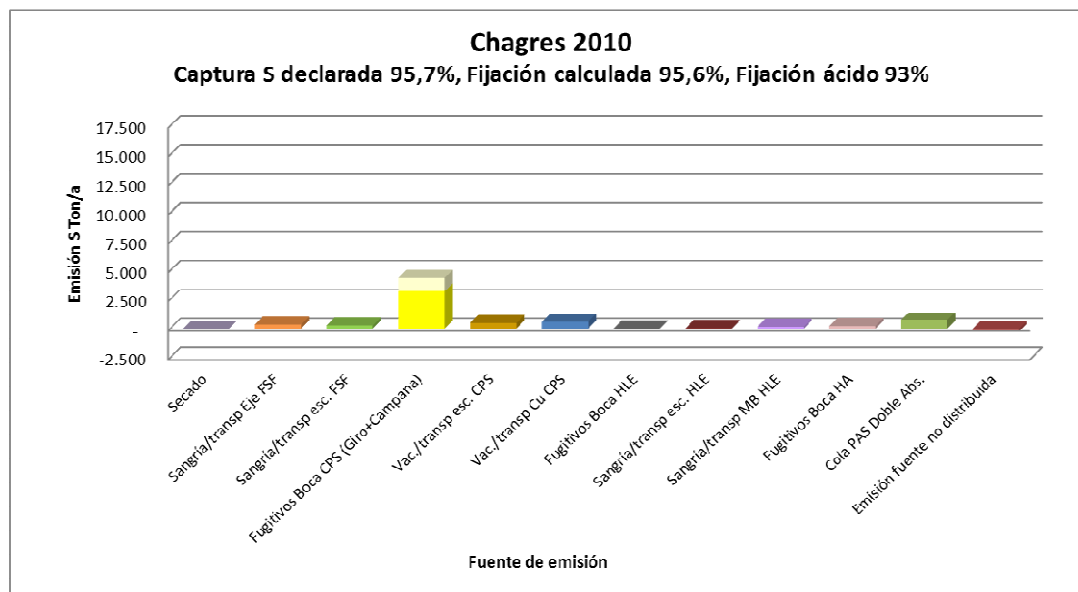
La nave relativamente ancha y de regular altura (95,6 m\*21 m\*16,5 m) opera con grúas de baja capacidad, lo que supedita el movimiento de materiales al uso de ollas o tazas de baja capacidad (4m<sup>3</sup>) y de potencial fuentes de emisiones fugitivas.

Para el tratamiento de gases de proceso cuenta con una planta de ácido (150 kNm<sup>3</sup>/h) de doble contacto y alta eficiencia informada 99,5%, alimentada con una mezcla de gases del Horno Flash y CPS con una concentración media de 12%, que sin embargo en promedio generaría emisiones por chimenea del orden de 950 mgr/Nm<sup>3</sup> en SO<sub>2</sub>.

Las emisiones calculadas para esta fundición y criterios de instalaciones considerados se indican en el gráfico y tabla siguiente:



Gráfico 4.2.6 Distribución de Emisión de Azufre Fundición Chagres 2010



Fuente: Elaboración propia.

La principal fuente emisora en esta instalación la constituyen los CPS y en menor grado las colas de la planta de ácido.

Tabla 4.2.6 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición Chagres

Fundición Chagres Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	0	0	Dos secadores indirectos con vapor de 60 t/hr,
Horno Flash (Una unidad )	0	0	Equipo hermético por diseño, capta 100% gases primarios, enfriamiento mediante caldera, limpieza de polvos en PE para posterior tratamiento en PLG y PAS (30.000 Nm3/hr- 35% SO2).
Fugitivos sangrías de Mata y Escoria HF	598	1	Considera sistema de captura de gases sangrías de metal y escoria, evacuado por chimenea 0% Fijación, posible usar como gas de dilución en PAS.
Fugitivos Boca CPS (Cuatro unidades, dos en soplado)	4.373	0	Reactores de menor tamaño (3 m D* 6,55m L) con campanas primarias de regular eficiencia (97,5%), con flujos de soplado menores al modelado 19.500 Nm3/hr, giros acorde a tazas de menor tamaño 4m3.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	1.044	0	Determinados por el sistema de transporte de materiales, ollas de 4 m3.
Limpieza Escorias HLE chimenea y sangrías.	199	9	Dos hornos de limpieza escoria, evacuación de gases por chimenea (6.900 Nm3/hr con 3% SO2).
Chimenea Hornos Refino	207	4	Dos hornos basculante, sin elementos adicionales de control emisiones, flujo de 35.000 Nm3/hr con 0,1% SO2.
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	736	0	Una planta de limpieza y producción de ácido doble contacto con eficiencia de conversión de 99,5% , flujo 150.000 Nm3/h 12 %SO2, gases a chimenea con SO2 > a 400 mg/Nm3.
Emisión distribuida calculada (t/a)	7.157	15	
Fijación distribuida calculada (%)	95,6	94,2	
No identificada para distribución	-221	0	Desviación emisión S calculada frente declarada de -3,2%
Emisión declarada (t/a)	6.937	15	
Captura /Fijación situación base (% declarada 2010)	95,7	94,4*	(*) Dato modelado, informado 99%
Alimentado en concentrado (t/a)	161.316	261	

Fuente: Elaboración propia

La desviación entre la emisión calculada por fuentes y el valor de fijación de S declarada por la instalación presentan una baja diferencia porcentual -3,2%, aunque sí, una menor fijación de arsénico de 94,2%, atribuida a errores en los factores de emisión usados, ligados a la baja concentración de este contaminante en el concentrado procesado. La principal fuente de emisión de Arsénico la constituye en este caso los Hornos de Limpieza de Escoria y los fugitivos de las sangrías y del transporte de metal del Horno Flash.

Se destaca, que el bajo contenido de arsénico del concentrado procesado en Chagres puede generar desviaciones en los cálculos de emisión de arsénico, según lo refrenda niveles de fijación informados para el año 2010 de 99% fijación As<sup>5</sup>.

#### 4.2.7 Fundición HVL

Esta instalación de ENAMI, aledaña a la ciudad de Copiapó y centros agrícolas, procesó el año 2010 un total de 322 kta de concentrados provenientes de la pequeña y mediana minería, declaró una fijación de Azufre de 89,4%, producto de su configuración tecnológica y equipamiento.

La fundición dispone de un secador rotatorio, un Reactor tipo Teniente de 3,9 m Ø y 16 m L y de conversión batch realizada en uno de los dos CPS que posee, también, comparativamente de menor tamaño que los existentes en otras fundiciones (3,0 m Ø\* 7,2 m L), con solo campanas primarias, disponiendo para el tratamiento de escorias de un Horno Eléctrico, para refino de un hornos basculante y para el tratamiento de gases primarios, dispone de dos antiguas plantas de ácido sulfúrico de contacto simple, potenciada para esa instalación, pero actualmente en estado deficitario, al igual que su sistema de manejo y enfriamiento de gases.<sup>6</sup>

La nave de convertidores es la de menor tamaño y menor altura, lo que presenta limitaciones para rediseños de mejoramiento de la captura de gases (130 m\*12 m\*12 m). La Fundición opera con grúas de baja capacidad, lo que supedita el movimiento de materiales al uso de ollas o tazas de baja capacidad (6m<sup>3</sup>).

Para el tratamiento de gases cuenta con dos plantas de ácido (50 y 80 kNm<sup>3</sup>/h) de simple contacto y eficiencias informadas de 94% y 96%, ambas bajo estándar, las

---

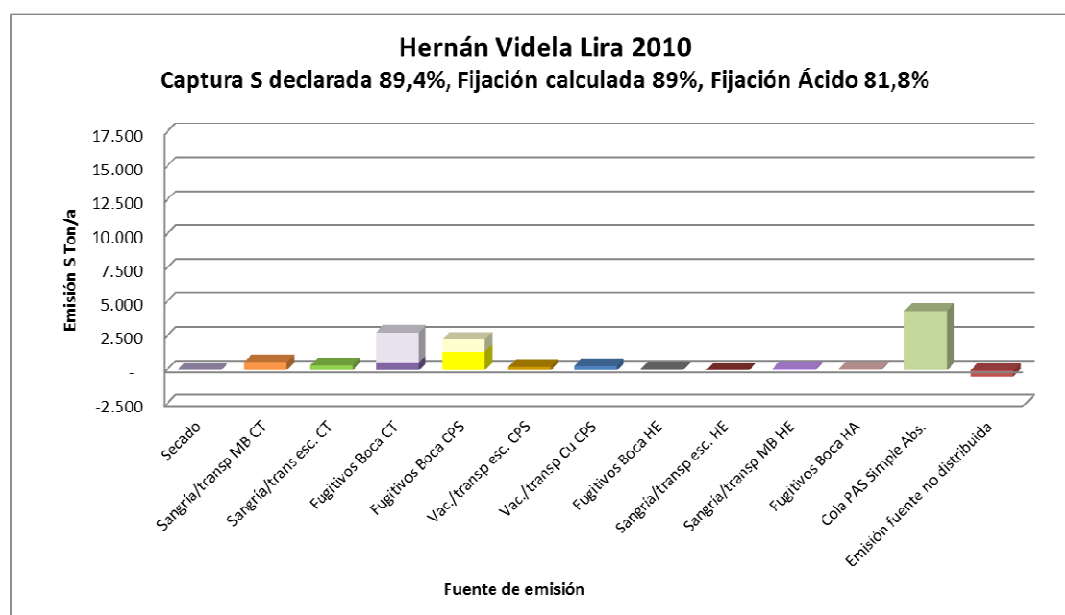
<sup>5</sup> Antecedentes entregados por MMA. “Antecedentes y precisiones respecto a información de Chagres”

<sup>6</sup> Informe Jacobs, Estudio de perfil “Aumento captación SO<sub>2</sub> Fundición HVL”, 2011.

que son alimentadas con una concentración de gases de 8 a 8,5%, mostrando alta dilución en las campanas.

Las emisiones calculadas para esta fundición y criterios de instalaciones considerados se indican en el gráfico y tabla siguiente:

Gráfico 4.2.7 Distribución de Emisión de Azufre Fundición Hernán Videla Lira 2010



Fuente: Elaboración propia.

Las principales fuentes emisoras en esta instalación la constituyen los gases fugitivos de la boca de los CPS y las emisiones residuales de las plantas de ácido. También constituyen una fuente importante los gases fugitivos del CT y sangrías de esta unidad, que cuenta solo con los sistemas primarios de captura.

Tabla 4.2.7 Distribución de Azufre por Fuentes Fundición HVL

Fundición HVL Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2010 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	40	0	Un secador rotatorio directo 55 t/hr.
Fugitivos Boca CT	2.791	3	Considera campanas primarias en situación deficiente, eficiencia 95%, problemas en sistema Manejo Gases y VTI.
Fugitivos sangrías de MB/ Escoria CT	995	1	Considera que no tiene sistema de captura de gases sangrías de MB y escoria, transporte en tazas de 6m3.
Fugitivos Boca CPS (Dos unidades, una en soplado)	2.282	0	Considera campanas primarias en situación deficiente, eficiencia 92%, problemas en sistema Manejo Gases y VTI.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	575	0	Determinados por el sistema de transporte materiales, ollas capacidad media 6 m3 y 4m3 para blister.
Limpieza Escorias HE chimenea y sangrías.	247	5	Considera un homo eléctrico de limpieza escoria, evacuación de gases por chimenea (ND, inferido 39.000 Nm3/hr con 0,4% SO <sub>2</sub> ).
Chimenea Hornos Refino	114	1	Un homo basculante (4m D* 9m L), descarga gases a chimenea, flujo y concentración N/D.
Chimenea de Plantas de Ácido Sulfúrico	4.405	0	Considera dos plantas de limpieza y producción de ácido de simple, antiguas con eficiencia de conversión de 94% y 96% , flujos 50.000 y 80.000 Nm3/h 8 % SO <sub>2</sub> , gases a chimenea.
Emisión distribuida calculada (t/a)	11.449	10	
Fijación distribuida calculada (%)	89,0	91,1	
No identificada para distribución	-437	0	Desviación emisión S calculada frente declarada de -4,0%
Emisión declarada (t/a)	11.012	10	
Captura /Fijación situación base (% declarada 2010)	89,4	91,4	
Alimentado en concentrado (t/a)	103.888	115	

Fuente: Elaboración propia.

La desviación de emisión de S frente a la declarada es de -4%, está dentro de rangos aceptables para el posterior análisis.

## **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 SO<sub>2</sub>.

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 SO<sub>2</sub> 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, SO<sub>2</sub> 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"> <li>• espesador/filtros (recibe pulpa)</li> <li>• buzones</li> <li>• cancha cerrada/concha/galpón</li> </ul>
ALMACENAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• buzones</li> <li>• cancha cerrada o domo/galpón.</li> </ul>
MEZCLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezcla en correa o en cañería</li> <li>• Mezcla en buzones c/grúa puente</li> <li>• Mezcla c/reclaimer en galpón</li> </ul>
HORNO DE SECADO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secador indirecto (vapor u otro)</li> <li>• Secador fluosólido c/combustible</li> <li>• Secador rotatorio c/combustible</li> </ul>
HORNO DE TOSTACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horno fluosólido</li> <li>• Horno de pisos</li> </ul>
HORNO DE FUSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vanyukov</li> <li>• Flash Outokumpu</li> <li>• ISA/Ausmelt</li> <li>• Noranda/Teniente</li> <li>• ConTop.</li> </ul>
PROCESOS INTEGRADOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flash fusión/Flash conversión</li> <li>• Mitsubishi fusión/conversión</li> </ul>
LIMPIEZA ESCORIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flotación</li> <li>• Eléctrico rectangular</li> <li>• Mitsubishi</li> </ul>
CONVERSIÓN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outokumpu Flash Converter</li> <li>• Hoboken</li> <li>• Peirce Smith</li> </ul>
REFINO A FUEGO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horno basculante cilíndrico</li> <li>• Horno basculante de cuba</li> </ul>
CONTROL DE EMISIONES FUGITIVAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilador de tiro inducido por equipo de fusión-conversión.</li> <li>• Campana secundaria hornos fusión y conversión</li> <li>• Campanas en sangrías y canales de eje y metal blanco</li> </ul>



CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO Y METALES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfriadores de gases(cámaras de expansión)</li> <li>• Filtro de mangas.</li> <li>• Precipitadores electroestáticos secos</li> <li>• Precipitadores electroestáticos húmedos</li> <li>• Scrubber</li> </ul>
FIJACIÓN DE AZUFRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta de ácido de contacto doble</li> <li>• Planta de ácido de gases húmedos de baja concentración de SO<sub>2</sub> (WSA)</li> <li>• Planta de ácido por oxidación de SO<sub>2</sub> con agua oxigenada</li> <li>• Desulfuración con lechada de cal</li> </ul>

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 SO<sub>2</sub>. 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/Nm<sup>3</sup>) y precipitadores electrostáticos secos (eficiencia de captación mayor o igual a 99% y una emisión menor o igual a 5 – 15 mg/Nm<sup>3</sup>).<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> 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

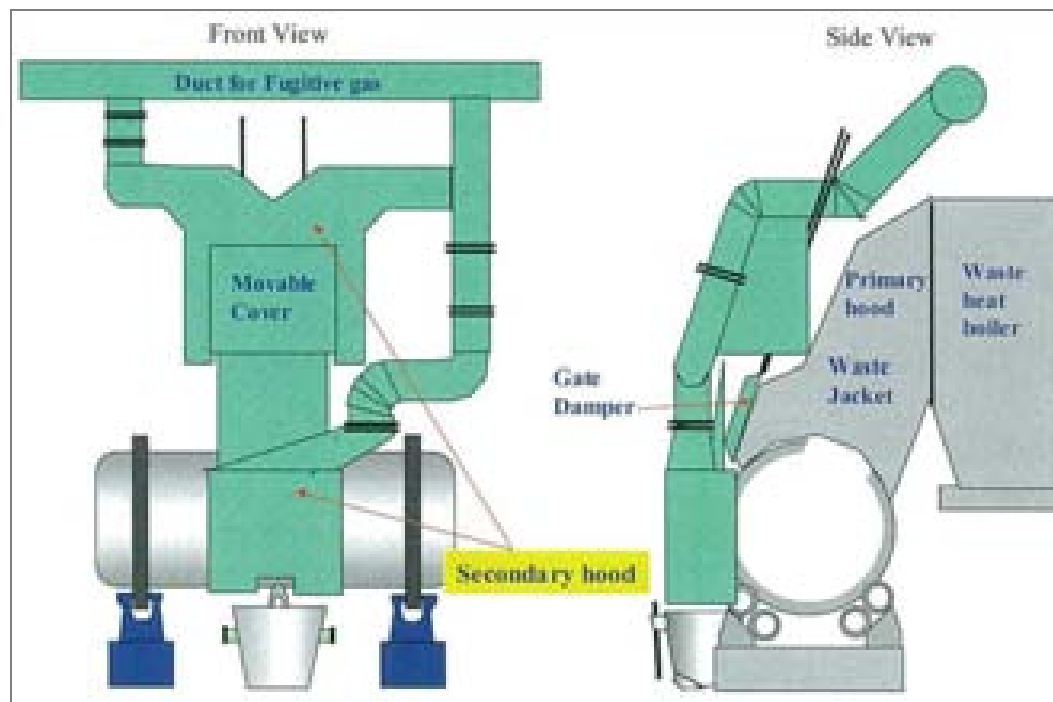
La unidad de **fusión flash** es eficiente ambientalmente por ser una unidad cerrada, donde no se observan gases, salvo en las sangrías de eje, escoria y canales de conducción de los líquidos a las ollas.

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, SO<sub>2</sub> 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  $\text{SO}_2$ , 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 & Biswas<sup>8</sup>, 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.

---

<sup>8</sup> 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  $\text{SO}_2$  a la planta de contacto y absorción, transformándolo en ácido sulfúrico.

La producción de ácido sulfúrico a partir de gases con  $\text{SO}_2$  se puede realizar por distintos procesos, dependiendo de las características de los gases en cuanto a su concentración de  $\text{SO}_2$ , a la presencia de impureza o a la remoción previa de la humedad del gas.

Para los gases de procesos con contenidos  $> 3$  Vol. %  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  en los gases tratados pero también de la razón  $\text{O}_2/\text{SO}_2$ .

Se reportan las siguientes tasas de conversión<sup>9</sup>:

---

<sup>9</sup> 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  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1, 98% conversión
- Absorción simple:  $\text{SO}_2$  5 a 8% y razón  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1, 97% conversión
- Absorción simple:  $\text{SO}_2 < 5\%$  y razón  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  1:1, 96% conversión
- Doble absorción 99,6% conversión

Para lograr a plenitud el objetivo de extraer la totalidad del  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  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  $\text{SO}_2$  en los gases de cola a 0,03%  $\text{SO}_2$ . El proceso consiste en

la adición al sistema de una torre de absorción adicional, que extrae  $\text{SO}_3$  antes de la última etapa de conversión.

La eliminación del  $\text{SO}_3$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  y relación  $\text{O}_2/\text{SO}_2$  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:

- $\text{SO}_2$  resultante de una oxidación incompleta
- $\text{SO}_3$  resultante de una incompleta absorción del  $\text{SO}_3$
- Gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  resultantes de la absorción
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  gaseoso del scrubbing

Otros contaminantes pueden ser emitidos como trazas, dependiendo de la fuente de  $\text{SO}_2$  y del proceso de producción de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :

- $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  de todo el proceso pero principalmente del proceso modificado de cámara de plomo, basado en  $\text{NO}_x$
- Metales pesados (por ejemplo  $\text{Hg}$ ) 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  $\text{SO}_2$  sin reaccionar,  $\text{SO}_3$  no absorbido, niebla de ácido sulfúrico y spray de ácido. Cuando el gas penetra en la atmósfera, el  $\text{SO}_3$  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)<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> 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 Nm<sup>3</sup>/h con 11% SO<sub>2</sub>)

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

El proceso ofrece las siguientes características:

- Eficiencia de reducción de SO<sub>2</sub>: 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  $\text{SO}_2$ , 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  (menor a 3%), se tiene:

- Lavado con  $\text{NH}_3$  (scrubbing), produciendo sulfato de amonio
- Lavado con  $\text{NaOH}$  (scrubbing), produciendo sulfato de Sodio
- Lavado con  $\text{Ca(OH)}_2$  (scrubbing), produciendo sulfato de calcio (yeso)
- Lavado con  $\text{Mg(OH)}_2$  (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  $\text{SO}_2$  y que luego son removidas haciendo pasar el gas por filtros de mangas. Naturalmente, estos procesos también son aplicables a la limpieza del  $\text{SO}_2$  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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>

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 SO<sub>2</sub> habitualmente se aplica mediciones del tipo extractivo. En cuanto a las mediciones de NO<sub>x</sub> 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

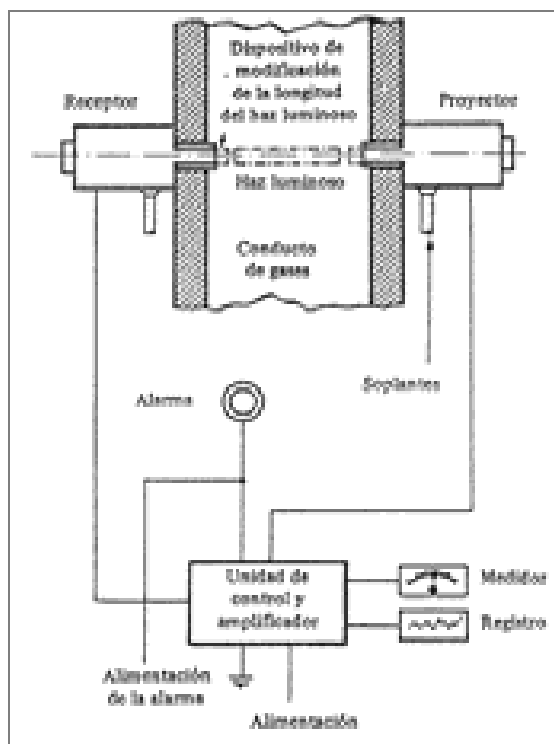
Los humos negros (gases con combustible sin quemar), se generan básicamente en los hornos de refino a fuego y en hornos de limpieza de escorias (HE y HLE), en la etapa de reducción y como consecuencia del ambiente reductor, respectivamente. En los hornos de refino, luego de la etapa de desoxidación,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

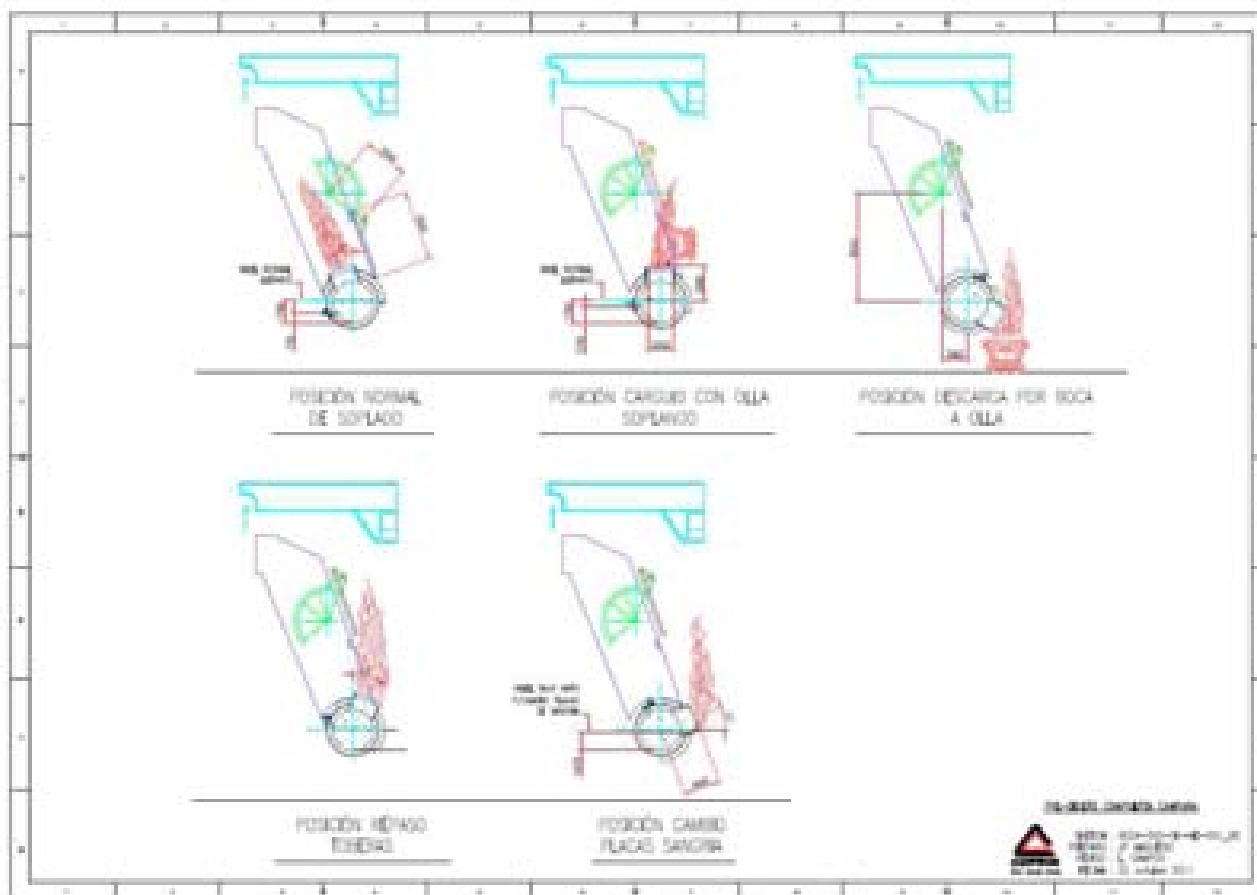
Dentro de las operaciones normales de la Fundición, existen prácticas que favorecen la captura y tratamiento de los gases sulfurosos, que en el marco de la nueva regulación ambiental, debieran constituir mejores prácticas operacionales para la gestión ambiental.

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 mantención 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 SO<sub>2</sub> 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 primaria y posiciones en operaciones rutinarias. Fuente Elaboración propia.



## 6. LÍMITES DE EMISIONES EN CHIMENEAS

### 6.1 General

La autoridad ambiental ha definido como parte del análisis de escenarios, el establecimiento de límites máximos de emisión e chimeneas, según se detalla:

Tabla 6.1 Límites máximos de emisión en chimenea (s) en mg/Nm<sup>3</sup>

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

Fuente: MMA Minuta de Criterios y Supuestos para Elaborar la norma de Emisión para las Fundiciones de cobre.

Los valores de los límites en chimenea corresponden a:

- (5) 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.
- (6) 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.

- (7) Valores considerados en la regulación de otras megafuentes existentes reguladas en Chile: incineradores y plantas de generación.
- (8) Para fuentes nuevas se exigirán valores de acuerdo a mejor tecnología disponible.

- Objetivo

El presente análisis tiene por objetivo:

- Comentar los límites de emisión por fuentes emisoras, dimensionar efecto en la emisión de contaminantes (S, As, MP, Hg) y requerimientos de condiciones para monitoreo.
- Determinar bajo la existencia de límites de emisión, la situación actual de Fundiciones 2010 definiendo brechas en la condición futura.
- Disponer del catastro de soluciones tecnológicas probadas necesarias para alcanzar los niveles de cumplimiento requeridos y su relación con proyectos a incorporar en la evaluación de costos de los escenarios solicitados, de 95%, 96% y 97% captura de SO<sub>2</sub>, y los relacionados en As.
- Seleccionar entre las tecnologías existentes y emergentes definidas con el MMA y parámetros de eficiencia, inversión y costos, la aplicable para el tratamiento final de gases de planta de ácido (gases de cola) de cada instalación.

## 6.2 Límites de Emisión y Fuentes

El objetivo de establecer límites de emisión por chimeneas, señalado por el Ministerio Medio Ambiente, adicionales al cumplimiento de cuotas de emisión, es el de forzar el mejoramiento tecnológico y de medidas de control para evitar la emisión de sustancias tóxicas que finalmente impactan a la población de los medios circundantes, cautelando su salud. Los límites serían por tanto aplicables

solo a las instalaciones cercanas a la población, vale decir Chuquicamata, Ventanas, HVL, y Chagres.

Los límites establecidos por la autoridad ambiental, contienen criterios de no discriminación de este sector industrial, frente otras actividades económicas, a pesar que conlleven dimensionamientos diferentes de la cantidad del contaminante regulado como en el caso del  $\text{SO}_2$  emitido por una planta de ácido de fundición frente al de una planta de generación térmica.

Por otra parte la existencia de estos límites, conlleva el requerimiento de monitoreo y/o fiscalización, que en la mayor parte de las instalaciones, además del control continuo o periódico interno si es factible, se apoyan en mediciones de tipo discreto con periodicidades establecidas, que requieren infraestructura a habilitar y servicios externos de muestreo y análisis químicos, mediante metodologías certificadas.

Para el caso específico de los gases por chimenea de las plantas de ácido, se ha establecido un límite de  $400 \text{ mg/Nm}^3$  de gas evacuado, con monitoreo en forma continua. Esta exigencia, de acuerdo al MMA busca reducir el número de eventos de emisiones tipo puff e introduciría mejores prácticas operacionales en las plantas de ácido.

#### 6.2.1 Contaminantes en chimenea regulados

- Hornos Limpieza Escoria

Se proyecta regular en las chimeneas de los Hornos de Limpieza de Escoria (HLE/HE), una concentración fijada de **material particulado** máxima de  $50 \text{ mgr/Nm}^3$  y para **As**  $0,5 \text{ mg/Nm}^3$  de gas evacuado, volumen que en la descarga

misma del horno fluctúa entre 8.000 a 12.000 Nm<sup>3</sup>/h, y en su evacuación final en chimenea, post enfriamiento y filtración alcanzan hasta 60.000 Nm<sup>3</sup>/h.

La generación de As y material particulado proviene de re-destilación a gases del Arsénico de la escoria en la etapa de reducción y por el uso de reductor y combustible incombusto, en el caso de los HLE, de operación por ciclos y de arrastre en gases de material circulante fundido, en el caso de los Hornos eléctricos (Ventanas, HVL y Chuquicamata). Como medida de control en algunos casos han incorporado un precipitador electrostático, como en el caso de Ventanas, que no logra el estándar deseado (120 mgr/Nm<sup>3</sup>), requiriendo un re-potenciamiento o el reemplazo de equipos de unidades de alta eficiencia, que también inhibirán presencia de eventual **Hg**, (límite de 0,1 mg/ Nm<sup>3</sup>), elemento que en la fase fusión destila preferentemente hacia los gases primarios, y del cual las fundiciones disponen de pocos antecedentes.

En los hornos basculantes de limpieza de escoria, con chimeneas directamente sobre los hornos, con un mayor número de unidades y flujos de gases más discretos, el material particulado correspondería As volátil sublimado y reductor incombusto, por lo que de mantenerse como proceso, la técnica de inyección del reductor debiera ser revisada preferentemente para posterior enfriamiento y filtración, en razón a la granulometría del material a controlar. Se destaca sin embargo que la mayor parte de las Fundiciones están planteando el reemplazo de estos hornos por la Flotación, que le evita la problemática de emisiones y por otra parte representa una mejora en recuperación metalúrgica.

El límite de **SO<sub>2</sub>** en la chimenea, establecido en una máximo de 400 mgr/Nm<sup>3</sup>, es una condición exigente para la operación de Hornos eléctricos, por cuanto estas unidades requieren fundir un cierto nivel de carga fría que proporciona azufre adicional al del combustible y de la escoria reducida, con lo cual



probablemente se superará el límite planteado. Sin embargo en promedio no representa una emisión relevante frente al resto de las fuentes emisoras. Fijar el contenido de SO<sub>2</sub> de estos gases representa un tratamiento de lavado de los gases post precipitadores. La desorción de As plantea otro desafío al tratamiento de estos gases, que deberán incorporar también el abatimiento del arsénico, de acuerdo a su proyección de contenido de As en los concentrados, ya que se ha estimado que el 4% del arsénico alimentado a la fundición se evacua por esta fuente.

- Secador de concentrados de cobre

Se plantea informar tres veces al año el contenido de Material Particulado y SO<sub>2</sub>, en mg/Nm<sup>3</sup> evacuado en las chimeneas de las Plantas de Secador, que cuentan para la separación sólido-gas de precipitadores electrostáticos o filtros de manga en el caso de secadores tipo Fluo-sólido.

El control periódico del contenido de material particulado en los gases de chimenea constituye en este caso también una medida de control interno frente a pérdidas que impactan la recuperación metalúrgica del negocio. La emisión de particulado es una medida de la eficiencia del sistema de separación sólido-gas, que en el caso de estar reducida, involucra acciones inmediatas de mantención y/o reemplazo de mangas, para evitar pérdidas de material.

También la medición de SO<sub>2</sub> en gases constituye una medida externa, del adecuado control de temperaturas del proceso de secado, que en caso de unidades rotatorias de gran tamaño podría implicar tostación parcial de material, como en el caso de Altonorte.

- Plantas de Tostación

Los límites establecidos para la chimenea de plantas de tostación, en particular para la Fundición Chuquicamata que incorporará una planta, son en Material Particulado 50 mg/Nm<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 400 mg/Nm<sup>3</sup>, Arsénico 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> y Hg, 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>, éstos pasarán a constituir **criterios de diseño** para esta nueva planta que junto a la nueva unidad de tostación de lecho fluidizado, deberá incorporar las últimas mejoras tecnológicas y de eficiencia energética en la limpieza y tratamiento final de los gases en la planta de ácido sulfúrico, que por la concentración en SO<sub>2</sub> y continuidad operativa del proceso de Tostación, debiera permitir el cumplimiento del límite previsto.

- Hornos de Refino

Para el control de límites de chimeneas de los hornos de refino de las instalaciones cercanas a la población, se deberá instalar en cada uno de los hornos existentes, opacímetros para medición continua en cada Horno, cuyo límite se ha establecido menor a 4%, equipos que deberán contar con calibradores de contrastación periódica.

A nivel operacional, las instalaciones mantendrán los equipos de control y de regulación del reductor (tapón poroso u otro), combustible y reactantes, y eventualmente requerirán de sistemas post combustión, (incineradores), limpieza húmeda de gases u otro para evitar la evacuación de humos negros. Al disponer de gas natural, la reformación es una opción para facilitar el cumplimiento del límite.

- Chimeneas de Plantas de Ácido

Los límites impuestos de As y Hg a los gases a evacuar en las chimeneas de las plantas de ácido son de 0,5 a y 0,07 mg/Nm<sup>3</sup> respectivamente. Será necesario, cautelar una adecuada operación de los sistema de limpieza de gases previos a las planta de contacto, que en el caso del As y Hg deberían fijarse casi en un 100% en la solución de lavado proveniente del scrubber de limpieza de gases, la que luego, en la planta de efluentes es neutralizada y precipitada, generando un sólido de descarte, a disponer bajo condiciones de residuo peligroso.

Para instalaciones en que se ha detectado presencia de Hg, impureza mas bien ligada a minerales con contenido de oro, el diseño de la planta de ácido ha incluido una torre des-mercurizadora adicional, como en el caso de la Fundición Ventanas y como recomendación del consultor para HVL.

#### 6.2.2 SO<sub>2</sub> en Plantas de ácido sulfúrico

El límite establecido para el SO<sub>2</sub> de 400 mg/Nm<sup>3</sup>, es sin embargo la exigencia más crítica planteada, ya que es una condición que no se alcanza en ninguna de las plantas hoy existentes, incluyendo las de doble absorción en operación en 3 de las fundiciones de Chile, que corresponden a plantas con un diseño antiguo y alta capacidad, para producir entre 360 a 1.050 t/d de ácido, a partir de flujos de gases de volumen caracterizados por su variabilidad y concentración de SO<sub>2</sub> entre 8% y 12%.

De hecho las condiciones de emisión calculadas para las instalaciones con doble contacto, con la información entregada por las fundiciones, superan ampliamente el límite previsto, obligando a un posterior tratamiento de lavado de los gases de cola.

Tabla 6.2.2 Emisiones de SO<sub>2</sub> en gases de cola Plantas de ácido Doble absorción

Fundición	Volumen Pta	Alim.	EFI Media	Emisión cola
	Pta. (bs)	Contacto		2010
	Nm <sup>3</sup> /hr	%SO <sub>2</sub>	% conversión	mg/Nm <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub>
Chagres	150.000	12,0	99,5	1.412
Ventanas	140.000	10,5	99,2	1.830
Altonorte	190.000	11,0	98,6	2.837

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de conversión obtenida en plantas de simple contacto existentes que procesan gases entre 3% y 10% no supera el 98% aunque el catalizador se dope con cesio, excepcionalmente un 98,5% puede ser logrado.

A diferencia en las plantas con proceso de doble contacto, una eficiencia primaria de conversión entre 80% a 93% es obtenido en los primeros lechos de contacto, luego hay un intercambiador de calor que enfría los gases que alimentan al absorbedor intermedio, que produce ácido 98,5% a 99,5% y luego los gases residuales pasan a la siguiente etapa de contacto (1 o 2 lechos) y final de absorción.

La eficiencia de conversión diaria de plantas nuevas de doble contacto alcanza a 99,6% promedio día para plantas de quema de azufre, por lo que una planta simple reacondicionada a doble contacto y absorción, con gases metalúrgicos, presencia de arsénico residual y sobre todo de alta variabilidad por la operación de los CPS, a juicio del consultor, no debiera superar 99,5% de eficiencia, y como valor promedio año durante su campaña 99,2% de eficiencia. Mejores resultados de eficiencia, se reportan hoy para plantas nuevas de doble contacto y absorción.

La inversión necesaria para el acondicionamiento de una planta de simple contacto a doble absorción, si es factible por el estado mecánico-estructural de su reactor,

por condiciones de espacio y de configuración mismo, se estimaban al año 2000 en 6 MUS\$, para una planta de 500 t/d de ácido sulfúrico <sup>11</sup>.

Las condiciones de proceso y la concentración de SO<sub>2</sub> entrantes al reactor de conversión, influyen directamente en la concentración de emisiones de SO<sub>2</sub>, reportando la literatura las siguientes medidas de control y niveles de emisión para una planta típica de 100.000 Nm<sup>3</sup>/hr, con una concentración óptima de 11% SO<sub>2</sub>, capaz de producir 1.050 tpd de ácido sulfúrico<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of Sulphuric Acid, p. 40, 2000.

<sup>12</sup> 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 6.2 Técnicas con un efecto positivo sobre disminución de emisiones de SO<sub>2</sub>.

Técnicas	Aplicabilidad	Emisión en mg SO <sub>2</sub> por Nm <sup>3</sup> gas de cola	Emisión en kg SO <sub>2</sub> por t ácido 100%
Simple Absorción + 5 lecho	Todas con sa	<5.000	<10
Doble absorción + 5 Lecho	Todas con da	<1000	<2,5
Simple abs.+ Catalizador Cs en último lecho	Todas con sa	< 4500	<9
Doble abs. * Catalizador	Todas con da	<900	<2,3
Cs en ultimo lecho			
Simple a doble absorción	Según requerimiento	<1000	<2,6
<b>Lavado gases de cola</b>			
Hidróxido de sodio	Todas	<200	<2
Hidróxido de amonio	Todas	<200	<2
Hidróxido da calcio	Todas	<200	<2
Carbón activado	Todas	<1000	<2
Tratamiento con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> después de absorción	Todas	<200	<2

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

En resumen, la doble absorción es una manera adecuada de reducción intermedia de emisiones de SO<sub>2</sub> cuando los espacios y la configuración de planta y principalmente del reactor lo posibilitan y no hay valor agregado de subproductos proveniente de un sistema de lavado de gases, generando una delta de producción de ácido sulfúrico.

Para la estimación de SO<sub>2</sub>, en los gases de salida de la planta de ácido, debe considerarse que por la reacción de conversión, el gas de salida constituye una

fracción del gas alimentado, que para el caso citado de 100.000 Nm<sup>3</sup>/hr y 11%SO<sub>2</sub>, y eficiencia base de 99,2%, el volumen post absorción evacuado correspondería a 82.000 Nm<sup>3</sup>/hr. Cálculo basado en la relación de oxígeno consumido definido por la relación 100.000 (100-1,5 \*11%\* EFI)/100. Por otra parte la relación de conversión de unidades indica que 1 ppm equivale a 2,87 mgr/Nm<sup>3</sup> de gas de salida.

El uso de sistemas de lavado de gases de cola, en función de las capacidades de las plantas en la fundiciones de Chile, representará una inversión significativa y un costo de operación adicional, estimado en global al año 2.000 de 600 US\$/t de SO<sub>2</sub> abatida (sin depreciación), para un instalación de una producción de 500 t/d de ácido<sup>13</sup>

### 6.2.3 Medición de SO<sub>2</sub>

La medición del SO<sub>2</sub> se realiza con medidores de infrarrojo o fotómetros UV, para concentraciones entre 0 y 1.000 ppm, aunque las mediciones por infrarrojo requieren compensación por el agua presente.

Dentro de los fotómetros hay sistemas in-line, para medir la concentración dentro de la corriente del gas, si se prevé que la matriz u otros constituyentes del gas son ópticamente transparentes (libres de neblina) y fotómetros on-line con preparación de la muestra. Este segundo método es más efectivo, pero requiere selección de materiales para la extracción y preparación de muestras adecuados a la corrosión.

Todos los métodos de medición de SO<sub>2</sub> requieren un adecuado mantenimiento para asegurar su disponibilidad y confiabilidad. La precisión total de estos sistemas

---

<sup>13</sup> Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of Sulphuric Acid, p. 40, 2000.

varía entre 2 a 5%, en condiciones de estabilidad que debe ser preservada especialmente en condiciones de monitoreo para prevención ambiental, donde los valores de concentración son habitualmente almacenados en una unidad controladora de datos UCD independiente, o en un PCS.

El sistema requiere cuidado en la determinación del cero, y hay que realizar chequeos de calibración para monitoreo de emisiones, así como disponer de métodos alternativos de prueba frente a fallas de funcionamiento del equipo de monitoreo.

El monitoreo de estos equipos debe ser llevada a cabo tanto por los operadores de planta para detectar anomalías en su operación, así como también por la función controladora ejercida por la autoridad ambiental competente. También existen equipos para los monitores de neblina de ácido y  $\text{SO}_3$ , así como procedimientos analíticos específicos. Para lo anterior es necesario disponer de puntos de muestreo bajo condiciones de iso-cinetidad o sin perturbaciones de diámetros antes y después del punto de medición, con aperturas de 20 a 50 mm que deben mantenerse utilizables.

### 6.2.3 Remoción de Hg

No existen antecedentes sobre la distribución de mercurio en fundiciones de cobre, elemento que destilaría principalmente hacia los gases primarios. Sin embargo según estudio realizado sobre emisiones de mercurio en fundiciones de cobre a nivel global <sup>14</sup>, en la línea de tratamiento de gases primarios donde se concentra la

---

<sup>14</sup> Hylander L. D., Herbert R.B., Global emission and production of mercury during the pyrometallurgical extraction of nonferrous sulphide ores. Environmental Science and technology 42, 2008.



mayor parte de Hg, existen etapas y procesos específicos que permiten remover desde 95% a 99% de Hg, antes de la planta de ácido.

Para la remoción de Hg, cuando esta impureza es significativa en los concentrados tratados, existen varios métodos citados en la literatura. De hecho cuando sulfuros de Hg son sometidos a procesos térmicos, el mercurio volatiliza como vapor de mercurio  $Hg^0$  y sale con los gases generados, parte del mercurio reacciona con el  $SO_2$  y  $O_2$  presentes generando  $HgSO_4$  (s), sólido que puede ser removido del gas en las siguientes etapas de lavado y precipitación húmeda de los gases<sup>15</sup>. El mercurio que no se captura en esta etapa va a hacia la torre de secado como vapor de mercurio, y si no es tratado, entra al sistema de ácido concentrado y contamina el ácido comercial.

Sucintamente los métodos de remoción del Hg desde la fase gaseosa, además de los precipitadores secos y la torre de lavado y enfriamiento son:

- Proceso Outokumpu, basado en la conversión del Hg en  $HgSO_4$ , donde el gas es lavado con ácido sulfúrico de 80% a 90% de concentración a una temperatura de 150 a 180°C, siendo recirculado hasta la saturación con  $HgSO_4$ , hasta que comienza la precipitación. Los cristales son entonces separados en un espesador. El sólido colectado también contiene fierro, zinc, cobre y selenio, de éste sólido el mercurio puede ser removido mezclándolo con óxido de calcio y calentándolo para remoción.
- Proceso Bolkem, donde el Hg es capturado en dos torres de secado operando en serie, donde la primera operaría con un ácido de 80% de concentración y bajo 50°C. La segunda torre de secado es una torre convencional que opera

---

<sup>15</sup> Knowledge for the Sulphuric Acid, Sulphuric Acid on the web [http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl\\_hg.htm](http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hg.htm)

con ácido de 93%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Lo anterior permite la reacción del mercurio gaseoso con el ácido para la formación de sulfato mercurioso, que es luego oxidado a sulfato mercúrico por el ácido fuerte y el oxígeno del gas. Una parte del ácido es drenada de la torre de secado para controlar la concentración de sulfato mercúrico en el ácido circulante, fracción que es tratada con tiosulfato de sodio para posteriormente precipitarlo como sulfuro de mercurio.

- Filtro de Selenio, desarrollado por Boliden para bajas concentraciones de mercurio, con una remoción esperada de 90%. El equipo es un filtro poroso relleno con ácido selenioso tratado para dar selenio rojo amorfo, el que reacciona con el mercurio del gas para dar seleniuro de mercurio. El tiempo de contacto del gas en el filtro es entre 1 a 2 segundos, y el filtro es efectivo hasta que ha alcanzado un nivel de 10 a 15% de Hg, debiendo el filtro ser entonces tratado para recuperar el mercurio y regenerar el selenio.
- Lavador de selenio, que utiliza la presencia de selenio amorfo para reaccionar con el mercurio del gas. Así ácido sulfúrico en el rango de 20% a 40% de concentración, conteniendo selenio es circulado en una torre empacada (scrubber), por la que pasa el gas (que también puede contener Se), con relativamente altos contenidos de mercurio, obteniendo una eficiencia de remoción del 90%.
- Boliden Norzin Process, es el método más popular desde su desarrollo del año 1972 y se basa en la oxidación del Mercurio con cloruro mercúrico para formar cloruro mercurioso. En este proceso una solución con cloruro mercúrico es circulada por una torre empacada de absorción de polipropileno, reactivo que con el paso del gas reacciona para formar cloruro mercurioso, que es insoluble y como tal precipita de la solución en un tanque cónico, siendo la solución clarificada rebombada a la torre de lavado y una parte al segundo sedimentador. Los sólidos colectados del sedimentador primario, fluyen a un

sedimentador secundario de mayor concentración de cloruro mercurioso, donde se agrega zinc para ayudar la precipitación del mercurio, sólidos que son descargados a tambores para ventas o posterior procesamiento.

Este es uno de los métodos más efectivos de remoción de Hg, pudiendo obtener un ácido con menos de 0,5 ppm de mercurio, desde 150 ppm que contenía el gas. La tecnología fue adquirida por Outokumpu quién la comercializa.

- Filtro de carbón, que utiliza carbón activado para la adsorción de mercurio en un gas de baja concentración de este elemento, que opera a 50°C, con una eficiencia de remoción de 90%.
- Precipitación de sulfuro en fase gaseosa, donde una cantidad controlada de H<sub>2</sub>S es inyectado en la fase gaseosa que reacciona con el mercurio para formar HgS. La corriente gaseosa es entonces llevada al equipo de limpieza externo, generando una corriente de efluente ácido que lleva el mercurio, con una remoción de alrededor el 90%. El proceso ha sido exitoso en una fundición de zinc, en Monaca, Pensilvania US.

También para la reducción de Hg en gases finales de plantas de generación a carbón, la literatura reporta el desarrollo experimental de un proceso de remoción, alternativo a los lavadores con cal, para el mercurio elemental ( Hg<sup>0</sup>) usando un lavador húmedo<sup>16</sup> denominado NOXSORB, que inyectaría soluciones de ácido clorhídrico en los gases previo al lavador, de manera tal de inyectar a la corriente gaseosa un oxidante del Hg<sup>0</sup> para su transformación en una forma más soluble, que pueda ser capturada desde la pulpa lavadora, con eficiencia de remoción no superiores al 50%.

---

<sup>16</sup> Elemental mercury removal using a wet Scrubber, Argonne National Laboratory, Abril 1999.

---

### 6.3 Tecnologías disponibles en Tratamiento Gases de Cola Plantas de ácido

Las concentraciones proyectadas para las fundiciones y medidas en la Fundición Ventanas, indican que estas requerirán una tecnología de lavado de gases, para alcanzar el límite establecido de emisión por chimenea, por lo que junto al Ministerio de Medio Ambiente se ha consultado a proveedores, las tecnologías, inversiones y costos de procesos disponibles, los que no fueron recepcionados. Por tal razón el para la consideración de la limpieza de los gases de cola en Fundiciones cercanas a medios poblacionales, como Ventanas, Chagres, Chuquicamata y HVL, se ha considerado una solución de lavado alcalino para asegurar el cumplimiento del límite solicitado.

Los subproductos generados de estos procesos, si no generan ácido deberán ser descartados según las normas ambientales pertinentes.

## **7. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN HERNÁN VIDE LA LIRA**

### **7.1 General**

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Estimar costos de inversión y operación incremental de las soluciones medioambientales para fundición HVL, para enfrentar cada escenario regulatorio y las emisiones en chimenea, indicando la factibilidad de cumplimiento y fiscalización.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento 6%).

- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad nominal de procesamiento de concentrados para cada fundición registrada el año 2010, esto es, que la cantidad de concentrados que cada faena puede procesar se mantiene inalterada respecto del año base seleccionado.

Lo anterior con el fin de establecer el impacto de cada medida de reducción de emisiones en el costo marginal de procesamiento de concentrado, mediante la implementación de sistemas de control y seguimiento.

Por lo tanto el escenario base para fundición HVL considera una capacidad nominal de fusión anual de 350 kt/año de concentrados de cobre.

## 7.2 Descripción General de la Fundición

La fundición HVL fue la primera fundición nacional, propiedad de la empresa nacional de Minería (ENAMI), la cual tiene como objeto fomentar el desarrollo de la minería de pequeña y mediana escala. Para esto, se emplean mecanismos que permiten corregir las fallas propias de los mercados, brindando asistencia técnica, operaciones de procesamiento metalúrgico y actividades comerciales.

Inició sus actividades el año 1951 y su objetivo fue actuar como maquiladora para los concentrados de pequeña y mediana minería. Su capacidad de procesamiento inicial fue de 50 ktpa de concentrado, basada en la operación de un horno de reverbero y tres convertidores Hoboken.

En septiembre el año 1991, la autoridad ambiental gubernamental promulgó el Decreto Supremo N° 185 del Ministerio de Minería, que define entre otras cosas, las normas para calidad del aire por anhídrido sulfuroso y material particulado. En otro aspecto, este Decreto Supremo establece en aquellas zonas saturadas por algunos de los contaminantes indicados, que las fuentes fijas deben presentar un Plan de Descontaminación.

El Plan de Modernización y Descontaminación de HVL, contempló básicamente la eliminación de la fusión en horno de reverbero, principal generador de gases contaminantes, para realizarla totalmente en un Convertidor Teniente (CT), operando con inyección de concentrado seco y aire enriquecido con oxígeno (38%), procesando los gases generados en la fusión/conversión en plantas de ácido sulfúrico, para lo cual se consideraron nuevos sistema de enfriamiento y limpieza de gases, así como una segunda planta de ácido, adicional a la existente.

Lo anterior, permitió tratar la totalidad de los gases sulfurosos captados en las campanas del CT y de los convertidores tradicionales (2 CPS), captando del orden del 90% del azufre ingresado a la fundición. Para el tratamiento de las escorias de fusión/conversión se consideró la instalación de un Horno Eléctrico, con el objetivo principal de aumentar la recuperación de cobre, bajando a menos de 1% el contenido de cobre en la escoria de descarte.

Para el secado de concentrados se instaló un secador rotatorio con filtros de manga y un sistema de transporte e inyección de concentrado seco al CT. El oxígeno para el enriquecimiento del aire, es suministrado por una planta de oxígeno de 300 t/d, de capacidad.

El mayor consumo de energía eléctrica, implicó la necesidad de instalar una nueva sub-estación eléctrica.

#### 7.2.1 Descripción de la Planta

La fundición está compuesta por los siguientes equipos principales

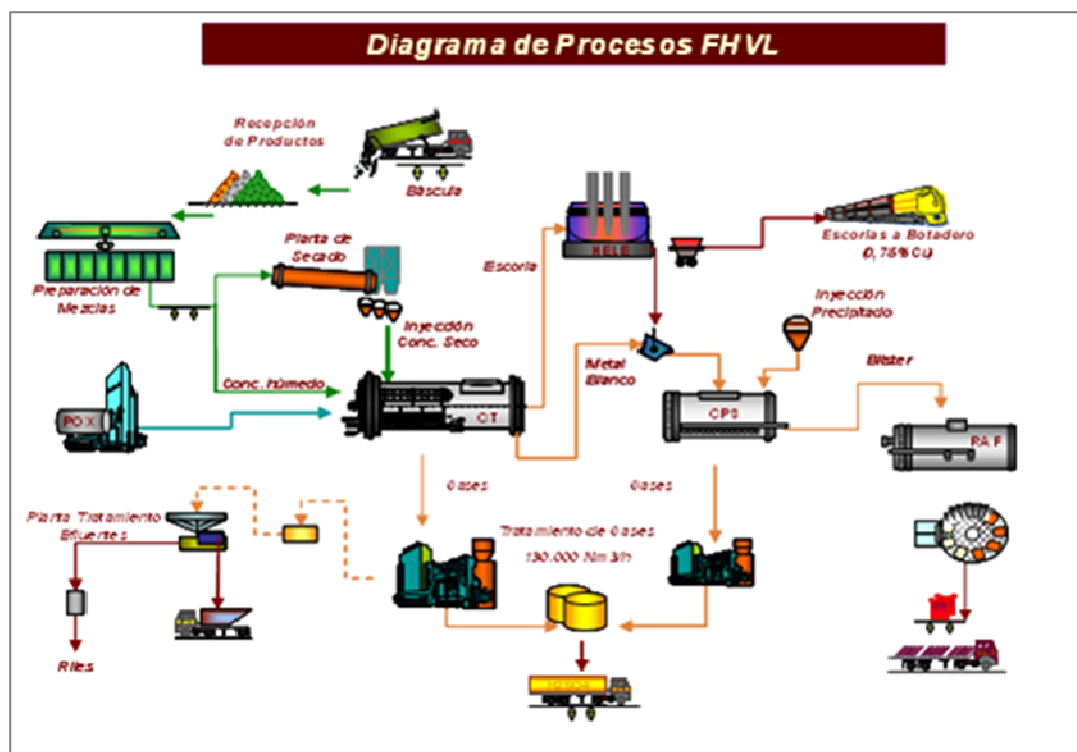
Recepción de concentrados	: Buzones, canchas y mezcla de concentrado
Secado	: 1 secador rotatorio Fuller (55 t/h)
Horno de fusión	: 1 convertidor Teniente (3,9 m x 16 m)
Limpieza de escoria	: 1 horno eléctrico Demag (10 m diámetro x 5 m alto)(9,5 MVA).
Convertidores	: 2 Peirce-Smith (3,0 m x 7,2 m), uno caliente
Horno de retención	: 1 rotatorio (3,0m x 25m)
Hornos de Ánodos	: 1 rotatorios (4,0m x 9m)
Ruedas de Moldeo	: 1 ruedas OK (35 t/h)- ánodos 275 kg
Plantas de oxígeno	: 1 Air Liquide (300 t/d)

Plantas de ácido	: 2 (Mechim S.A y Monsanto) simple contacto, 50.000 y 80.000 Nm <sup>3</sup> /h, respectivamente, ambas potenciadas
Otros, efluentes PLG	: Planta neutralización de ácido débil, con cal, con descarte de sólidos en depósito autorizado, sector alto cuesta Cardones
Dimensiones nave	: 130 m *12 m *12 m

Los ánodos de la Fundición HVL son tratados en la Refinería Ventanas.

En la figura 7.2.1 se muestra a continuación el Diagrama de procesos de la Fundición Hernán Videla Lira.

Figura 7.2.1 Diagrama de procesos Fundición Hernán Videla Lira.



Fuente: Proporcionado por MMA.

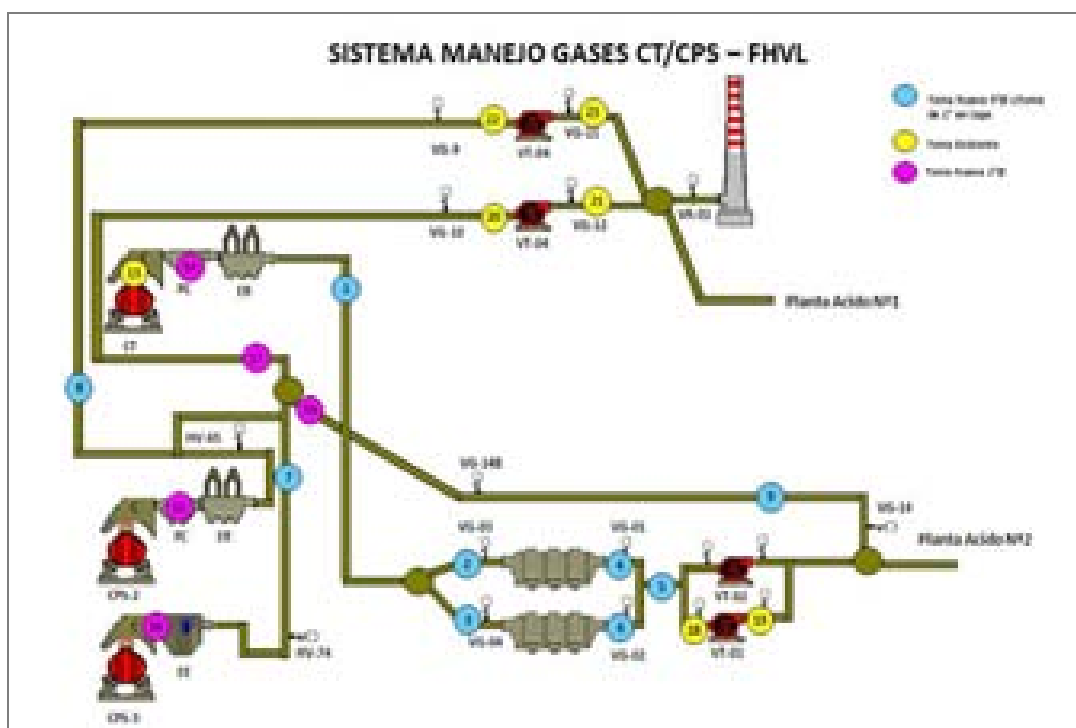


## 7.2.2 Descripción Sistema de Manejo y Limpieza de Gases

El sistema de manejo de gases considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas de los reactores, hasta el ingreso de los gases en planta de ácido sulfúrico.

En la figura 7.2.2, se muestra el esquema operativo del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición HVL.

Figura 7.2.2 Esquema operativo del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición HVL



Fuente: Proporcionado por MMA.

La instalación cuenta de un sistema de manejo de gases en líneas independientes dedicadas, para atender las operación unitarias de fusión y conversión, incluyendo precipitadores electrostáticos y VTI, y dos plantas de ácido de baja capacidad, (PAS 2 de 80.000 Nm<sup>3</sup>/h con gases de CT y PAS 1 de 50.000 Nm<sup>3</sup>/h con gases de CPS y una fracción del CT). Bajo lo anterior la disposición de equipos considerada adecuada por la nula interferencia y competencia entre los flujos de gases, adolece sin embargo de una cámara de mezcla para uniformar la concentración de gases hacia la PLG1 que procesa los gases de CPS, la que incorpora una fracción de 5% a 15% de los gases de CT mezclada intermitentemente con los gases del CPS, para permitir la autotermia, de la planta, según antecedentes registran un alto consumo de combustible.<sup>17</sup>

La fundición HVL, dispone de las dos plantas de ácido sulfúrico citadas para el tratamiento de gases primarios. Ambas plantas son antiguas, (operan desde los años 70 y fueron potenciadas para esa instalación), son de contacto simple pero están actualmente en mal estado, presentando eficiencias del orden de 94% y 96%, a igual que el sistema de manejo y enfriamiento de gases.<sup>18</sup> Según Informe Jacobs, existe una cantidad de infiltraciones desusadamente altas, en el manejo de gases de CT y CPS, debido al estado de los equipos, lo que provocaría la saturación de la capacidad de procesamiento de gases en las PAS.

Lo anterior es particularmente importante para la búsqueda de soluciones de mejoramiento medioambiental, ya que necesariamente debe analizarse el sistema de manejo de gases como un todo. Cualquier deficiencia al interior del sistema de manejo de gases (infiltraciones de aire, falta de capacidad de enfriamiento de gases, capacidad insuficiente de VTI, falta de control de tiraje, capacidad insuficiente de captación de polvos e insuficiente capacidad de tratamiento de

---

<sup>17</sup> Encuesta MMA a Fundiciones Nacionales, 2011

<sup>18</sup> Informe Jacobs, Estudio de perfil “Aumento Captación SO<sub>2</sub> Fundición HVL”, 2011.

gases en PAS) puede hacer ineficiente medidas de mejoramiento, tales como; campanas primarias y secundarias de captación de gases.

El sistema de captación, manejo y limpieza de gases primarios, funciona basado en el control de tiraje, que es el efecto físico de depresión que generan la aspiración de los VTI y que hace posible el ingreso de aire de dilución en las campanas primarias, en equilibrio con la aspiración e impulso de los gases generado por el ventilador principal de planta de ácido, para su ingreso a la limpieza húmeda y secado de los gases, y para vencer las caídas de presión provocada por las torres de catálisis y absorción principalmente.

Con la configuración y estado de los equipos actuales, la fundición HVL declara una captación y abatimiento de azufre de 89,4 %, valor que en base la distribución por fuentes por configuración tecnológica, desarrollada en el capítulo 3, para el esquema CT-CPS-HEL y la inclusión de particularidades de la instalación, se calculó en 89% en S y 91,1% As.

### 7.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

#### 7.3.1 Emisión de Azufre y Arsénico

Considerando el criterio de distribución de emisiones por fuente, bajo el valor medio de fijación Azufre y Arsénico declarado versus el calculado, la distribución estimada de emisiones y contenidos proyectados de azufre para el mediano plazo, permite visualizar las siguientes emisiones por fuentes.

Tabla 7.3.1 Emisiones de Azufre y Arsénico Fundición Hernán Videla Lira

<b>Hernán Videla Lira</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	350.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,8
Ley Media As en concentrados (%)		0,05

Emisión por Fuentes t/a Fundición Hernán Videla Lira	Base Med. Plazo	
	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario CT (giro+campana)	3.087	4
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	1.101	1,4
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	2.524	0,2
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HE	273	8
Residual tratamiento gases HE	n/d	n/d
Gases de cola PAS	4.872	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	126	2
Otras fuentes	680	0
Ajustes	-251	-0,3
<b>Total emisión t/a</b>	<b>12.412</b>	<b>15</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,2\%</math> S</b>	<b>89,2</b>	<b>91,3</b>

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes entregados por el MMA.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S.

Las principales fuentes emisoras en esta instalación la constituyen los gases fugitivos de la boca de los CPS y las emisiones residuales de las plantas de ácido. También constituyen una fuente importante los gases fugitivos del CT y sangrías de esta unidad, que cuenta solo con los sistemas primarios de captura.

El bajo nivel de fijación de HVL junto a episodios críticos en los alrededores, han generado a ENAMI la necesidad de estudios de diagnóstico e Ingeniería de Perfil

de soluciones<sup>19</sup>, a las que habrá que incorporar un trabajo más detallado de restricciones técnicas y real estado de esta instalación, ubicada de manera tal que hoy se encuentra rodeada por un área altamente poblada, debido al constante crecimiento en el tiempo de la ciudad de Copiapó.

Según lo indicado en Tabla 7.3.1 la fijación de arsénico alcanza un nivel superior en 2,1% al valor obtenido con el azufre, verificándose holgadamente el 1% por sobre la captura esperada de azufre, criterio indicado en las bases de entendimiento y que debe operar en conjunto con la magnitud en tonelaje y calidad de los concentrados alimentados, que como valor medio proyectan un bajo contenido de As 0,05%, aunque con presencia de Hg (10,5 ppm promedio proyectado).

### 7.3.2 Emisión de mercurio

La información sobre la proyección de este elemento indica que éste variaría entre 2 y 19 ppm, valor fuertemente relacionado con el tratamiento de concentrados de cobre con contenido de oro, el que normalmente se encuentra acompañado con mercurio. Esto generará emisiones en su estado gaseoso, mayoritariamente en la etapa de fusión de los concentrados.

Se estima que sobre el 99% de mercurio contenido en los concentrados pasa a la fase gaseosa y se distribuye en forma similar al As, vale decir, preferentemente en la fusión pasa a la fase gaseosa y una alta fracción se recupera en los equipos de captación de MP (precipitadores electrostáticos), eventualmente una pequeña proporción llega a la PAS, donde es captado en la etapa de limpieza húmeda, lo que también permite asegurar la producción de ácido sulfúrico con menos de 1

---

<sup>19</sup> Informe Jacobs, Estudio de perfil “Aumento Captación SO<sub>2</sub> Fundición HVL”, 2011.

ppm, de este elemento.<sup>20</sup> Por lo anterior, como caso especial para HVL se justifica una torre de des-mercurizado.

### 7.3.3 Emisión de material particulado

Todas las Fundiciones incluyen un sistema de manejo de gases para recuperar MP y metales volátiles, que son arrastrados desde los procesos de fusión y conversión, y de esta manera abatir las impurezas que son nocivas para la producción de ácido.

En el CT, el material particulado es recuperado en su mayor parte en la cámara de expansión, en el sistema de enfriamiento radiativo y precipitador electrostático seco, en los CPS en la pantalla mata polvos de la cámara de expansión y en el sistema de enfriamiento radiativo (material mas denso).

Las medidas de control del material particulado, usualmente permiten el control de las emisiones de metales y otros sólidos que deben ser abatidos antes de su ingreso a la PAS.

Existen otras fuentes de material particulado, adicionales a las emisiones por chimeneas, o de fuente difusa que deben ser controladas, entre las que destacan las operaciones de chancado y manejo materiales, erosión de suelos, almacenamiento no confinados y operaciones mineras cercanas.

---

<sup>20</sup> Global Emission and Production of Mercury during the Pyrometallurgical Extraction of Nonferrous Sulfide Ores.

#### 7.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica

La arquitectura tecnológica CT/CPS/HE, tiene la característica de poseer dos operaciones unitarias con equipos que basculan, uno con proceso continuo y otro discontinuo (proceso batch), como son el CT y los CPS, respectivamente, lo que significa que la boca de estos equipos con su campana de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto se puede generar emisión de contaminantes como SO<sub>2</sub>, As, Hg, MP y otros. Para contrarrestar esta situación, en los ductos de gases se dispone de ventiladores de tiro inducido (VTI), que por la succión producen una presión negativa dentro de la campana (tiraje), generando una infiltración de aire externo hacia el interior de la campana (se opera idealmente con infiltraciones del orden de 100 a 120%).

No obstante lo anterior, las emisiones más importantes son generadas cuando estos equipos están recibiendo materiales por boca, estando ellos en posición de soplado y por lo tanto emitiendo todos los gases de proceso a la atmósfera, situación válida para CT y CPS. Por esta razón, operacionalmente debería reducirse drásticamente el giro del CT a lo estrictamente necesario (cambio de tobera de inyección, cambio de pasaje de sangría y apertura de toberas), cualquier agregado de material debería ser granulado y agregado por garr gun. Para el caso de los CPS, aunque el carguío de metal caliente es por boca, la adición de carga fría, debería ser agregada a través de una compuerta lateral en la campana.

En operación normal, estando la PAS procesando los gases de CT y CPS, cualquier restricción en el flujo de gases a procesar o por perturbaciones dinámicas, generará emisiones de gases contaminantes (puff de gases en boca).

El sistema de manejo de gases, es decir, conducir los gases captados a través del sistema de enfriamiento, limpieza seca mediante los precipitadores electrostáticos y su ingreso a la limpieza húmeda en la PAS debe ser hermética, para evitar las

infiltraciones de aire exterior que provoca la dilución de los gases y copa innecesariamente la capacidad volumétrica de la PAS.

La fundición HVL, según el informe Jacob, presenta un sistema de manejo de gases con problemas de hermeticidad, permitiendo infiltraciones excesivamente altas, estimadas en 47% adicionales a la dilución en boca para CT y CPS. Esta situación es generada por mal estado de los ductos y sellos deficientes en el tren de gases.

Las emisiones en sangría de CT, canales y ollas, ellas son similares al resto de los hornos de fusión, ya que las sangrías, canales y ollas, son instalaciones similares. En cuanto a las PAS, por corresponder a plantas de simple contacto, tienen una emisión teórica en torno al 2,5% del azufre ingresado a la fundición, registrando en este caso 4,2% del S. Por otro lado, con mas de 40 años de operación, estas PAS tienen su vida útil cumplida, no obstante el reemplazo realizado en algunos equipos nuevos (las torres de catálisis son originales), lo que amerita su reemplazo por una planta integrada.

#### 7.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables en el control de Emisiones de Azufre y Arsénico

En la etapa de recepción de concentrados, la fundición HVL mantendrá la recepción en camiones encarpados y pesados en una de las tres básculas, obteniéndose de esta manera el peso bruto. Los camiones se descargan directamente sobre canchas con piso de concreto, donde se procede al muestreo en piso. Los camiones vacíos son nuevamente pesados, obteniéndose el peso neto húmedo.

Dada la gran variedad mineralógica de los productos procesados, se deben conformar mezclas para mantener una alimentación uniforme a la fundición. Las



mezclas se preparan con una grúa tipo almeja, en un galpón confinado, siendo posteriormente almacenadas en tolvas.

En la etapa de secado de concentrados de fundición HVL, se generan bajas emisiones de azufre, correspondientes solo al uso de combustibles líquido.

De la distribución de emisiones asumida, las emisiones más importantes se encuentran en las campanas primarias, en los giros y en las sangrías de MB, para el caso del CT. En el caso de los CPS, las emisiones relevantes se encuentran en la campana primaria y en los giros realizados para recibir las cargas de MB y la carga fría, para el control de temperatura.

La otra fuente importante de emisión corresponde a las PAS, por ser solo de simple contacto/simple absorción. Las plantas están operando con baja eficiencia (94% y 96% informado el año 2010<sup>21</sup> para PAS N° 1 y 2 respectivamente), aunque según informe Jacobs serían estadísticamente más bajas.

Resulta prioritario mejorar esta situación ya sea por la vía de su transformación o en definitiva su reemplazo total.

Las soluciones tecnológicas se priorizan tomando en consideración los puntos de mayores emisiones y también aquellas que impliquen menores interferencias operativas o modificaciones de infraestructura mayores. En este sentido, la captación de los gases fugitivos de CT y CPS, que requiere de campanas secundarias, será considerada como solución más tardía en razón a que la altura de la nave de fundición es relativamente baja (12 m) y debería modificarse previamente para recibir campanas secundarias.

---

<sup>21</sup> Encuesta MMA a Fundiciones Nacionales, 2011

Las emisiones en CT y CPS, en una primera instancia se abordarán desde su componente de emisiones por carguío por boca y giros de los equipos, adoptando prácticas operacionales que limiten estas operaciones a lo estrictamente necesario. En este sentido es importante el mejoramiento ambiental que genera la alimentación mecánica de carga fría a los CPS, evitando hacer esta operación por boca.

#### 7.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

El primer elemento en la estrategia de mejoramiento ambiental de la fundición HVL, es implementar los proyectos medioambientales que mejoren las deficiencias en la captura de  $\text{SO}_2$  y con mayor capacidad de abatimiento, generando en lo posible ácido sulfúrico para su comercialización.

- Nuevo Sistema de Manejo de Gases

Se requiere un nuevo diseño y remplazo del tren de gases, incluyendo ductos y nuevos VTI. El nuevo diseño debe considerar una cámara de mezcla para uniformar la concentración de  $\text{SO}_2$  en los gases y una alimentación única a nueva PAS, el cambio de ductos mejorará la hermeticidad del manejo de gases y los nuevos VTI permitirán mayores volúmenes de gases primarios, reduciendo infiltración.

El aporte en la disminución de emisión de azufre es de 0,2%, pero su materialización es estrictamente necesaria por su efecto en las emisiones por boca de CT y CPS y el aumento innecesario del caudal de gases, que copa la capacidad de las PAS.

La primera condición que debe verificarse, es que se disponga de espacio suficiente en altura, para instalar posteriormente campanas integrada en el CT

(primaria más secundaria), de lo contrario se requerirá de un alzamiento de la nave de fundición, con los inconvenientes y costos de detención de la fundición (costo estimado MUS\$ 30, el que no considera el costo de detención).

Paralelamente, debe efectuarse una completa revisión de la capacidad de enfriamiento de gases de los actuales sistemas, que como consecuencia de la menor dilución, aumentarán su temperatura. Esta condición es relevante para asegurar una temperatura de ingreso a los precipitadores electrostáticos, no mayor a 350 °C y una buena eficiencia de recuperación de polvos de estas unidades.

Se estima que el plazo requerido para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, que permitirían materializar este proyecto es de dos años, pudiendo estar operativo a mediados de 2015. La inversión requerida se estima es de 30,5 MUS\$.

- Captación y Limpieza de Gases Fugitivos Sangrías CT y HE

Parte del mejoramiento de las emisiones de azufre y arsénico en la fundición, pasa por la captación y limpieza de los gases fugitivos de sangrías de CT y HE de MB y escoria. La solución considera la instalación de pequeñas campanas localizadas por sobre las sangrías y canales, conectadas a ductos y ventiladores para aspirar e impulsar estos gases diluidos a una planta de limpieza, donde se abatirá MP, SO<sub>2</sub>, As y eventualmente Hg. La planta de lavado alcalino, por los espacios requeridos se localizaría en la periferia de la fundición.

Se estima que esta solución medioambiental permitirá reducir la emisión de azufre en 0,7% y los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirían tener

operativo el sistema el primer semestre de 2015, con una inversión requerida de 23,5 MUS\$.

- Nueva Planta de ácido sulfúrico

No resulta recomendable la solución de transformar las actuales PAS a doble contacto/doble absorción, por la antigüedad de ellas (40 años) y el estado general de las plantas (baja eficiencia de conversión y estado no determinado de sistema de enfriamiento y absorción). El camino alternativo a la doble absorción para una PAS de simple contacto, es adicionar una planta de lavado de gases (venturi/scrubber alcalino), previo a su descarga por chimenea, lo que tiene la desventaja de una generación importante de RISES, de alto costo de disposición externa a la planta, sumado al alto costo de los reactivos, lo que impactará en forma determinante los costos de operación.

No obstante lo anterior, el funcionamiento de las PAS mejoradas conlleva una situación de imponderables operacionales difíciles de pronosticar, aun cuando se tenga estrictos planes de mantención.

Dado que se está estructurando un plan para reducción de emisiones de una fundición que operará los próximos 25 años, amerita considerar el reemplazo de las actuales plantas de ácido.

Por lo anterior se plantea la necesidad de contar con una nueva PAS, que permita procesar conjuntamente los gases de CT y CPS. Con un flujo máximo de diseño de 100.000 Nm<sup>3</sup>/h y 10% SO<sub>2</sub> operando nominalmente al 90% de su capacidad. Esta nueva PAS, aportaría beneficios como disminuir la mano de obra (50%) y reducir el consumo de energía eléctrica en al menos un 25% de lo actual, así como incorporaría en su diseño una torre de des-mercurizado y una nueva torre lavado y neutralización de efluentes.

El aporte en la disminución de emisiones de azufre esperados es de un 3,8% y se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, que permita materializar este proyecto son de cuatro años, estando operativo el 2016. La inversión adicional requerida se estima en 159,6 MUS\$.

- Campanas Primarias de Alta Eficiencia

Las actuales campanas primarias del CT y los 2 CPS, de diseño nacional se encuentran en mal estado, lo que amerita su remplazo por otras de alta eficiencia de diseño probado, que sumado a nuevos VTI, permitirían mejorar la captación de emisiones fugitivas de azufre por boca en 1,5 y 0,7% para CT y CPS respectivamente, y operar con diluciones por debajo de 100%.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirían tener operativo el sistema para el CT a mediados del 2016 y para CPS a comienzos del 2017.

La inversión requerida de esta solución medioambiental, se estima alcanzará a 9,5 MUS\$ y 13 MUS\$ para CT y CPS respectivamente.

- Manejo y Limpieza de Gases del Horno Eléctrico

La emisión de arsénico estimada en el horno eléctrico alcanza a 8 t/a, por su condición de elemento cancerígeno y las adversas condiciones de la fundición de encontrarse inmersa en centros poblados cercanos, se recomienda limpiar los gases del horno eléctrico, tomándolos a la salida del precipitador

electrostático existente <sup>22</sup>y conducirlos para su limpieza en una planta de lavado (venturi/scrubber alcalino).

Lo anterior permitiría la captura principalmente de arsénico, azufre y eventualmente mercurio, si hubiese.

Una alternativa, es considerar la limpieza de las escorias vía flotación, lo que no solo permitiría abatir el arsénico, sino que también mejorar la recuperación metalúrgica de la fundición, pero requiere de un contrato para el procesamiento externo, con sistema de disposición de relaves y fusión del concentrado de escorias.

Con la limpieza de gases del HE, se estima una reducción en la emisión de azufre de 0,1% y de 3,2% del arsénico ingresado a fundición. Los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirán tener operativo este proyecto el 2015. La inversión requerida se estima en 13 MUS\$. La inversión considera un Overhaul en el precipitador electroestático, para un mejor abatimiento de As.

- Tratamiento de gases de cola PAS

La nueva planta de ácido debe considerar en su diseño y disposición de equipos la necesidad de una torre de lavado, una torre de des-mercurizado, y una planta de tratamiento de gases de cola, que básicamente consiste en un venturi/scrubber alcalino.

Por chimenea en una planta de ácido nueva de doble contacto se emitirían del orden de 1.100 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> y con un tratamiento de estos gases por lavado, se podría alcanzar una emisión inferior al límite requerido de 400

---

<sup>22</sup> Fundación Hernán Videla Lira, Visita delegación MMA Informe Resumen 9 Marzo 2011

mg/Nm<sup>3</sup> lo que podría permitir alcanzar una reducción de emisiones de SO<sub>2</sub> del orden de 0,4%, respecto de la alimentación a fundición.

Los costos de inversión para la planta de tratamiento de gases de cola, se estiman en 15,9 MUS\$ y los plazos requeridos para los estudios de ingeniería, adquisiciones, construcción, instalación y puesta en marcha, debe estar coordinado con la nueva planta de ácido, estando disponible para operación el 2016.

- Alimentación Mecánica de Carga Fría a CPS

Para evitar las emisiones de gases de procesos en la operación de agregado de carga fría por boca a los CPS, se propone un proyecto de agregado mecánico lateral de este material, por la campana de los CPS, mediante una correa transportadora u otro dispositivo.

La disminución en las emisiones de azufre es de 0,2% y se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirá tener operativo el sistema el 2017. La inversión requerida se estima en 1,5 MUS\$.

- Captación y Tratamiento Gases Campanas Secundarias CT y CPS

Se plantea el mejoramiento de la captación de los gases fugitivos por boca de CT y CPS, mediante la incorporación de campanas secundarias, sobre las actuales campanas primarias.

En atención a que la nave de fusión/conversión tiene una altura de solo 12 m, la incorporación de estas nuevas campanas requerirá subir la altura de la nave en al menos 3 a 4 m, con la consecuente detención de la fundición para efectuar este trabajo.

Se estima una reducción en la emisión de azufre ingresado a fundición de 0,8%, los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirán tener operativo este proyecto el 2018. La inversión requerida se estima en 83,5 MUS\$.

Para el cumplimiento de límites en chimenea además del tratamiento de gases de cola de PAS, se han incorporado inversiones de 0,95 MUS\$ para el sistema poscombustión del horno de ánodos así como opacímetros de control de humos negros, y recursos equivalentes a 1,4 MUS\$ para infraestructura de monitoreo y control de límites, con un gasto operacional de 1,12 MUS\$/año.

El efecto por proyecto de reducción de emisiones, calculado en base a las fuentes detectadas y las eficiencias asignadas (Ej.: 85% abatimiento de S y As en planta de lavado alcalino), se indican en la siguiente tabla:

Tabla 7.5.1 Proyectos de Reducción Emisiones Fundición Hernán Videla Lira

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Hernán Videla Lira</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120kNm <sup>3</sup> /h	0,7	1,2	1.496	2
Rediseño sistema MAGA CM-PLG	0,2	0,2	438	0,3
Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm <sup>3</sup> /h con torre desmercurizadora	3,8	-	8.689	-
Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	1,5	1,3	3.404	2
<b>Límites de chimenea</b>				
Limpieza y tratamiento gases metalúrgicos HE	0,1	3,2	199	6
Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm <sup>3</sup> /h	0,4	-	897	-
Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	-	-	-	-
Infraestructura monitoreo control	-	-	-	-
<b>Escenario 96% S</b>				
Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	0,7	0,04	1.540	0,06
Adición de carga fría por campana o culata CPS	0,2	-	374	-
<b>Escenario 97% S</b>				
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	0,3	0,02	795	0,03
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	0,5	0,4	1.133	1

Fuente: Elaboración propia.



## 7.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con las mejoras medioambientales indicadas en el punto anterior, la distribución de emisiones se modifica y queda como sigue:

Tabla 7.6.a Emisiones según Captura / Fijación de Azufre y Arsénico por escenario  
Fundición Hernán Videla Lira

<b>Hernán Videla Lira</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	350.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,8
Ley Media As en concentrados (%)		0,05

Emisión por Fuentes t/a	Base Med. Plazo		Escenario de 95% S		Escenario de 96% S		Escenario de 97% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
<b>Fundición Hernán Videla Lira</b>								
Fugitivo primario CT (giro+campana)	3.087	4	1.166	1,6	1.166	1,6		
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	599	1
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	1.101	1,4	446	0,6	446	0,6	446	0,6
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	2.524	0,2	2.524	0,2	1.567	0,1		
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	1.170	0,1
Chimenea y sangrías HE	273	8						
Residual tratamiento gases HE	n/d	n/d	81	1	81	1	81	1
Gases de cola PAS	4.872	0						
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	79	0	79	0	79	0
Refino HA	126	2	126	2	126	2	126	2
Otras fuentes	680	0	680	0	680	0	680	0
Ajustes	-251	-0,3	-251	-0,3	-251	-0,3	-251	-0,3
<b>Total emisión t/a</b>	<b>12.412</b>	<b>15</b>	<b>4.851</b>	<b>5</b>	<b>3.894</b>	<b>5</b>	<b>2.930</b>	<b>4</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,2\%</math> S</b>	<b>89,2</b>	<b>91,3</b>	<b>95,8</b>	<b>97,2</b>	<b>96,6</b>	<b>97,2</b>	<b>97,5</b>	<b>97,6</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	7.561	10	957	0	964	1
Toneladas de ácido incremental (t/a)			19.579		2.992		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

Por encontrarse la Fundición HVL, con grupos poblacionales cercanos producto del crecimiento constante de la ciudad de Copiapó, la autoridad ha proyectado la exigencia del cumplimiento de límites en chimenea, que en base a las eficiencias de equipos proyectadas se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 7.6.b Tabla cumplimiento límites por chimenea Fundación Hernán Videla Lira

Cumplimiento Límites en Chimenea Fundación Hernán Videla Lira										
Fuente Generadora y Sistema de Tratamiento	Tecnología a Implementar	Volumen	Conc. SO2	Conc As	EFI trat	Concentración proyectada mg/Nm3				Observaciones
		Nm3/hr	mgr/Nm3	mgr/Nm3	%	400 SO2	0,5 As	0,07-0,1 Hg	50 MP	
Tratamiento gases de Cola PAS doble absorción	Lavado scrubber solución alcalina	85.000	1.073	-	85	161	-	0,02 *	-	Requiere disponer 2.450 t/a yeso
Limpieza y Tratamiento gases secundarios chimenea HE	Precipitador Electrostático y Lavado alcalino	50.000	673	6,2	85	101	0,2	s/a	0,2	Requiere disponer 550 t/a yeso impuro
Captura y Tratamiento gases Sangría CT-HE	Campana, VTI, Lavado alcalino, 70% capt	120.000	1.773	3	85	266	0,4	-	0,4	Requiere disponer 4.050 t/a yeso impuro
Captura y Tratamiento gases Fugitivos CT-CPS	Campanas, VTI, Lavado alcalino 98,5%-80% capt	300.000	1.540	0,7	85	231	0,1	-	0,1	Requiere disponer 5.200 t/a yeso impuro

Nota (\*): Considera torres des-mercurizadora EFI 90% y mínima fijación en ácido.

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis realizado, se reporta que se proyecta cumplimiento de todos los límites de chimenea, requiriendo sin embargo un overhaul del precipitador del HE, previo al nuevo lavado alcalino.

#### 7.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Para poder dar cumplimiento a los escenarios definidos y desarrollar las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub> y As se considera el siguiente cronograma:

Tabla 7.6.1 Cronograma de cumplimiento de Escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION HVL						
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO					
	2013	2014	2015	2016	2017	
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 89,2%				95,8%	96,6%	97,5%
Rediseño Manejo Gases	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx				
Captación y Tratamiento Gases Fugitivos Sangría CT y HE		xxxxxxxxxx				
Nueva Planta de ácido, limpieza gases, torre desmercurizadora		xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx			
Tratamiento de gases de cola PAS		xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx			
Reemplazo Campanas Primarias CT, ductos y VTI				xxxxxx		
Tratamiento y Limpieza gases metalúrgicos HE		xxxxxxxxxx				
Postquemadores de refino, eliminación humos negros		xxxxxxxxxx				
Reemplazo Campanas Primarias CPS, ductos y VTI				xxxxxx		
Adición Mecánica de Carga fría CPS por campana				xxxxxx		
Captación y Tratamiento Gases fugitivos CT y CPS, modificación de la altura Nave Convertidores				xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx	

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el diagrama, el escenario de 95% se cumpliría el año 2016, mientras que el de 96% a comienzos del 2017 y finalmente un escenario cercano a 97% se cumpliría a partir del año 2018.

## 7.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Mediano y Largo Plazo

Como se indicará para otras fundiciones, la realidad de una fundición en términos de conjunto de operaciones unitarias, debe operar a su máxima eficiencia en cada una de sus variables: parámetros operacionales de calidad de la carga, capacidad de procesamiento de ella, equipos de captura y manejo de gases metalúrgicos,

planta de limpieza de gases y captura/limpieza de gases fugitivos, para que como conjunto, la fundición cumpla un determinado nivel de captura y emisión de contaminante.

Es habitual, que de tiempo en tiempo, cualquier equipo del conjunto descrito anteriormente baje su eficiencia o falle, y consecuentemente como conjunto, no se cumpla el nivel de captura y emisión de contaminante.

Tal como esta planteado el cumplimiento de la norma en nivel de captura y en cuotas de emisión, no es una solución bajar el nivel de fusión como ocurre actualmente y por lo tanto el único camino viable es que nominalmente la fundición posea un nivel captura superior en al menos 0,5% por sobre la norma, para poder amortiguar las fallas puntuales de los equipos, dentro de la restricción de límites por chimenea.

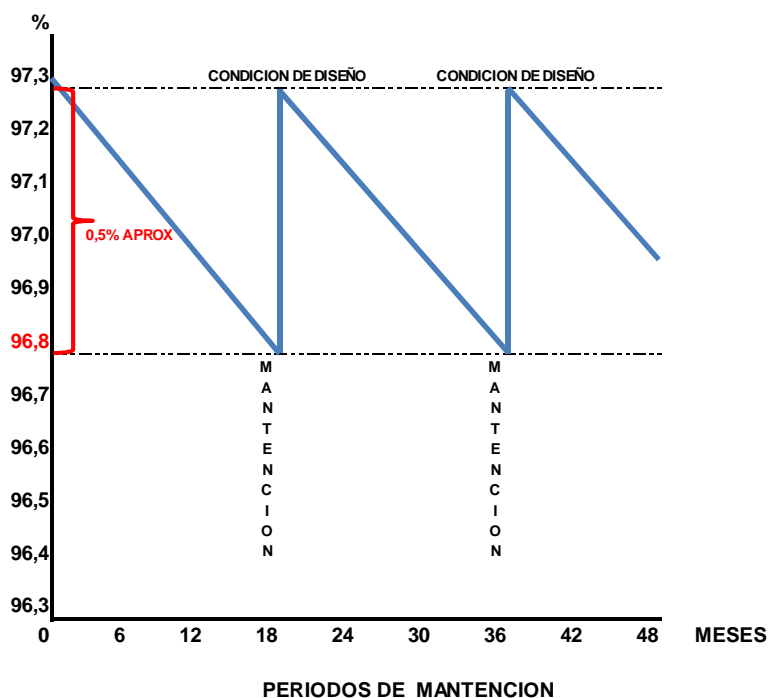
Por otro lado, hay que tener claro que los niveles de eficiencia declarados por los proveedores de equipos en el mejor de los caso se cumplen, en pruebas de suficiencia y con los equipo nuevos recién instalados, pero con el correr del tiempo su eficiencia disminuye y su ineficiencia debe ser absorbida por la mayor eficiencia de captura (0,5%), indicada anteriormente.

Como se comprenderá, cuando la eficiencia de los equipos comienza a decaer, se acepta un determinado nivel de deterioro, antes de programar una detención de fundición, por el impacto económico que ello significa.

No es viable detener los equipos para reparación, tan pronto ellos presenten deterioro (pérdidas de eficiencia) que pueden ser absorbidas por el mayor nivel de captura, porque esto atentaría contra la continuidad operativa de fundición, situación de la más alta necesidad.

Por otro lado, algunas mantenciones requieren equipos especiales (camiones de transporte pesado, grúas de levante mayor, generadores portátiles, etc.), que no poseen las fundiciones (porque son de uso eventual) y que es necesario arrendar y por lo tanto hay que tomar el lugar que corresponda en la lista de espera, hasta que haya disponibilidad del equipo. La situación se visualiza en diagrama siguiente:

Gráfico 7.6.2 Curva genérica rendimiento de instalaciones



Fuente: Elaboración propia.

Lo anteriormente expuesto lleva al Consultor a no comprometer un nivel de abatimiento viable de S superior a 96,9% para la Fundación HVL.

### 7.6.3 Comentarios sobre Infraestructura, Espacios Disponibles e Interferencias

Para enfrentar la necesidad de espacio físico requerido por la planta de limpieza de gases fugitivos que se captarán desde las sangrías del CT y HE, se debe seleccionar un área en la periferia de la nave de fusión/conversión, para reducir el trazado de los ductos de gases. El espacio requerido varía entre 100 a 120 m<sup>2</sup>. Las campanas dedicadas en sangrías de CT puede generar algunas interferencias, para las del HE no se vislumbran problemas.

El rediseño y reemplazo del sistema de manejo de gases de CT y CPS, básicamente seguirá el mismo trazado, salvo la necesidad de mejorar con la incorporación de una cámara de mezcla y alimentación única a la nueva PAS con un nuevo ducto hacia la planta de lavado de gases.

Para CT y CPS se requiere nuevos ductos de gases, nuevos VTI de mayor capacidad y asegurar un programa de mantenimiento preventivo que asegure la hermeticidad del tren de gases.

Las interferencias se circunscriben a la instalación y conexión de estos equipos, que son fabricados externamente y llegan a la planta previos a la mantención anual de la fundición o la determinada por sus PAS, para su instalación y conexiones necesarias.

El tratamiento de los gases metalúrgicos del HE, una vez tratados en el precipitador electroestático, requieren ser conducidos a la planta de lavado alcalino de estos gases. La instalación de esta planta también se localizará en la periferia de la fundición. El trazado de la conducción de estos gases, se estima no genera interferencias mayores.

La captación de los gases fugitivos mediante campanas secundarias desde el CT y los CPS, es el proyecto más conflictivo por el levantamiento de la nave para instalar campanas secundarias tradicionales, por el impacto económico en la fundición (interferencia mayor), que necesariamente requerirá de una detención mayor de fundición de al menos 45 días (experiencia de Fundición Caletones).

Existe bastante espacio disponible, en el sector de las actuales PAS para que se construya la nueva PAS, la que debe considerar en su distribución de equipos una planta de tratamiento de gases de cola.

Para evitar las emisiones de gases de procesos, en la operación de agregado de carga fría por boca a los CPS, ésta considerado el agregado mecánico lateral a la campana de los CPS de estos materiales, mediante una correa transportadora u otro dispositivo y de esta manera obtener tiempos de soplado superiores a 75%.

El éxito en alcanzar las metas en los escenarios de captación, no depende solamente de los proyectos indicados, sino que en gran medida de un riguroso sistema de control de tiraje que regule el manejo de gases, equilibrando la captación y la capacidad de tratamiento de los gases en la PAS. De lo contrario, o se generan emisiones por boca o se aumenta las emisiones en los gases de cola de la PAS.

Este es un aspecto que debe ser estudiado y que es propio de cada fundición por las particularidades del sistema de manejo de gases.

---

## 7.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 7.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

A continuación se indican los montos de inversión por proyectos de la fundición HVL, como consecuencia de la implementación de cada uno de los proyectos de mejoramiento ambiental, tendientes a controlar el SO<sub>2</sub> y As para el cumplimiento de los tres escenarios en estudio.

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/- 30%, las inversiones y recursos pre-inversionales (7% de la inversión) requeridos por escenario para la Fundición HVL, alcanzan por escenario.

- Escenario 95% fijación de S y límites de chimenea con 272,2 MUS\$
- Escenario 96% fijación de S y límites en chimenea con 287,7 MUS\$
- Escenario 97% fijación de S y límites en chimenea con 377,1 MUS\$



Tabla 7.7.1.a Costos de capital por escenario y proyectos Fundición HVL

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub Total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120kNm3/h	23.530	1.647	25.177	15 años
1.2	Rediseño sistema MAGA CM-PLG	30.500	2.135	32.635	20 años
1.3	Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm3/h con torre desmercurizadora	159.600	11.172	170.772	20 años
1.4	Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	9.500	665	10.165	15 años
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HE	13.030	912	13.942	18 años
1.1.2	Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm3/h	15.932	1.115	17.047	20 años
1.1.3	Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	950	67	1.017	20 años
1.1.4	Infraestructura monitoreo control	1.370	96	1.466	20 años
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>31.282</b>	<b>2.190</b>	<b>33.472</b>	
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>		<b>254.412</b>	<b>17.809</b>	<b>272.221</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>				
2.1	Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	13.000	910	13.910	15 años
2.2	Adición de carga fría por campana o culata CPS	1.500	105	1.605	20 años
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>		<b>268.912</b>	<b>18.824</b>	<b>287.736</b>	
<b>3</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>				
3.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	39.935	2.795	42.731	20 años
	Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	43.636	3.055	46.691	20 años
<b>Total Escenario Captura 97% S</b>		<b>352.484</b>	<b>24.674</b>	<b>377.158</b>	

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de estas inversiones, y su reposición por término de vida útil, en un plazo de 25 años, han permitido al Consultor calcular la inversión actualizada INVA por escenario, utilizando una tasa de descuento 6% anual, considerado como año cero el 2011.

La tabla 7.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 7.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición HVL

COSTOS DE INVERSIÓN		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7
ITEM	DESCRIPCIÓN	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>								
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>							
1.1	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120kNm3/h	0	0	1.647	23.530	0	0	0
1.2	Rediseño sistema MAGA CM-PLG	0	2.135	15.250	15.250	0	0	0
1.3	Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm3/h con torre desmercurizadora	0	5.586	5.586	79.800	79.800	0	0
1.4	Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	0	0	0	0	665	9.500	0
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>							
1.1.1	Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HE	0	0	912	13.030	0	0	0
1.1.2	Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm3/h	0	0	1.115	7.966	7.966	0	0
1.1.3	Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	0	0	67	950	0	0	0
1.1.4	Infraestructura monitoreo control	0	0	96	1.370	0	0	0
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.190</b>	<b>23.316</b>	<b>7.966</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>0</b>	<b>7.721</b>	<b>24.673</b>	<b>141.896</b>	<b>88.431</b>	<b>9.500</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>							
2.1	Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	0	0	0	0	910	13.000	0
2.2	Adición de carga fría por campana o culata CPS	0	0	0	0	105	1.500	0
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>0</b>	<b>7.721</b>	<b>24.673</b>	<b>141.896</b>	<b>89.446</b>	<b>24.000</b>	<b>0</b>
<b>3</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>							
3.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	0	0	0	1.398	1.398	19.968	19.968
	Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	0	0	0	1.527	1.527	21.818	21.818
	<b>Total Escenario Captura 97% S</b>	<b>0</b>	<b>7.721</b>	<b>24.673</b>	<b>144.821</b>	<b>92.371</b>	<b>65.786</b>	<b>41.786</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 7.7.2 Costos incrementales de operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en 4,4 MUS\$/año para el escenario 95%, 4,3 MUS\$/año para el escenario de 96% y 8,6 para el escenario de 97%.

Los costos incorporan el caso de producción incremental de ácido como un crédito al costo, eso explica la baja de costo incremental entre el escenario 95% y 96%. La venta del ácido adicional generado, se considera a un ingreso marginal neto de 45 US\$/t.

La disposición de residuos sólidos, deben ser depositados en un sector habilitado ubicado en el inicio superior de cuesta Cardone, sector distante a 15 km, se ha valorizado la disposición de estos materiales a una tarifa de 270 US\$/t.

Tabla 7.7.2 Costos incrementales de operación por escenario Fundición HVL

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTALES					
		COSTO TOTAL INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
		KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	SO <sub>2</sub>
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>							
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>	-130	-406	-1.349	532	1.094	14.027
1.1	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrias CT/HE 120kNm <sup>3</sup> /h	2.684	527	532	532	1.094	1.496
1.2	Rediseño sistema MAGA CM-PLG	-84	-84	0	0	-	438
1.3	Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm <sup>3</sup> /h con torre desmercurizadora	-1.850	-850	-1.000	0	-	8.689
1.4	Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	0,5	0	0,5	0	-	3.404
-	Producción de ácido sulfúrico	-881	-	-881	-	-	-
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>						
1.1.1	Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HE	519	185	93	93	149	199
1.1.2	Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm <sup>3</sup> /h	1.788	373	377	377	662	897
1.1.3	Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	518	-	518	0	-	-
1.1.4	Infraestructura monitoreo control	1.120	-	1.120	0	-	-
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>3.945</b>	<b>558</b>	<b>2.108</b>	<b>470</b>	<b>810</b>	<b>1.095</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>3.815</b>	<b>152</b>	<b>759</b>	<b>1.001</b>	<b>1.904</b>	<b>15.122</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	-122	8	-130	0	0	1.915
2.1	Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	0,6	0	0,5	0	-	1.540
2.2	Adición de carga fría por campana o culata CPS	12	8	4	0	-	374
-	Producción de ácido sulfúrico	-135	-	-135	-	-	-
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>3.693</b>	<b>160</b>	<b>628</b>	<b>1.001</b>	<b>1.904</b>	<b>17.037</b>
<b>3</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>	4.320	967	975	975	1.404	1.928
3.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	1.639	352	354	354	579	795
	Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	2.681	615	620	620	825	1.133
	<b>Total Escenario Captura 97% S</b>	<b>8.013</b>	<b>1.127</b>	<b>1.603</b>	<b>1.976</b>	<b>3.308</b>	<b>18.965</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 7.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

Junto al mejoramiento medioambiental, los proyectos deben incorporar mejoras de eficiencia energética, la instalación de nuevos equipos generará nuevos requerimientos de energía y agua industrial, recursos que por los sistemas de manejo y limpieza de gases, representan una fracción importante de consumo y costos de las Fundiciones, con índices medios referenciales del orden de 0,3 MWH/t concentrado fundido y de agua entre 2,3 m<sup>3</sup>/ t concentrado fundido.

Para el caso de la Fundición HVL, la nueva configuración operacional tendría un menor consumo energético que el actual, básicamente por la nueva PAS, en reemplazo de las dos antiguas y al nuevo diseño del MAGA.

El consumo es del orden de 1,8 GWH/a para el escenario de 95%, 1,9 GWH/a para el escenario 96% y 13,3 GWH/a para el escenario de 97% (considera consumo acumulativo en cada escenario). De igual modo habrá un incremento del consumo de agua industrial, de reposición, según se indica en tabla siguiente:

Tabla 7.7.3 Consumo incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía	Consumo incremental de agua
Fundición Hernán Videla Lira	Año	MW/h/a	m3/a
<b>Escenario 95% S</b>			
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120kNm3/h	2015	6.240	1.800
Rediseño sistema MAGA CM-PLG	2015	-990	-
Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm3/h con torre desmercurizadora	2016	-10.060	4.146
Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	2016	-	3.098
<b>Límites de chimenea</b>			
Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HE	2015	2.184	675
Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm3/h	2016	4.420	1.275
Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	2015	745	-
Infraestructura monitoreo control	2015	-	-
Consumo MWh/a		1.794	
<b>Escenario 96% S</b>			
Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	2017	-	3.887
Adición de carga fría por campana o culata CPS	2017	100	-
Consumo MWh/a		1.894	
<b>Escenario 97% S</b>			
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	2018	4.160	1.200
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	2018	7.280	2.100
Consumo MWh/a		13.334	

Nota: El valor en color azul se refiere al consumo incremental de petróleo en t/a

Fuente: Elaboración propia.

La Fundición HVL, deberá revisar su fuente de abastecimiento de agua industrial, la que se vería incrementada en 18,8 km<sup>3</sup>/a.

Gráfico 7.7.3.a Incremento Energía Eléctrica

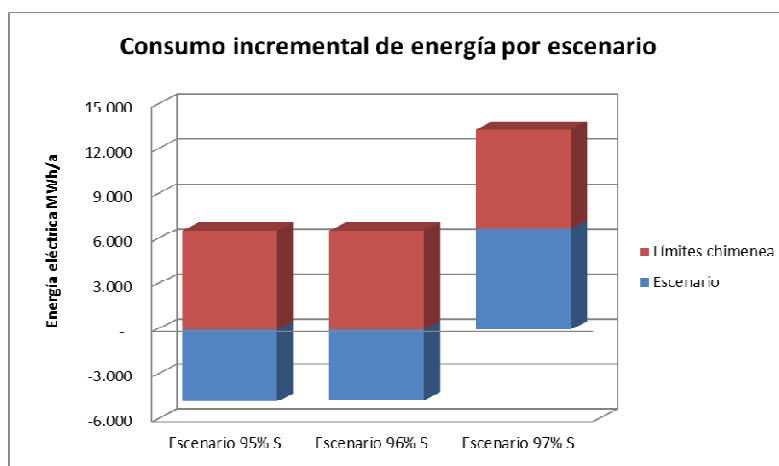
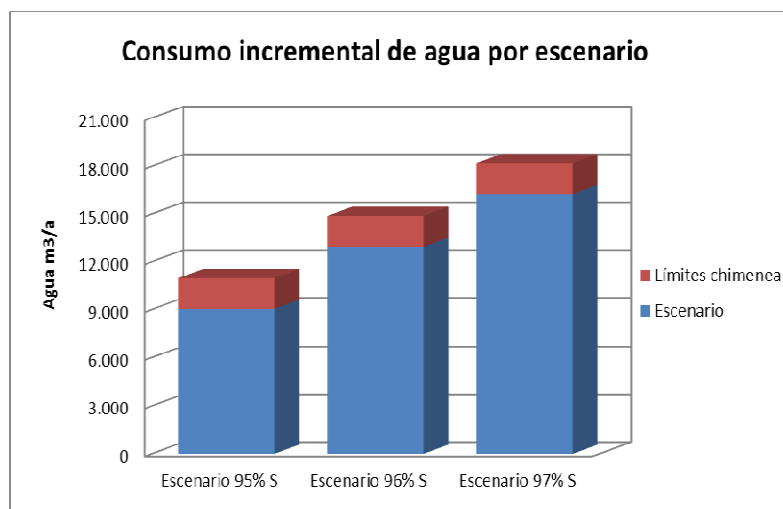


Gráfico 7.7.3.b Incremento Consumo Agua industrial



Fuente Gráficos 7.7.3 a y b: Elaboración propia.

El Gráfico 7.7.3.a refleja el menor consumo de energía eléctrica, como consecuencia del cambio del sistema de manejo de gases y la nueva PAS.

## 7.8 Resultados Técnico/Económico de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición HVL, para que dicha instalación pueda enfrentar nuevos escenarios regulatorios en el mediano plazo, que le permitirían reducir emisiones de Azufre y Arsénico, con niveles de captura y fijación de 95%, 96% y 97% en azufre, y superiores en arsénico.

Lo anterior junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales, permiten evaluar el valor presente (VAC) de dichas medidas y la determinación del Costo anual equivalente (CAE) como una medida comparativa a la razón costo-efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE), que como referente de otras instalaciones y específicamente para 6 fundiciones de Canadá en un estudio normativo al año 2004<sup>23</sup>, el CUE alcanza niveles entre 1.900 a 2.000 US\$ canadienses por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida, costo que crece exponencialmente para mayores niveles de abatimiento.

### 7.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

La reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As, por fuentes para la Fundición HVL se muestra en los gráficos 7.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes y ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor.

---

<sup>23</sup> Technical Assessment of Environmental Performance Emission Reduction Options for the base metals Smelter, p. internet [www.ec.gc.ca](http://www.ec.gc.ca), Canada, 2004.

Gráfico 7.8.1.a Emisiones Hernán Videla Lira de SO<sub>2</sub> por escenario

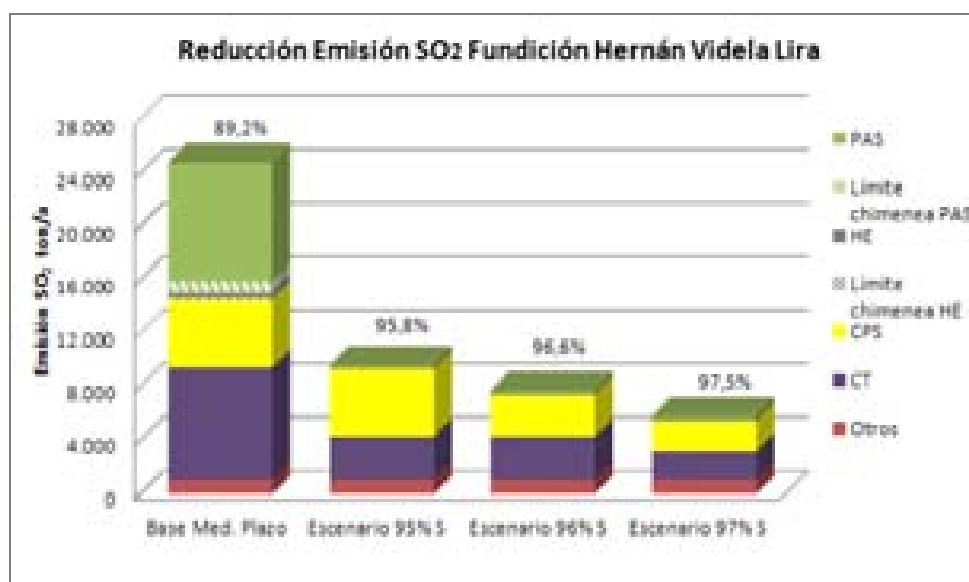
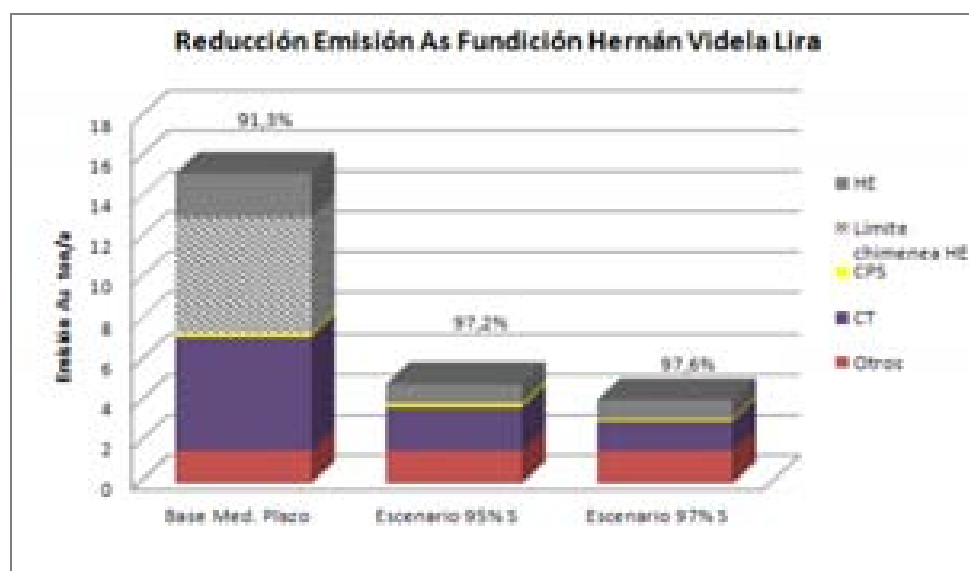


Gráfico 7.8.1.b Emisiones Hernán Videla Lira de Arsénico por escenario



Fuente Gráficos 7.8.1 a y b: Elaboración propia.



## 7.8.2 Cumplimiento de cuotas con emisiones proyectadas Azufre y Arsénico

Las figuras siguientes muestran que de acuerdo a la planificación planteada, a partir del año 2016 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de  $\text{SO}_2$  y As proyectadas por la autoridad para la Fundición HVL, considerando el nuevo esquema operativo de la Fundición.

Gráfico 7.8.2.a Cuotas de Emisiones  $\text{SO}_2$  Hernán Videla Lira por escenario

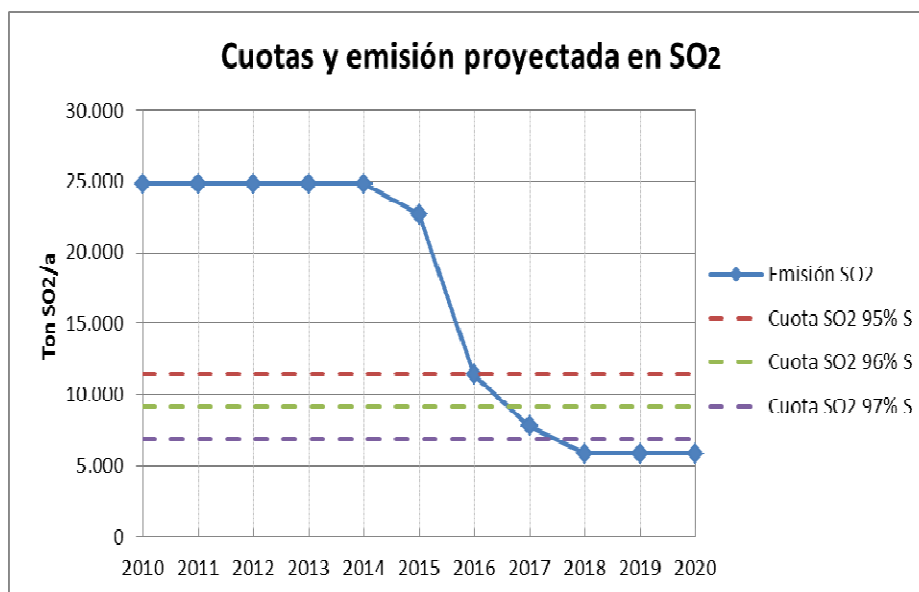
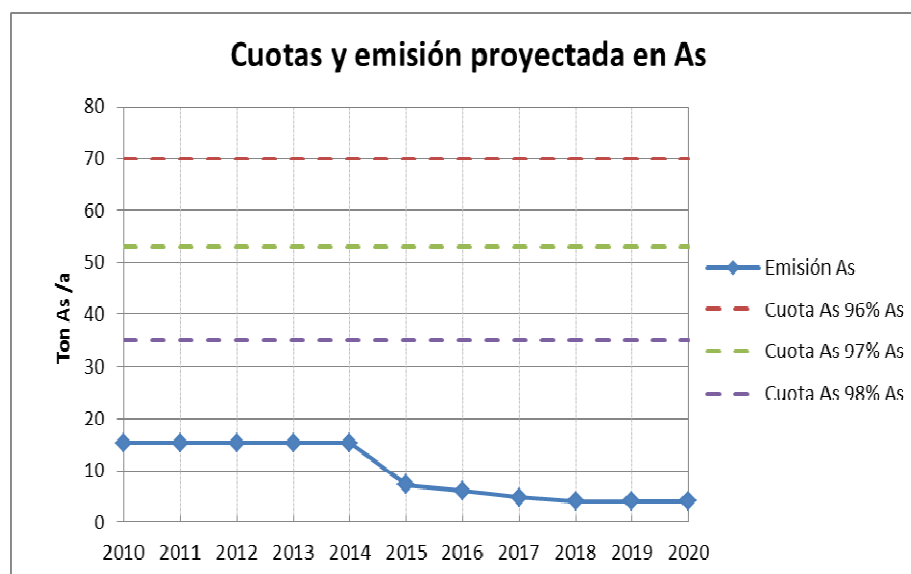


Gráfico 7.8.2.b Cuotas de Emisiones As Hernán Videla Lira por escenario



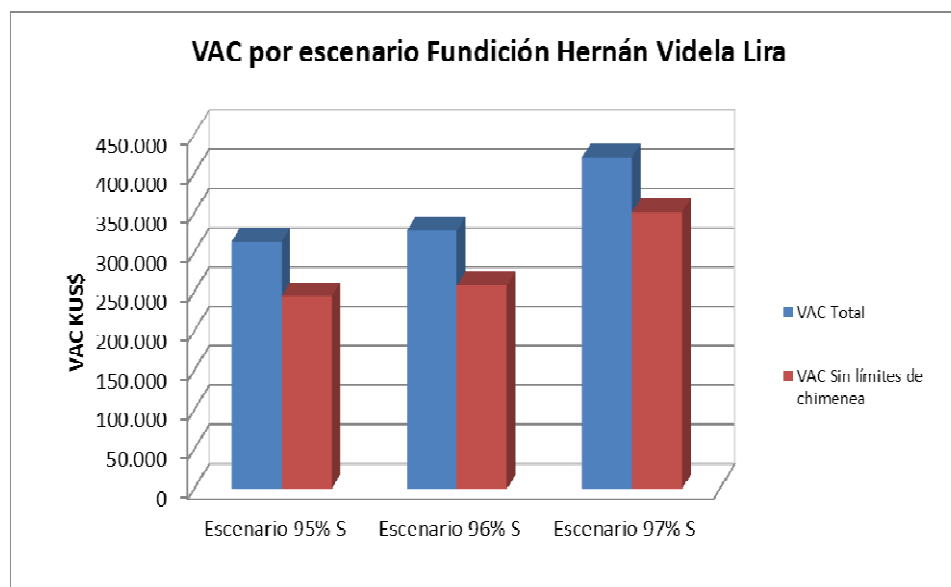
Fuente Gráficos 7.8.2 a y b: Elaboración propia.

### 7.8.3 Determinación de VAC y CAE

La determinación en un período de 25 años del valor actualizado de costos (VAC) para la Fundación HVL, considerando una tasa social de descuento de 6%, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes VAC, valorizados como escenarios acumulativos:

- Escenario de 95% Fijación S, VAC total de 314 MUS\$, de los cuales 69,7 MUS\$ corresponden a soluciones para control de límites en chimenea.
- Escenario de 96% Fijación S, VAC de 327,8 MUS\$ de los cuales 69,7 MUS\$ corresponden a soluciones para el control de límites en chimenea.
- Escenario de 97% Fijación S, VAC de 420,7 MUS\$ de los cuales 69,7 MUS\$ corresponden a soluciones para el control de límites en chimenea.

Gráfico 7.8.3.a Valor Actualizado de Costos soluciones medio-ambientales  
Hernán Videla Lira por escenario

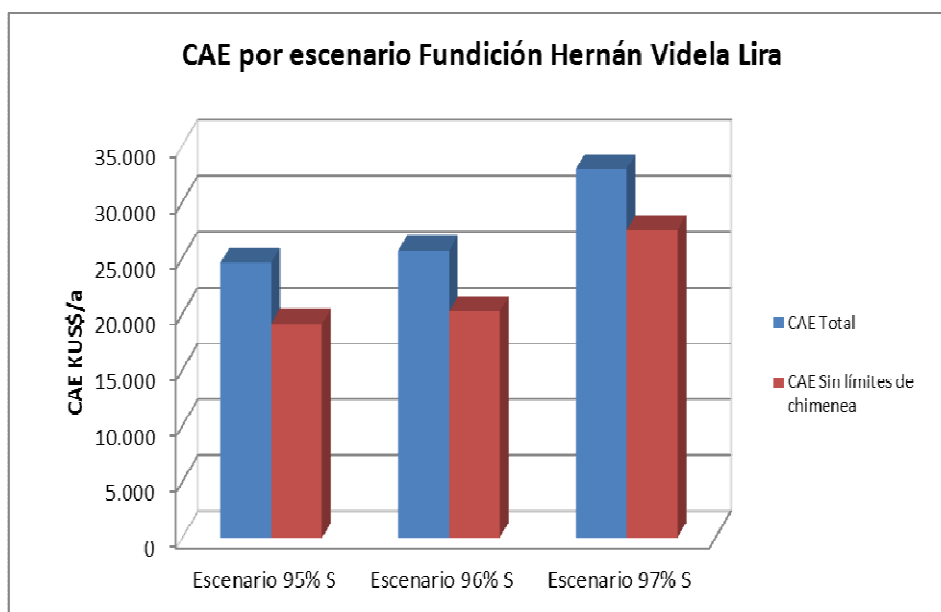


Fuente: Elaboración propia.

De igual modo la determinación del costo anual equivalente o valor en cuotas fijas anuales (CAE) para la Fundición HVL, considerando una tasa social de descuento de 6% en un período de operación dentro de los 25 años, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes CAE:

- Escenario de 95% Fijación S, CAE de 24.561 kUS\$/a
- Escenario de 96% Fijación S, CAE de 25.644 kUS\$/a
- Escenario de 97% Fijación S, CAE de 32.908 kUS\$/a

Gráfico 7.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medio-ambientales Hernán Videla Lira por escenario



Fuente: Elaboración propia.

#### 7.8.4 Relación Costo /Efectividad para el control de Emisiones de SO<sub>2</sub>

Con los antecedentes entregados, para el cumplimiento de los escenarios de abatimiento de azufre proyectados, se requieren los siguientes recursos expresados como indicadores económicos y que llevan a los siguientes costos unitarios equivalentes por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida promedio en el periodo:

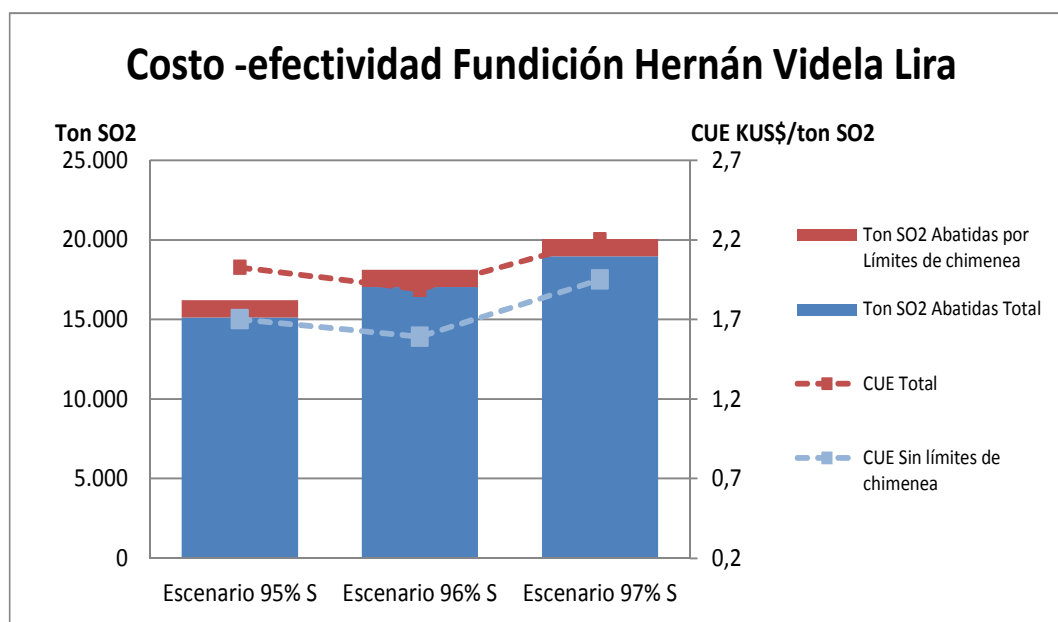
- **Escenario de 95% Fijación S, CUE de 2,0 kUS\$/ t SO<sub>2</sub>**
- **Escenario de 96% Fijación S, CUE de 1,9 kUS\$/t SO<sub>2</sub>**
- **Escenario de 97% Fijación S, CUE de 2,2 kUS\$/ t SO<sub>2</sub>**

Tabla 7.8.4 Indicadores económicos por escenarios Fundición HVL

DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
	INVA	VAC	CAE	CUE
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
Escenario Captura 95% S	243.133	244.271	19.108	1,7
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120kNm3/h	27.798	52.809	4.131	
Rediseño sistema MAGA CM-PLG	34.543	33.763	2.641	
Nueva Planta de ácido doble absorción 100.000 Nm3/h con torre desmercurizadora	170.804	154.947	12.121	
Reemplazo campanas CT, nuevos VTI y ductos	9.989	9.992	782	
Producción de ácido sulfúrico	-	-7.241	-566	
<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
Limpieza y Tratamiento gases metalúrgicos HE	14.703	19.540	1.529	
Tratamiento gases de cola PAS 85.000 Nm3/h	17.022	32.348	2.531	
Eliminación humos negros y opacímetro HA (uno)	1.043	5.869	459	
Infraestructura monitoreo control	1.504	11.941	934	
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>34.272</b>	<b>69.698</b>	<b>5.452</b>	<b>6,2</b>
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>277.406</b>	<b>313.969</b>	<b>24.561</b>	<b>2,0</b>
Escenario Captura 96% S	14.804	13.845	1.083	
Reemplazo campanas CPS, nuevos VTI y ductos	13.669	13.673	1.070	
Adición de carga fría por campana o culata CPS	1.136	1.231	96	
Producción de ácido sulfúrico	-	-1.059	-83	
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>292.210</b>	<b>327.814</b>	<b>25.644</b>	<b>1,9</b>
Escenario Captura 97% S	61.750	92.858	7.264	
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS y modificación de nave	29.507	41.310	3.232	
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT y modificación de nave	32.242	51.548	4.032	
<b>Total Escenario Captura 97% S</b>	<b>353.960</b>	<b>420.673</b>	<b>32.908</b>	<b>2,2</b>

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7.8.4 Costo Unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida HVL



Fuente: Elaboración propia.

#### 7.8.5 Proyección de futuro para la Fundición HVL

Las soluciones medioambientales implementadas para cumplir los escenarios de 95%, 96% y 97% de captura y abatimiento de azufre, consideran el remplazo de la totalidad de los equipos desde la boca del CT y CPS hasta la PAS incluida, es decir, es una fundición nueva, excepto por la conservación del CT, los CPS, edificio y los equipos de apoyo (suministros), lo que permite asegurar una captación, manejo, limpieza y abatimiento de los contaminantes considerados, si los equipos son mantenidos en óptimas condiciones.

Es importante para mantener el cumplimiento de los escenarios generar opciones para el tratamiento sólido de las escorias de refinación y conversión o tratamiento alternativo de éstas, para evitar los giros de estos equipos basculantes.

Por otro lado, para el caso de esta instalación con población aledaña, debe mantenerse un cuidadoso control de los parámetros claves de la PAS, en la operación más riesgosa del punto de vista de los eventos contaminantes (puff de  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ ), como son las puestas en marcha de la planta de ácido, luego de detenciones prolongadas.

Con todo lo realizado, parece razonable vislumbrar en el horizonte un paso adelante adicional hacia un cambio tecnológico de las unidades de fusión y conversión.

## 8. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CHUQUICAMATA

### 8.1 General

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y/o estimar costos de inversión y operación incrementales de fundición Chuquicamata, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento y/o fiscalización, producto de estas inversiones y evaluar cumplimiento de límites en chimenea dado que la fundición Chuquicamata se encuentra localizada a aproximadamente 15 km al norte de la ciudad de Calama, donde se han detectado la influencia de sus emisiones contaminantes, por esta razón se le considera una fundición cercana a un asentamiento poblacional importante.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento 6%) y un horizonte de 25 años.
- Caso Base

La Fundición Chuquicamata ha informado como Caso Base su situación con proyecto denominada “opción optimizada”, esto es una sola línea de procesos conformada por: fusión flash, limpieza de escorias por flotación, conversión en CPS, refino a fuego y dos PAS en funcionamiento. Bajo esta configuración tecnológica se proyecta una reducción de capacidad desde 1.650 a 1.350 kt/a



de concentrados, más calcinas de concentrados de MMH (la calcina constituirá el 30% de la mezcla a fusión), a partir del año 2013.

Esta opción optimizada de la fundición, que se encuentra en etapas de ingeniería, pero con su decisión de implementación tomada, proyecta su operación para fines de 2013, y contempla los siguientes trabajos en el FSF:

- Modificación del Sistema de Alimentación de Carga
- Cambio del Sistema de Dosificación de Carga
- Cambio de Ventiladores de Aire de Procesos de Mayor Capacidad
- Modificación del Diseño del Eyector de Aire Enriquecido (>70%)
- Aumento de Capacidad del Sistema de Refrigeración por Agua
- Modificaciones en Sistema de Sangrías de Eje y Escoria
- Sistemas de Infraestructura para Mantenimiento
- Modificaciones al Sistema de Alimentación de Materiales Sólidos en CPS

## 8.2 Descripción General de la Fundición

La fundición de Chuquicamata inició sus actividades en 1952 con dos hornos de reverbero, 4 convertidores Peirce-Smith, dos hornos de ánodos y una rueda de moldeo.

En 1988 se instaló un horno Flash Outokumpu junto con una planta de ácido Lurgi de contacto simple para tratar los gases de éste. En 1990 se agregó una nueva rueda de moldeo y dos hornos de ánodos.

En 1991 se instaló un Convertidor Teniente y se detuvieron dos de los tres hornos de reverbero que aún operaban con quemadores de aire/oxígeno/petróleo, y en 1992 se instaló una tercera planta de oxígeno de 400 t/d y se reemplazó el

Convertidor Teniente por uno de mayor capacidad para tratar 1.250-1.600 t/d de concentrados.

En 1993 se instaló un circuito de flotación en el concentrador para tratar la escoria de fusión, junto con la construcción de un segundo Convertidor Teniente de capacidad 1.250 t/d, y se detuvo el último de los hornos de reverbero. Ese mismo año se instaló una tercera planta de ácido de contacto simple de 1.720 t/d a un costo de US\$ 103 millones.

En 1994 se instaló un segundo secador rotatorio para proveer concentrado seco a los hornos de fusión. En 1996 se terminó de alargar un cuarto convertidor Peirce-Smith a 4,6m x 13,4m, y el quinto convertidor se transformó en horno de limpieza de escoria.

En el año 2003 se instaló un horno eléctrico Demag de limpieza de escoria a un costo estimado de US\$ 100 y la capacidad del convertidor Teniente 2 fue incrementada a 2.200 t/d, por uso del método de utilizar inyección de concentrados por toberas en fase ultra densa.

La fundición cuenta con 7 precipitadores electrostáticos de captura de polvos y limpieza de gases, 2 en el horno flash, 3 en Convertidores Teniente y 3 en los convertidores Peirce-Smith.

El año 2006 se cerró el campamento de Chuquicamata por haber sido declarado zona saturada y los trabajadores se trasladaron a la ciudad de Calama.

A través de los años a nivel mundial, se ha impuesto la tendencia de operar con una sola línea de fusión/conversión, con equipos de mayor capacidad, en reemplazo de dos líneas de fusión/conversión y de capacidad equivalente.

La decisión de la fundición Chuquicamata de operar sólo una línea de fusión, deteniendo el actual CT en operación para fundir el concentrado y la calcina solo en el horno flash (HF o FSF), tiene ventajas en mejorar la captura de elementos contaminantes (aproximadamente 93% de azufre), simplificar la coordinación de las operaciones de movimiento de puentes grúas, traspaso de líquidos, simplificación del manejo de gases y operación de las PAS más holgada, con flujos de gases metalúrgicos más estables.

Con esta configuración tecnológica, la fundición proyecta alimentar 939 kt/a de concentrados de Chuquicamata y 411 kt/a de calcina, provenientes de concentrados de la Mina Ministro Hales, des-arsenificados por tostación.

### 8.2.1 Descripción de la Planta

La fundición está compuesta por los siguientes equipos principales, alguno de los cuales quedan fuera de servicio, en la opción optimizada a partir del año 2013:

Secado	: 5 silos de almacenamiento y mezcla de concentrado 2 secadores rotatorios (130 t/h y 150 t/h)
Hornos de fusión	: 2 convertidores Teniente (5 m x 22 m y 5 m x 23 m) (Fuera de servicio) 1 horno Flash (8,4 m x 22,4 m)
Limpieza de escoria	: 1 horno basculante HLE (4,5 m x 12,7 m) (Fuera de servicio) 1 horno eléctrico HELE (Fuera de servicio)
Convertidores	: 4 Peirce-Smith (4,5 m x 13, 2m)
Hornos de Ánodos	: 6 rotatorios (4 – 4,0 m x 9,0 m (250 t) y 2- 4,6 m x 9,0 m (350 t))
Planta de Moldeo	: 3 ruedas OK de 24 moldes (50 t/h)- ánodos 400 kg

---

Plantas de oxígeno	:	1 Air Liquide (400 t/d) 1 Kobe (400 t/d) 1 BOC (400 t/d)
Plantas de ácido	:	2 Lurgi contacto simple (1.720 t/d c/u) (PAS N°2 y 3) (PAS N°1 Fuera de Servicio)
Planta Vapor	:	Vapor horno Flash genera electricidad 10MW
Otros	:	Planta tratamiento de licores de planta de ácido Lixiviación de polvos de fundición 2 hornos rotatorios fusión de scrap (4,0 m x 7,6 m)

#### 8.2.2 Descripción Sistema de Manejo y Limpieza de Gases

El sistema de manejo de gases considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas hasta el ingreso de los gases en planta de ácido sulfúrico.

En la figura siguiente, se muestra el esquema operativo del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición Chuquicamata, opción optimización, para tratar en el sistema primario los gases de la unidad de fusión FSF y dos CPS en soplado simultáneo.



Como se observa, los gases metalúrgicos producto de la fusión en horno flash son y serán captados, mediante la acción de los VTI, desde la cámara de gases, procesados en una caldera recuperadora de calor, limpiados de sus polvos en suspensión en precipitadores electrostáticos secos y posteriormente mediante la aspiración de los ventiladores principales de las PAS, conducidos hacia la cámara de mezcla, antes de su ingreso a las plantas de ácido.

Los gases de conversión en CPS, son también captados desde las campanas primarias mediante la acción de VTI independientes, enfriados en cámaras radiativas, limpiados en precipitadores electrostáticos secos y luego mediante la aspiración de los ventiladores principales de las PAS conducidos hasta la cámara de mezcla, una vez mezclados con los gases del horno flash, los gases son llevados hacia las plantas de ácido sulfúrico.

La disposición y cantidad de los equipos considerados para la captación, manejo y limpieza de los gases es considerada como óptima.

### 8.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

#### 8.3.1 Distribución de Emisión de Azufre y Arsénico

La distribución de emisiones calculada para el 2013 en azufre y arsénico, se ha realizado considerando algunos criterios específicos de Chuquicamata que entre otros incorporan modificar la captura de gases en la sangrías del FSF y campanas secundarias en los CPS, que en la actualidad utilizan un tratamiento de agregado de cal seca, para incrementar la fijación de As, en razón a los mayores contenidos de esta impureza usual en los concentrados procesados.

La base de cálculo de esta proyección, fue la distribución de emisiones por configuración tecnológica, desarrollada en el capítulo 3, para el esquema FSF-CPS-PFE, con 97,8% de abatimiento de As.

Tabla 8.3.1 Criterios y Proyección Emisiones Fundición Chuquicamata 2013

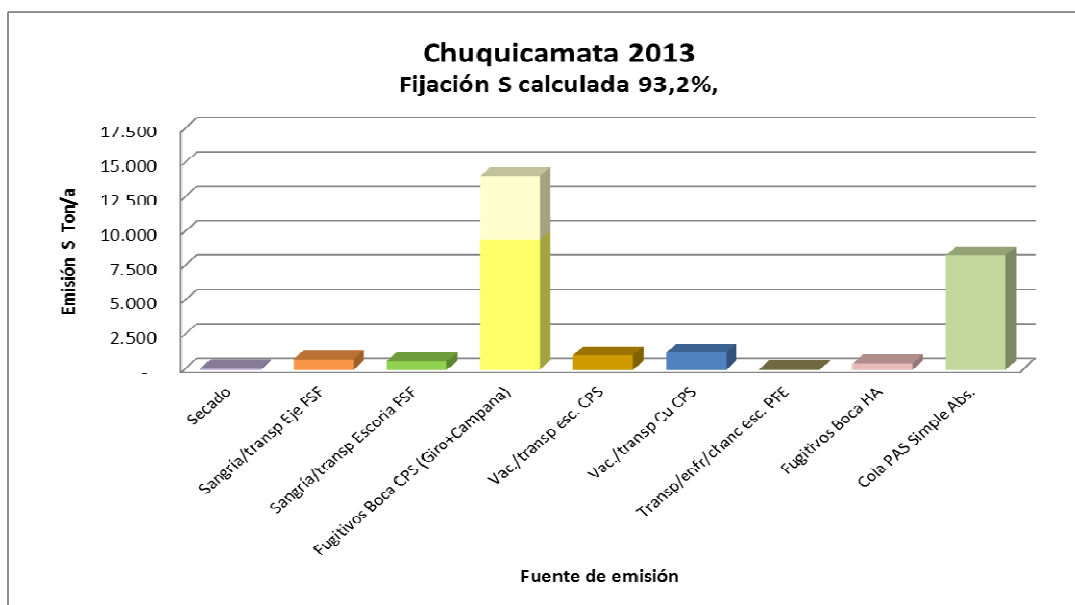
Fundición Chuquicamata Fuente Emisora	Emisión S t/a	Emisión As t/a	Consideraciones Situación 2013 en Operaciones y Sistemas para el Control de Emisiones
Secadores	106	0	Un secador rotatorio directo 150 t/hr, Enap 6, separación de sólidos mediante PE, evacuación gases por chimenea
Fugitivos Sangrías de Mata/ Escoria FSF	1.333	36	Considera campanas para captura de gases en las sangrías eficiencia 50%, que trata por filtración y agregado de cal seca eficiencia 80% As y 15% S.
Fugitivos Boca CPS	14.075	13	Considera campanas primarias y secundarias de baja eficiencia por estado y antigüedad (95% y 50% respectivamente), gases primarios de alta concentración a tratamiento, gases diluidos captados a tratamiento con cal y filtración EFI 80 % As y 15% S. Modificación en el sistema de alimentación de material sólido, considera una EFI 25% S para el 50% de las emisiones por giro.
Fugitivos transporte cobre, escorias CPS	2.270	3	Determinados por el sistema de transporte de materiales y ollas de alta capacidad 6,9 m3.
Limpieza de Escorias PFE	26	2	Considera Flotación de escorias en nueva configuración
Chimenea Hornos Refino	450	105	Seis hornos basculantes sin sistemas de control, emisiones discretas.
Chimeneas Plantas de Ácido Sulfúrico	8.302	0	Considera dos plantas simple absorción/contacto (334.000 Nm3/hr- 11,7% SO <sub>2</sub> ), eficiencia de conversión de 97,7%.
Emisión distribuida calculada (t/a)	26.563	158	
Fijación Distribuida calculada (%)	93,2	98,2	
Alimentación en concentrado (t/a)	388.608	8.686	Considera alimentación de 411 kta calcina ley S 20,3% - As 0,24% y 939 kta concentrado ley S 32,5%- As 0,82%.

Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes entregados por MMA y Cochilco.

Como se indica en el cuadro anterior de emisiones de azufre, los puntos claves de emisión proyectados, en orden descendente son: boca de CPS, plantas de ácido sulfúrico y gases fugitivos de sangrías.

Según lo establecido mediante modelación en el capítulo 4, la distribución estimada de emisiones opción optimización, para el año 2013 se muestra a continuación.

Gráfico 8.3.1 Distribución de emisión de azufre, Opción optimización, año 2013



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, en el gráfico la fijación de azufre calculada por el Consultor para el 2013, alcanza a 93,2% frente al 91,0% declarado como alcanzado en la actualidad, con dos líneas de fusión, lo que representa una ganancia medio ambiental inicial para este nuevo esquema operacional.

### 8.3.2 Emisión de Azufre y Arsénico

Según lo indicado en el cuadro de emisiones la fijación de arsénico alcanza un nivel de 98,2%, superior en 5% al valor obtenido con el azufre, verificándose



holgadamente el 1% por sobre la captura esperada de azufre, criterio indicado en las bases de entendimiento y que debe operar en conjunto con la magnitud en tonelaje alimentado y emitido.

Tabla 8.3.2 Emisiones de Azufre y Arsénico Fundición Chuquicamata con transformación tecnológica a solo FSF.

Chuquicamata	Med. Plazo	
Alimentación conc.+ calcina t/año	Nominal	1.350.000
Ley Media S en la mezcla conc + calcina (%)		28,8
Ley Media As en la mezcla conc.+calcina (%)		0,64

Emisión por Fuentes t/a	Base 2013 Med. Plazo	
Fundición Chuquicamata	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario FSF	0	0
Fugitivo Sangría FSF MB/Escoria	1.334	36
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	14.082	13
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Planta de Flotación Escorias	26	2
Gases de cola PAS	8.306	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	450	105
Otras fuentes	2.377	4
Ajustes	-13	0
<b>Total emisión t/a</b>	<b>26.563</b>	<b>158</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,3\%</math> S</b>	<b>93,2</b>	<b>98,2</b>

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes entregados por el MMA.

Se destaca que la mezcla de alimentación concentrado más calcina, supera el nivel límite proyectado por la autoridad, para la fijación de límites en chimenea con 0,5% As.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S, sin embargo se destaca que el nivel de

arsénico se ve en mayor proporción incrementado debido al circuito de flotación de escorias incluido en el esquema operativo (opción optimizada).

### 8.3.3 Emisión de Mercurio

No se dispone de antecedentes de caracterización de contenidos de mercurio en los concentrados Chuquicamata, como tampoco en las calcinas de MMH, impureza asociada normalmente a minerales de oro, que usualmente volatiliza a alta temperatura en los hornos, siendo junto al material particulado arrastrado en gases y colectado en los sistemas de limpieza tales como precipitadores o filtros de manga.

### 8.3.4 Emisión de material particulado

Todas las Fundiciones incluyen un sistema de manejo de gases para recuperar MP y metales volátiles, que son arrastrados desde los procesos de fusión y conversión, de esta manera se abate las impurezas que son nocivas para la producción de ácido.

En el FSF el MP es recuperado en su mayor parte en la caldera recuperadora de calor y en el precipitador electrostático seco. En los CPS el MP es recuperado en la pantalla mata polvos de la cámara de expansión, en el sistema de enfriamiento radiativo (material más denso) y en el precipitador electrostático seco.

Es importante enfriar adecuadamente el gas de entrada en el sistema de control del material particulado para garantizar la captura del mercurio y otros metales volátiles, o usar un filtro de carbón activo para absorber el mercurio.

Las medidas de control del material particulado, permiten el control de las emisiones de metales y otros sólidos que deben ser abatidos antes de su ingreso a la PAS.

Existen otras fuentes de material particulado adicionales a las emisiones por chimeneas o de fuente difusa que deben ser controladas, entre las que destacan las operaciones de chancado y manejo de materiales, erosión de suelos, almacenamientos no confinados y operaciones mineras cercanas.

#### 8.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica

La arquitectura tecnológica de fundición Chuquicamata al 2013, tiene la característica de poseer una de las mejores tecnologías de fusión continua, como es el horno de fusión flash (FSF), totalmente cerrado y exento de emisiones secundarias. Los gases metalúrgicos del FSF, altamente concentrados en  $\text{SO}_2$ , pasan por una caldera recuperadora de calor y precipitadores electrostáticos para continuar mediante la impulsión de un VTI hasta una cámara de mezcla, desde ahí los gases son succionados por las plantas de ácido (PAS).

La conversión del eje generado en el FSF, seguirá siendo realizada en los CPS que es un proceso discontinuo (proceso batch) con carguíos discretos y vaciados de material. Además la boca de estos equipos con su campana de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto se generan emisiones provenientes de gases secundarios. Para contrarrestar esta situación, se dispone en los ductos de gases de ventiladores de tiro inducido (VTI), que por la succión, producen una presión negativa dentro de la campana, generando una infiltración de aire externo hacia el interior de la campana (se opera idealmente con infiltraciones del orden de 100% a 120%).

No obstante lo anterior, las mayores emisiones son generadas cuando los CPS están recibiendo materiales por boca, estando ellos en posición de soplado y por lo tanto emitiendo todos los gases de proceso a la atmósfera. Por esta razón, operacionalmente debería reducirse el giro del CPS a lo estrictamente necesario, incorporar en lo posible un sistema regulador del flujo de aire en función del giro y realizar el agregado de carga fría, scrap y otros, a través de una compuerta lateral en la campana.

Otra fuente importante de emisión de  $\text{SO}_2$ , es la que se produce en los gases de cola de las PAS, como consecuencia de que ellas son sólo de simple absorción (emitiendo por dicha razón el 2,1% del azufre ingresado).

Del punto de vista de las emisiones en sangría de FSF, canales y ollas, éstas son similares al resto de los hornos de fusión, ya que son instalaciones similares. Sin embargo se destaca que el Horno Flash incorpora campanas colectoras locales en las sangrías, que serían tratadas junto a los gases fugitivos de CPS.

La limpieza de escorias mediante el proceso de flotación, incorporada al esquema operacional, es un aporte importante en la reducción de las emisiones de As y mejoramiento de la recuperación metalúrgica de cobre en la fundición.

#### 8.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables en el control de Emisiones de Azufre y Arsénico

La etapa de recepción de concentrados de la Fundición Chuquicamata, mantendrá su actual sistema de recepción de concentrados por correas cubiertas y para la recepción de calcinas, se habilitará un domo de recepción, almacenamiento y descarga subterránea por correa.

La preparación de la carga para el FSF, mezcla de concentrados, calcina y fundente seco se realizará en sitios cerrados y confinados, que finalmente descargan en los tornillos alimentadores al quemador flash, no requiriendo mejoramientos medioambientales adicionales.

La distribución esperada de emisiones para el año 2013, indica que las fuentes más relevantes se encuentran en las campanas primarias y secundarias en mal estado de los CPS, además de los giros realizados para recibir las cargas de eje y carga fría para el control de temperatura. Una fracción para la reducción del número de giros será solucionado en el proyecto optimización, con el agregado mecánico de carga fría a los CPS.

En segunda instancia, pero igualmente importante, se encuentran las emisiones generadas en los gases de cola de las PAS, a consecuencia que estas sólo son de simple absorción.

Para efectos del proyecto Optimización Chuquicamata se detendrá una planta de ácido, de manera tal que la capacidad conjunta será el de las dos PAS restantes que mantendrá en operación, las cuales son suficientes para el procesamiento de los gases del horno flash y de dos CPS en soplado simultáneo. Por ende el proyecto de mejoramiento ambiental prioritario lo constituye la transformación de las 2 plantas de ácido (PAS) de simple a doble absorción, generando de esta manera mayor capacidad de abatimiento de  $\text{SO}_2$ , como ácido sulfúrico.

Las soluciones tecnológicas restantes, se priorizarán tomando en consideración los puntos de mayores emisiones y que impliquen menores interferencias operativas o modificaciones de infraestructura mayores.

En este sentido, la prevalencia de acciones se centra en la captación de los gases fugitivos de boca de los CPS, que requieren de nuevas campanas primarias, en

reemplazo de las actuales que se encuentran muy deterioradas y al término de su vida útil.

Estando el tratamiento de los gases primarios en plantas de ácido acotado en flujo y concentración, sólo los gases provenientes de mejoras de eficiencia de campanas primarias podrán ser tratados hasta ácido sulfúrico, en tanto que los captados por las nuevas campanas secundarias, deberán ser lavados junto a los gases de las sangría del flash.

#### 8.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

Los proyectos a implementar para incrementar el nivel de fijación de Azufre y Arsénico por la Fundición Chuquicamata y los previstos por el Consultor, se indican a continuación:

- Remplazo de Campanas Primarias en CPS

En atención a que las campanas primarias de gases de los CPS se encuentran en regular estado para enfrentar las nuevas exigencias y cercanos al término de su vida útil, se hace necesario efectuar el reemplazo de ellas. Para la realización de este proyecto se está en antecedentes que la Fundición Chuquicamata está estudiando un par de diseños de campanas de alta eficiencia, lo que permitiría un mejoramiento en la captación de  $\text{SO}_2$ , disminuyendo las emisiones en 0,7%, del azufre ingresado a fundición, con lo cual la fijación aumentaría a 93,9%.

Con estos equipos funcionado, se espera lograr además del mejoramiento del ambiente de trabajo una mejor captura de los gases metalúrgico de los CPS

La inversión estimada de este proyecto es de 43 MUS\$, para los cuatro CPS con un plazo de ejecución estimado de un año, durante la reparación general de cada CPS. Su operación se espera para comienzos de 2014.

- Modificación Plantas de Ácido Sulfúrico a Doble Contacto/Doble Absorción

En la actualidad las PAS, son de simple contacto y emiten del orden de 2,1 % del azufre ingresado a fundición, situación que puede mejorarse sustancialmente al efectuar una transformación mayor de las plantas, transformándolas en plantas de doble contacto/doble absorción, situación ampliamente probada en la industria. Se estima que en su conjunto, se obtendría una disminución en la emisión de azufre del orden de 1,4% del azufre ingresado a fundición, lo que permitiría mejorar la captura y abatimiento de azufre, desde 93,9% a 95,3%.

La inversión estimada de este proyecto, para la adecuación de dos plantas, es de 30 MUS\$, su operación se espera para comienzos de 2015.

- Captación y Lavado Gases Fugitivos CPS y sangrías FSF

Para la captación de los gases fugitivos de la boca se requiere instalar nuevas campanas secundarias en cada uno de los CPS, como las descritas en el Capítulo 5 Soluciones Tecnológicas Generales para la Captura y Tratamiento de Gases Fugitivos y Secundarios.

La implementación de esta solución tecnológica no tiene mayores impedimentos de infraestructura, ya que hace algunos años estos equipos existían en fundición, que hasta hoy funcionan en estado deficiente. Es por esta razón que se prevé su reemplazo, probablemente con la selección de campanas integradas.

Los gases fugitivos de CPS y de sangrías FSF serán tratados en una planta de lavado alcalino (venturi/scrubber) de gases diluidos.

Con la implementación de este proyecto, se estima que se obtendrá un mejoramiento en la captación y abatimiento de azufre desde 95,3% a 96,7%.

La inversión estimada de este proyecto es de 91 MUS\$, con un plazo de ejecución de 2 años, por lo que su operación se esperaría para comienzos del año 2016.

- Planta de Tratamiento de Gases de Cola

Actualmente por la chimenea en las plantas de ácido se emiten del orden de 1.700 y 2.200 ppm de  $\text{SO}_2$  por disponer solamente de simple absorción. Para cumplir límites de emisión por chimeneas, además del cambio a doble absorción con una reducción de 1,4% de emisiones de  $\text{SO}_2$ , se hace necesario un tratamiento adicional de estos gases residuales de las plantas de ácido, con los que se persigue alcanzar una concentración de  $\text{SO}_2$  en los gases evacuados ( $275.400 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ) inferior a 400 ppm, permitiendo además alcanzar una reducción de emisiones de  $\text{SO}_2$  de 0,6% respecto de la alimentación.

Existen varias tecnologías para el tratamiento de gases de cola, entre las que se cuentan, el proceso Cansolv, el método Peracidox o Superox que básicamente consiste en agregar un venturi scrubber que trata los gases con agua oxigenada ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) para producir ácido sulfúrico. No disponiendo a la fecha el Consultor datos fehacientes de proveedores, para efectos de esta evaluación de costos, se ha considerado frente a este último proceso recuperador de ácido sulfúrico, el **proceso de lavado alcalino**, por presentar un menor VAC según pre-evaluación comparativa según antecedentes



bibliográficos<sup>24</sup>, generados por mayores costos de operación del Superox, no compensados por la mayor venta de ácido, aún a un precio de venta local de 60 US\$/t.

Los costos de inversión para una planta alcalina de tratamiento de gases residuales de las 2 PLG se estiman en 32,2 MUS\$ y los plazos requeridos para los estudios de ingeniería, adquisiciones, construcción, instalación y puesta en marcha son de aproximadamente 24 meses, estimándose en operación el 2015.

Con esta reducción de emisiones se proyecta mejorar la captación y abatimiento de azufre desde 96,7% a 97,3%.

Para el cumplimiento de límites en chimenea además del tratamiento de gases de cola de PAS, se han incorporado inversiones de 5,7 MUS\$ para sistema poscombustión en los 6 hornos de ánodos así como opacímetros de control de humos negros y recursos equivalentes a 1,29 MUS\$ para infraestructura de monitoreo y control de límites, con un gasto de operacional de 0,56 MUS\$/año.

El efecto por proyecto de reducción de emisiones, calculado en bases a las fuentes detectadas y las eficiencias asignadas indicadas en el capítulo 5 (Ej.: 85% abatimiento de S y As en planta de lavado alcalino), se indica en la siguiente tabla:

---

<sup>24</sup> Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries, Vol N°3 Production of S ulphuric Acid, p. 40, 2000.

Tabla 8.5.1 Proyectos de Reducción de Emisiones Fundición Chuquicamata

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Chuquicamata</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Reemplazo campanas CPS	0,7	0,03	5.556	2
Plantas de ácido doble absorción	1,4	-	10.791	-
<b>Límites de chimenea</b>				
Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	-	-	-	-
Infraestructura monitoreo control	-	-	-	-
<b>Escenario 96%-97% S</b>				
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	1,2	0,01	9.576	1,1
Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	0,2	0,13	1.500	11,7
<b>Límites de chimenea</b>				
Tratamiento gases de cola PAS 274.000 Nm <sup>3</sup> /h	0,6	-	4.948	-

Fuente: Elaboración propia.

## 8.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con los proyectos antes mencionados implementados, la distribución de emisiones en la fundición queda como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 8.6.a Emisiones según Captura-Fijación de Azufre y Arsénico por escenario Fundición Chuquicamata

<b>Chuquicamata</b>	<b>Med. Plazo</b>
Alimentación conc.+ calcina t/año	Nominal 1.350.000
Ley Media S en la mezcla conc + calcina (%)	28,8
Ley Media As en la mezcla conc.+calcina (%)	0,64

Emisión por Fuentes t/a	Base 2013 Med. Plazo		Escenario de 95% S		Escenario de 96%-97% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
<b>Fundición Chuquicamata</b>						
Fugitivo primario FSF	0	0	0	0	0	0
Fugitivo Sangría FSF MB/Escoria	1.334	36	1.334	36	584	24
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	14.082	13	11.304	10		
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	6.517	9
Planta de Flotación Escorias	26	2	26	2	26	2
Gases de cola PAS	8.306	0	2.911	0		
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	n/d	n/d	437	0
Refino HA	450	105	450	105	450	105
Otras fuentes	2.377	4	2.377	4	2.377	4
Ajustes	-13	0	-13	0	-13	0
<b>Total emisión t/a</b>	<b>26.563</b>	<b>158</b>	<b>18.389</b>	<b>156</b>	<b>10.377</b>	<b>143</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,3\%</math> S</b>	<b>93,2</b>	<b>98,2</b>	<b>95,3</b>	<b>98,2</b>	<b>97,3</b>	<b>98,3</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	8.174	2	8.012	13
Toneladas de ácido incremental (t/a)			25.542		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

Por encontrarse la Fundición Chuquicamata, cercana a la ciudad de Calama, la autoridad ha proyectado también la exigencia de cumplimiento de límites en chimenea, que en base a las eficiencias de equipos proyectadas se precia en la siguiente tabla.

Tabla 8.6.b Tabla cumplimiento límites por chimenea Fundición Chuquicamata

Cumplimiento Límites en Chimenea Fundición Chuquicamata										
Fuente Generadora y Sistema de Tratamiento	Tecnología a Implementar	Volumen	Conc. SO2	Conc As	EFI trat	Concentración proyectada mg/Nm3				Observaciones
		Nm3/hr	mgr/Nm3	mgr/Nm3	%	400 SO2	0,5 As	0,07-0,1 Hg	50 MP	
Tratamiento gases de Cola PAS doble absorción	Lavado scrubber solución alcalina	275.400	2.447	-	85	367	-	-	-	Requiere disponer 13.400 t/a yeso
Captura y Tratamiento gases Fugitivos CPS y sangrías FSF	Campanas, VTI, Lavado alcalino 80%-70% captura respectivamente	465.000	3.843	12,8	85	576	1,9	-	1,9	Requiere disponer 29.950 t/a yeso impuro

Fuente: Elaboración propia.

### 8.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Para poder dar cumplimiento a los escenarios definidos y desarrollar las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As se considera el siguiente cronograma:

Tabla 8.6.1 Cronograma de cumplimiento de Escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION CHUQUICAMATA					
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO				
	2013	2014	2015	2016	2017
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 93,2%		95,3%	97,3%		
Reemplazo campanas CPS	xxxxxxxxxxxx				
Planta de ácido doble absorción	xxxxxxx	xxxxxxxxxxxx			
Captación y Neutralización Gases Secundarios CPS y sangrías FSF		xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx		
Tratamiento de gases de cola PAS			xxxxxxxxxxxx		

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el diagrama el escenario de 95% se cumpliría a partir del año 2015, y el escenario de 96%-97% se cumpliría a partir del año 2016.

Aun cuando el nivel de captura alcanzado en la fundición es de 97,3%, a fines del año 2015, por el rango de dispersión de los cálculos se sostiene un cumplimiento de solo 96% por las razones que se explican más adelante en el punto siguiente.

### 8.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Mediano y Largo Plazo

Es importante transparentar la realidad de una fundición en términos de que el conjunto de operaciones unitarias debe operar a su máxima eficiencia en cada una de sus variables: parámetros operacionales de calidad de la carga, capacidad de procesamiento de ella, equipos de captura y manejo de gases metalúrgicos, planta

de limpieza de gases y captura/limpieza de gases fugitivos para que como conjunto, la fundición cumpla un determinado nivel de captura y emisión de contaminante.

En la práctica, lo normal es que de tiempo en tiempo, cualquier equipo del conjunto descrito anteriormente baje su eficiencia o falle y consecuentemente, como conjunto no se cumpla el nivel de captura y emisión de contaminante.

Tal como esta planteado el cumplimiento de la norma en nivel de captura y en cuotas de emisión, no es una solución bajar el nivel de fusión como ocurre actualmente y por lo tanto el único camino viable es que nominalmente la fundición posea un nivel captura superior en al menos 0,5% por sobre la norma, para poder amortiguar las fallas puntuales de los equipos, dentro de la restricción de límites por chimenea.

Por otro lado, hay que tener claro que los niveles de eficiencia declarados por los proveedores de equipos, en el mejor de los caso se cumplen en pruebas de suficiencia y con los equipo nuevos recién instalados, pero con el correr del tiempo su eficiencia disminuye y su ineficiencia debe ser absorbida por la mayor eficiencia de captura (0,5%), indicada anteriormente.

Como se comprenderá, cuando la eficiencia de los equipos comienza a decaer, se acepta un determinado nivel de deterioro antes de programar una detención de fundición, por el impacto económico que ello significa.

No es viable detener los equipos para reparación, tan pronto ellos presenten deterioro (pérdidas de eficiencia) que pueden ser absorbidas por el mayor nivel de captura, porque esto atentaría contra la continuidad operativa de la fundición, situación de la más alta necesidad.

Por otro lado, algunas mantenciones requieren equipos especiales (camiones de transporte pesado, grúas de levante mayor, generadores portátiles, etc.), que no poseen las fundiciones (porque son de uso eventual) y que es necesario arrendar y por lo tanto hay que tomar el lugar que corresponda en la lista de espera, hasta que haya disponibilidad del equipo.

Lo anteriormente expuesto lleva al Consultor a no comprometer un nivel de abatimiento de S superior al 96,5% para la Fundición Chuquicamata

### 8.6.3 Comentarios sobre Infraestructura, Espacios Disponibles e Interferencias

La fundición Chuquicamata es un complejo industrial extremadamente compacto, donde es difícil encontrar espacios para nuevas instalaciones, afortunadamente la transformación tecnológica de la fundición básicamente consiste en un potenciamiento del FSF, para quedar como única unidad de fusión de concentrados y poder fundir 1.350 kt/año (concentrado y calcina).

Esto implica modificar y aumentar la capacidad de los sistemas de alimentación y pesaje de carga, cambiar ventiladores de aire de proceso (de 10 a 15kpa), aumentar la capacidad del quemador de carga (enriquecimiento de O<sub>2</sub> mayor a 70%) del FSF, adecuar la capacidad de circulación de agua de refrigeración y modificaciones en el sistema de sangrías de eje y escoria del horno.

El remplazo de las campanas primarias de los CPS, por otras de alta eficiencia no debería generar mayores interferencias, ya que este trabajo debe realizarse durante la mantención general de cada CPS. Respecto de los espacios necesarios, no se vislumbran inconvenientes dado que existe espacio suficiente, por lo que Chuquicamata estaría evaluando la adquisición de campanas integradas (primarias más secundarias)

La modificación y mejoramiento de las plantas de ácido a doble contacto/doble absorción, requiere de una fuerte intervención dentro del área de la PAS. Para estos básicamente se requiere cambiar reactores existentes de catálisis y torres de absorción, diseñados con nuevas interconexiones, entre ambos, aumentar la capacidad de enfriamiento de la PAS, modificando los intercambiadores de calor, verificando la capacidad del ventilador principal frente a los nuevos requerimientos de caídas de presión y en lo posible, aprovechar el calor generado en planta de ácido. La modificaciones puede ser complementadas por aumento de altura de los reactores de conversión, por lo que no se espera haya interferencias mayores.

Como ventaja Chuquicamata dispone de la tercera planta, para operar durante el periodo de modificaciones. Las interferencias se circunscriben a la instalación y conexión de estos equipos, que son fabricados externamente y llegan a la planta, previos a la mantención anual de la fundición, para su instalación y conexiones necesarias.

Para evitar las emisiones de gases de procesos, en la operación de agregado de carga fría por boca a los CPS, en la opción optimización fundición, ésta considerado el agregado mecánico lateral a la campana de los CPS de estos materiales, mediante una correa transportadora u otro dispositivo y de esta manera obtener tiempos de soplado superiores a 75%.

La captación de los gases fugitivos desde la boca de los CPS, mediante campanas secundarias es un proyecto sin interferencias mayores, ya que hasta hace poco tiempo, fundición de Chuquicamata operaba campanas secundarias, existiendo por lo tanto la altura y los espacios necesarios para equipos de estas características. Algunas interferencias menores podrían surgir con los tendidos de los ductos de gases fugitivos de campanas secundarias hacia la planta de lavado que debería ubicarse en un sector periférico.

Estos equipos deben encontrarse en planta, para que durante la mantención anual de ella, efectuar su instalación y conexión.

Las plantas de tratamiento de gases de cola, pueden requerir de espacios no disponibles en la actualidad, pero que si se dispondrá al término del desmantelamiento de la PAS N°1.

## 8.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 8.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

A continuación se indican los montos de inversión por proyectos de la fundición Chuquicamata adicionales al cambio de esquema operativo, como consecuencia de la implementación de cada uno de los proyectos de mejoramiento ambiental, tendientes a controlar el SO<sub>2</sub>, As, Hg y MP, para el cumplimiento de los tres escenarios en estudio.

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/- 30%, las inversiones y recursos pre-inversionales (7% de la inversión) requeridos por escenario para la Fundición Chuquicamata, alcanzan:

- Escenario 95% fijación de S y límites de chimenea con 85,6 MUS\$
- Escenario 96%-97% fijación de S y límites en chimenea con 217,5 MUS\$



Tabla 8.7.1.a Costos de capital por escenario y proyectos Fundición Chuquicamata

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Reemplazo campanas primarias CPS	43.000	3.010	46.010	15 años
1.2	Plantas de ácido doble absorción	30.000	2.100	32.100	18 años
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	5.700	399	6.099	20 años
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	1.290	90	1.381	20 años
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>6.990</b>	<b>489</b>	<b>7.480</b>	
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>		<b>79.990</b>	<b>5.599</b>	<b>85.590</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96%-97% S</b>				
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	60.000	4.200	64.200	20 años
	Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	31.000	2.170	33.170	20 años
<b>2.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
2.1.1	Tratamiento gases de cola PAS 275.400 Nm3/h	32.250	2.257	34.507	20 años
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>39.240</b>	<b>2.747</b>	<b>41.987</b>	
<b>Total Escenario Captura 96%-97% S</b>		<b>203.240</b>	<b>14.227</b>	<b>217.467</b>	

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de estas inversiones y su reposición por término de vida útil, en un plazo de 25 años, han permitido al Consultor calcular la inversión actualizada INVA por escenario, utilizando una tasa de descuento de 6% anual, considerando como año cero el 2011.

La tabla 8.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 8.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Chuquicamata

COSTOS DE INVERSIÓN								
ITEM	DESCRIPCIÓN	AÑO 1 2011	AÑO 2 2012	AÑO 3 2013	AÑO 4 2014	AÑO 5 2015	AÑO 6 2016	AÑO 7 2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>								
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>							
1.1	Reemplazo campanas primarias CPS	0	3.010	43.000	0	0	0	0
1.2	Plantas de ácido doble absorción	0	2.100	10.000	20.000	0	0	0
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>							
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	0	0	399	5.700	0	0	0
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	0	0	90	1.290	0	0	0
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>489</b>	<b>6.990</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>		<b>0</b>	<b>5.110</b>	<b>53.489</b>	<b>26.990</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96%-97% S</b>							
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	0	2.100	2.100	30.000	30.000	0	0
	Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	0	1.085	1.085	15.500	15.500	0	0
<b>2.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>							
2.1.1	Tratamiento gases de cola PAS 275.400 Nm3/h	0	0	0	2.257	32.250	0	0
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>489</b>	<b>9.248</b>	<b>32.250</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Total Escenario Captura 96%-97% S</b>		<b>0</b>	<b>8.295</b>	<b>56.674</b>	<b>74.748</b>	<b>77.750</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 8.7.2 Costos incrementales de operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en 5,9 MUS\$/año para el escenario 95% y 22,2 MUS\$/año para el escenario de 96%-97%, incorporan el caso de producción incremental de ácido como un crédito al costo, la venta del ácido adicional generado a un ingreso marginal neto de 60 US\$/t, o la entrega en planta para despacho directo a las instalaciones mineras circundantes.

Para la disposición de residuos sólidos, en el caso específico de la Fundición Chuquicamata, se ha valorizado la disposición de estos materiales en el depósito Montecristo de la División Codelco Norte, a una tarifa de 150 US\$/t.

Tabla 8.7.2 Costos incrementales de operación por escenario Fundición Chuquicamata

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTALES					
		COSTO TOTAL INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>	<b>1.239</b>	<b>1.908</b>	<b>-1.531</b>	<b>862</b>	<b>0</b>	<b>16.347</b>
1.1	Reemplazo campanas primarias CPS	2	-	2	0	-	5.556
1.2	Plantas de ácido doble absorción	2.770	1.908	0	862	-	10.791
-	Producción de ácido sulfúrico	-1.533	-	-1.533	-	-	-
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>						
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	3.107	-	3.107	0	-	-
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	560	-	560	0	-	-
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>3.667</b>	<b>0</b>	<b>3.667</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>4.907</b>	<b>1.908</b>	<b>2.137</b>	<b>862</b>	<b>0</b>	<b>16.347</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96%-97% S</b>						
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	7.066	1.055	1.063	1.063	3.885	9.576
	Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	3.590	989	997	997	608	1.500
<b>2.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>						
2.1.1	Tratamiento gases de cola PAS 275.400 Nm <sup>3</sup> /h	5.660	1.210	1.220	1.220	2.010	4.948
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>9.328</b>	<b>1.210</b>	<b>4.888</b>	<b>1.220</b>	<b>2.010</b>	<b>4.948</b>
	<b>Total Escenario Captura 96%-97% S</b>	<b>21.223</b>	<b>5.161</b>	<b>5.417</b>	<b>4.142</b>	<b>6.503</b>	<b>32.371</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 8.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

Aunque junto al mejoramiento medioambiental, los proyectos deben incorporar mejoras de eficiencia energética, la instalación de nuevos equipos generará nuevos requerimientos de energía y agua industrial, recursos que por los sistemas de manejo y limpieza de gases, representan una fracción importante de consumo y costos de las Fundiciones, con índices medios referenciales del orden de 0,3 MWH/t de concentrado fundido, y de agua entre 2,3 m<sup>3</sup>/ t de concentrado fundido. Para el caso de la Fundición Chuquicamata, la nueva configuración operacional tendrá un menor consumo energético que el actual, básicamente al detener una planta de ácido sulfúrico, proceso de alta demanda eléctrica.

Sin embargo los nuevos sistemas incorporados para el control de emisiones por sobre la base 2013, implicarán un aumento del consumo energético del orden de

22,6 GWH/a para el escenario de 95% y de 61 GWH/a para el escenario 96%-97%. De igual modo habrá un incremento del consumo de agua industrial de reposición, según se indica en tabla siguiente:

Tabla 8.7.3 Consumo incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía MW/h/a	Consumo incremental de agua m3/a
<b>Fundición Chuquicamata</b>	<b>Año</b>		
<b>Escenario 95% S</b>			
Reemplazo campanas CPS	2014	-	12.110
Plantas de ácido doble absorción	2015	22.578	4.691
<b>Límites de chimenea</b>			
Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	2015	4.471	-
Infraestructura monitoreo control	2015	-	-
Consumo MWh/a		22.578	
<b>Escenario 96%-97% S</b>			
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	2016	12.480	3.600
Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	2016	11.700	3.375
<b>Límites de chimenea</b>			
Tratamiento gases de cola PAS 274.000 Nm3/h	2016	14.321	3.375
Consumo MWh/a		61.079	

Nota: El valor en color azul corresponde al consumo incremental de petróleo en t/a, para eliminación de humos negros.

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.7.3.a Incremento Energía Eléctrica

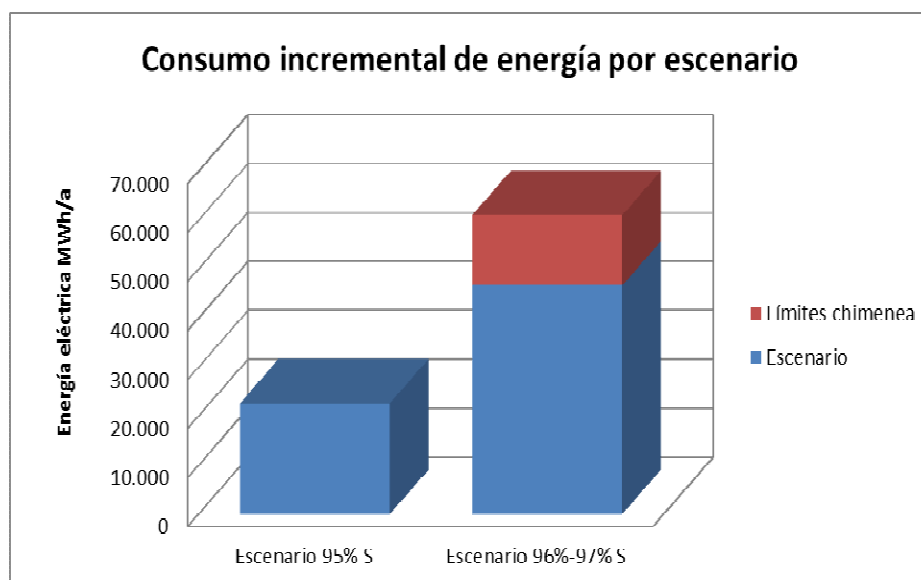
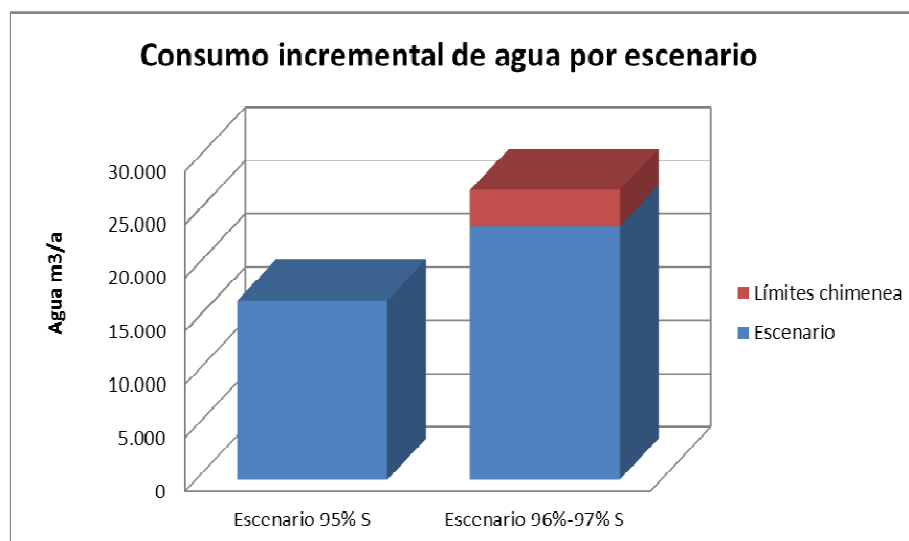


Gráfico 8.7.3.b Incremento Consumo Agua industrial



Fuente Gráficos 8.7.3 a y b: Elaboración propia.

## 8.8 Resultados Técnico/Económico de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición Chuquicamata, para que dicha instalación pueda enfrentar nuevos escenarios regulatorios en el mediano plazo, que le permitirían reducir emisiones de Azufre y Arsénico, con niveles de captura y fijación de 95% y 96%-97% en azufre, y superiores en arsénico.

Lo anterior, junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales permiten evaluar el valor presente (VAC) de dichas medidas y la determinación del Costo anual equivalente (CAE) como una medida comparativa a la razón costo-efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE), que como referente de otras instalaciones y específicamente para 6 fundiciones de Canadá en un estudio normativo al año 2004<sup>25</sup>, el CUE alcanza niveles entre 1.900 a 2.000 US\$ canadienses por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida, costo que crece exponencialmente para mayores niveles de abatimiento.

### 8.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

La reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As, por fuentes para la Fundición Chuquicamata se muestra en los gráficos 8.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes y ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor.

---

<sup>25</sup> Technical Assessment of Environmental Performance Emission Reduction Options for the base metals Smelter, p. internet [www.ec.gc.ca](http://www.ec.gc.ca), Canada, 2004.

Gráfico 8.8.1.a Emisiones Chuquicamata de SO<sub>2</sub> por escenario

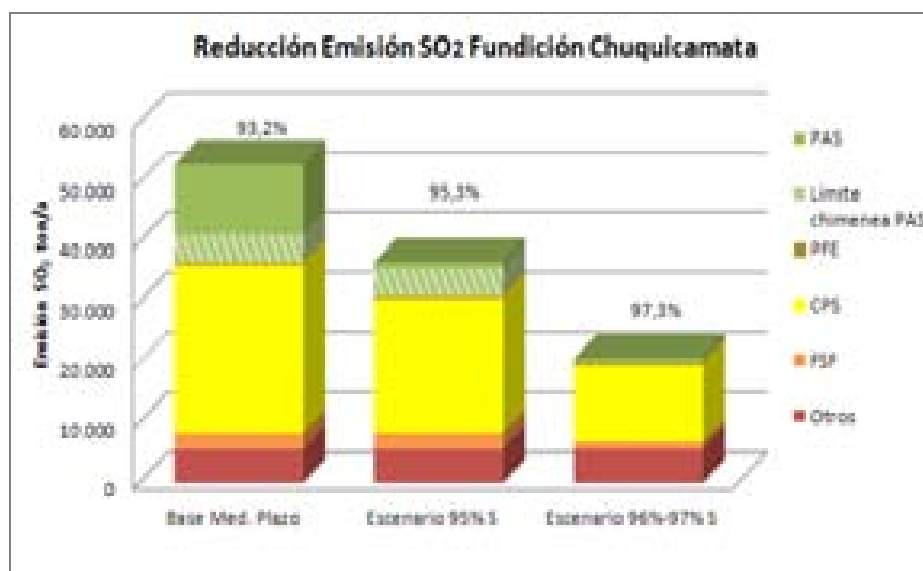
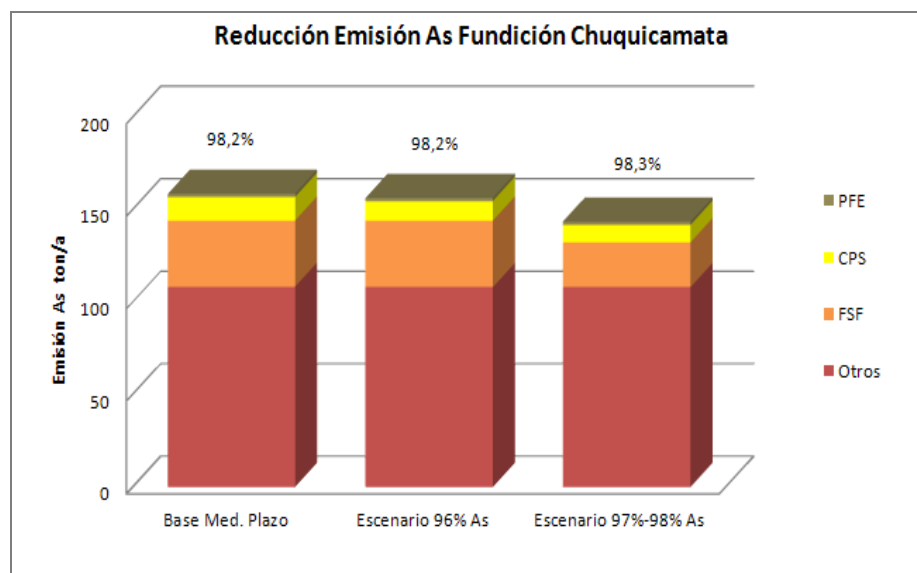


Gráfico 8.8.1.b Emisiones Chuquicamata de Arsénico por escenario



Fuente Gráficos 8.8.1 a y b: Elaboración propia.

## 8.8.2 Cumplimiento de cuotas con emisiones proyectadas Azufre y Arsénico

Las figuras siguientes muestran que de acuerdo a la planificación planteada, a partir del año 2016 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> y As proyectadas por la autoridad para la Fundición Chuquicamata, considerando el nuevo esquema operativo de la Fundición.

Gráfico 8.8.2.a Cuotas de Emisiones SO<sub>2</sub> Chuquicamata por escenario

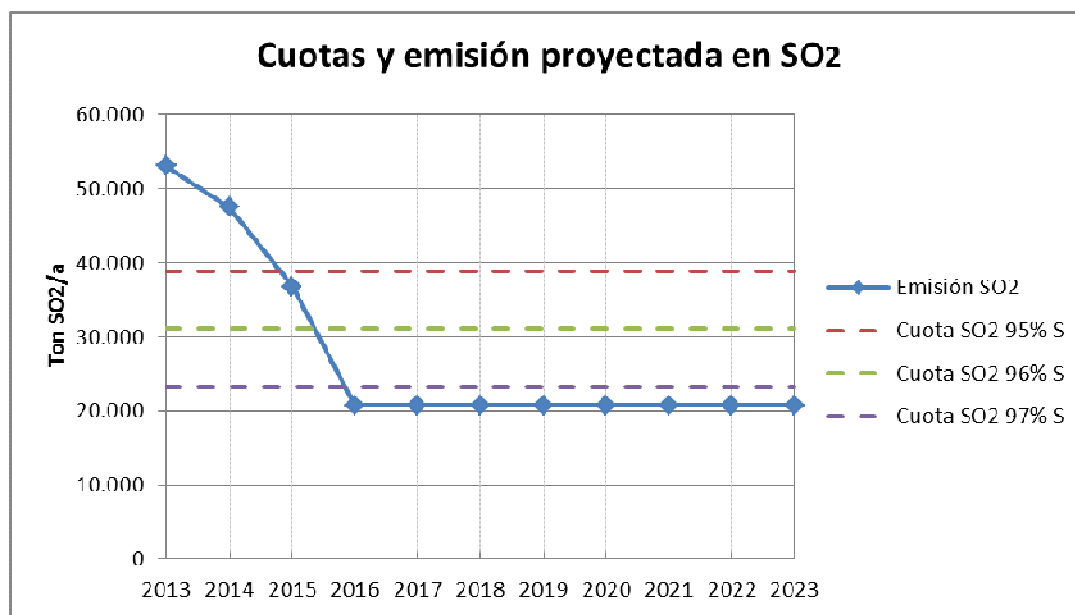
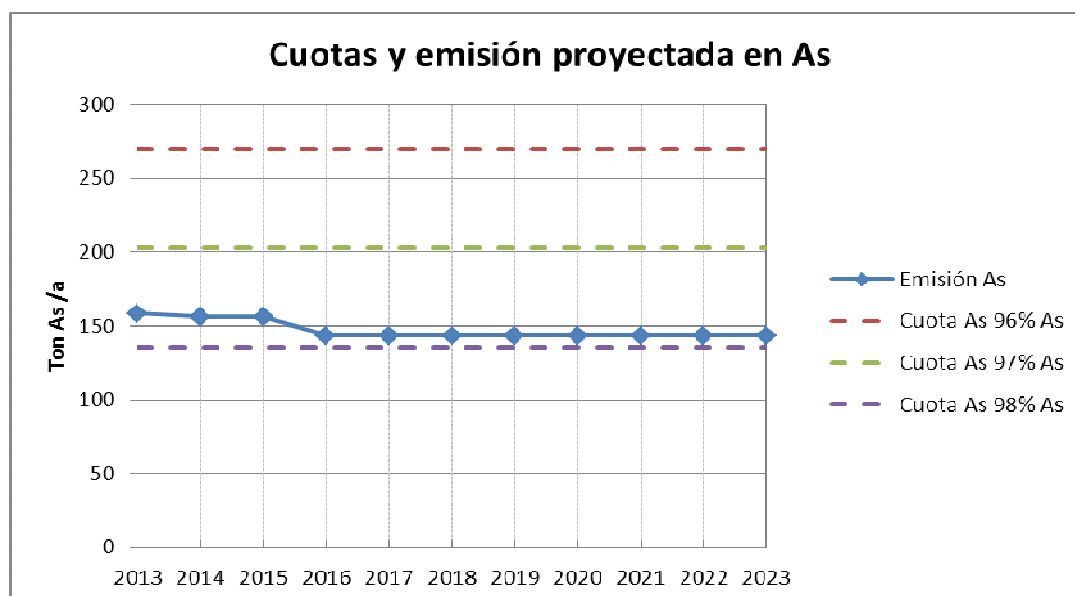




Gráfico 8.8.2.b Cuotas de Emisiones As Chuquicamata por escenario



Fuente Gráficos 8.8.2 a y b: Elaboración propia.

Del gráfico anterior es posible inferir que por los niveles de procesamiento de la Fundición Chuquicamata, ésta superaría los niveles de Arsénico proyectados, en base al criterio común a establecer por la autoridad, como se indica a continuación:

Tabla 8.8.2 Cuotas máximas de emisión a evaluar Chuquicamata caso optimizado.

Cuotas máximas de emisión a evaluar						
Instalación	SO <sub>2</sub> (t/a) 95%	As (t/a) 96%	SO <sub>2</sub> (t/a) 96%	As (t/a) 97%	SO <sub>2</sub> (t/a) 97%	As (t/a) 98%
Chuquicamata	38.861	270	31.089	203	23.316	135

Fuente: Elaborado según lo establecido por el MMA.

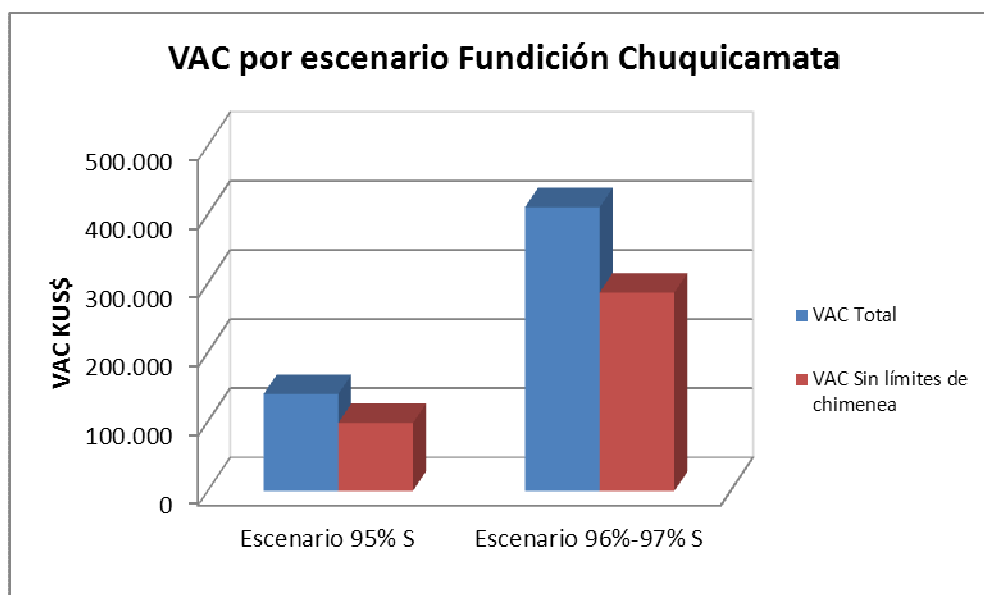
### 8.8.3 Determinación de VAC y CAE

La determinación en un período de 25 años del valor actualizado de costos (VAC) para la Fundición Chuquicamata, considerando una tasa social de descuento de 6%, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes VAC, valorizados como escenarios acumulativos:

- Escenario de 95% Fijación S, VAC total de 140,5 MUS\$, de los cuales 41,8 MUS\$ corresponden a soluciones para control de límites en chimenea.
- Escenario de 96%-97% Fijación S, VAC de 411,1 MUS\$ de los cuales 123,7 MUS\$ corresponden a soluciones para el control de límites en chimenea.

Se destaca también que las cifras entregadas no incluyen, las inversiones necesarias para el cambio de esquema tecnológico de potenciamiento de horno flash, y planta de flotación de escorias, como tampoco incluyen la pérdida de capacidad de fusión a nivel nacional.

Gráfico 8.8.3.a Valor Actualizado de Costos soluciones medioambientales  
Chuquicamata por escenario

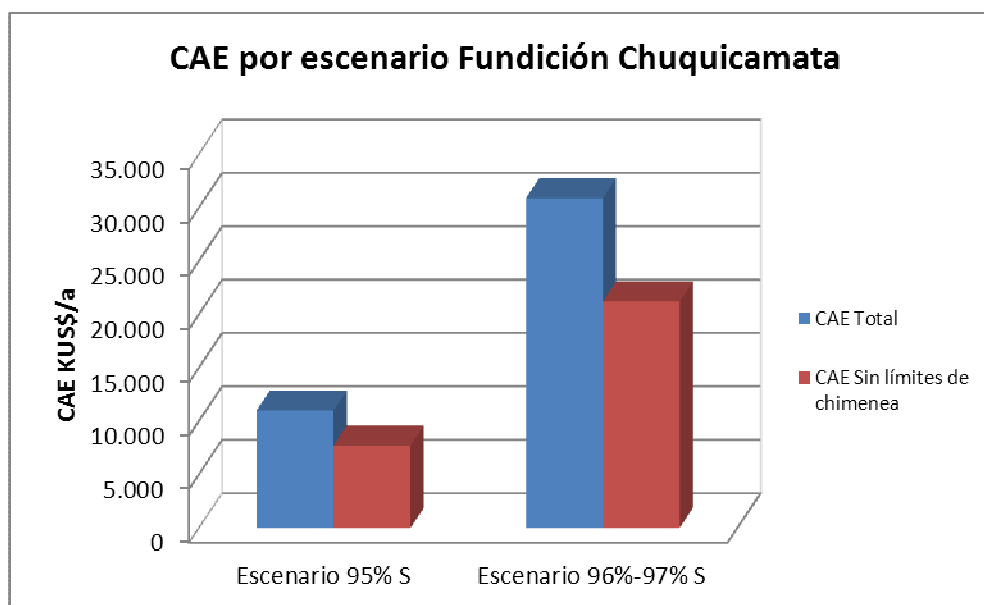


Fuente: Elaboración propia.

De igual modo la determinación del costo anual equivalente o valor en cuotas fijas anuales (CAE) para la Fundición Chuquicamata, considerando una tasa social de descuento de 6% en un período de operación dentro de los 25 años, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes CAE:

- Escenario de 95% Fijación S, CAE de 10.988 kUS\$/a
- Escenario de 96%-97% Fijación S, CAE de 30.891 kUS\$/a

Gráfico 8.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medioambientales  
Chuquicamata por escenario



Fuente: Elaboración propia.

#### 8.8.4 Relación Costo /Efectividad para el control de Emisiones de SO<sub>2</sub>.

Con los antecedentes entregados, para el cumplimiento de los escenarios de abatimiento de azufre proyectados, se requieren los siguientes recursos expresados como indicadores económicos y que llevan a los siguientes costos unitarios equivalentes por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida promedio en el periodo:

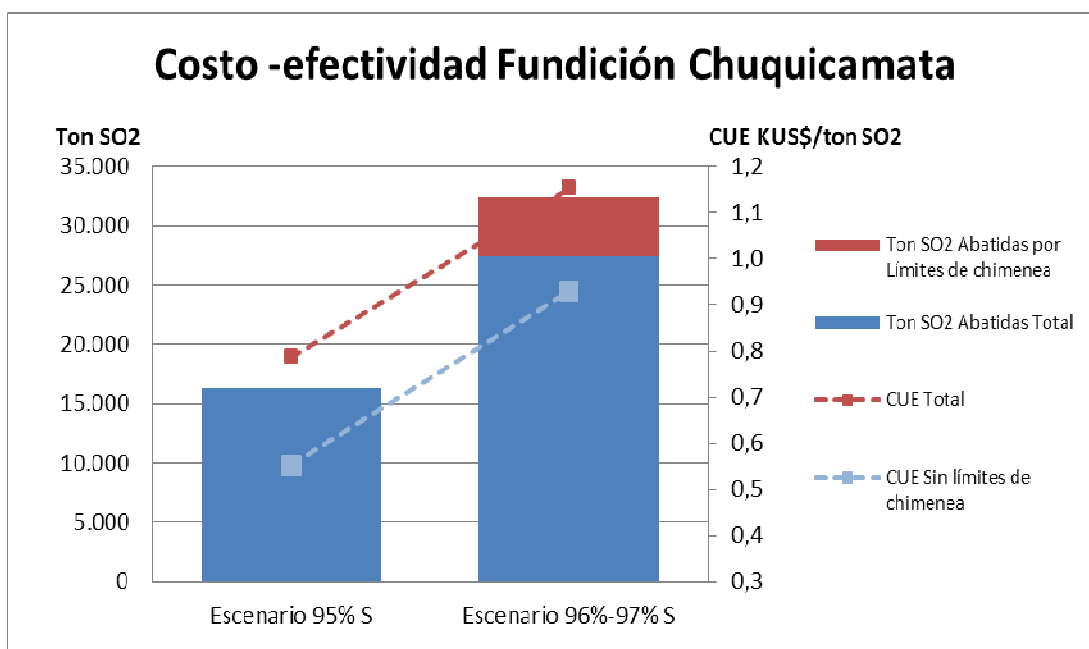
- **Escenario de 95% Fijación S, CUE de 0,8 kUS\$/ t SO<sub>2</sub>**
- **Escenario de 96%-97% Fijación S, CUE de 1,2 kUS\$/t SO<sub>2</sub>**

Tabla 8.8.4 Indicadores económicos por escenarios Fundición Chuquicamata

DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
	INVA	VAC	CAE	CUE
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
Escenario Captura 95% S	88.280	98.615	7.714	0,6
Reemplazo campanas primarias CPS	53.847	53.866	4.214	
Plantas de ácido doble absorción	34.432	60.244	4.713	
Producción de ácido sulfúrico	-	-15.495	-1.212	
Cumplimiento Límites en Chimenea				
Eliminación humos negros y opacímetro HA (Seis)	6.258	35.214	2.755	
Infraestructura monitoreo control	1.417	6.635	519	
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>7.674</b>	<b>41.849</b>	<b>3.274</b>	<b>-</b>
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>95.954</b>	<b>140.464</b>	<b>10.988</b>	<b>0,8</b>
Escenario Captura 96%-97% S				
Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	64.212	124.776	9.761	
Captura y Tratamiento gases sangrías FSF	33.176	63.945	3.734	
Cumplimiento Límites en Chimenea				
Tratamiento gases de cola PAS 275.400 Nm3/h	33.401	81.916	6.408	
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>41.076</b>	<b>123.765</b>	<b>9.682</b>	<b>2,4</b>
<b>Total Escenario Captura 96%-97% S</b>	<b>226.743</b>	<b>411.101</b>	<b>30.891</b>	<b>1,2</b>

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.8.4 Costo Unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida  
Chuquicamata



Fuente: Elaboración propia.

El escenario 95% S, considera solo algunos proyectos para el cumplimiento de límites en chimeneas, sin abatimiento significativo de SO<sub>2</sub>, incorporando soluciones para el control de humos negros en los hornos de ánodos, e infraestructura para monitoreo y control de emisiones por chimeneas, (estimación el 1% de la inversión relativa a medidas de control de límites y de nuevas plantas de abatimiento con descarga final de gases por chimeneas).

#### 8.8.5 Proyección de futuro para la Fundición Chuquicamata

La fundición Chuquicamata históricamente ha procesado un alto volumen de concentrados y con los mayores contenidos de As de Codelco, pero a través del cambio de línea de producción que generará con la detención del CT, el

potenciamiento del Horno Flash y fundamentalmente con la flotación de escorias, quedará con un mejor equipamiento para enfrentar las nuevas exigencias ambientales.

De hecho con la incorporación de los concentrados de la Mina Ministro Hales, la adecuación de la Fundición tiene como proyecto complementario una nueva área de tostación de concentrados y su línea de tratamiento de gases, que le permitirá des-arsenizar previamente los concentrados mas impuros (MMH) y alimentar a la fundición calcinas, junto a los concentrados más limpios, generando algo de flexibilidad para la fusión de concentrados de cobre más impuros.

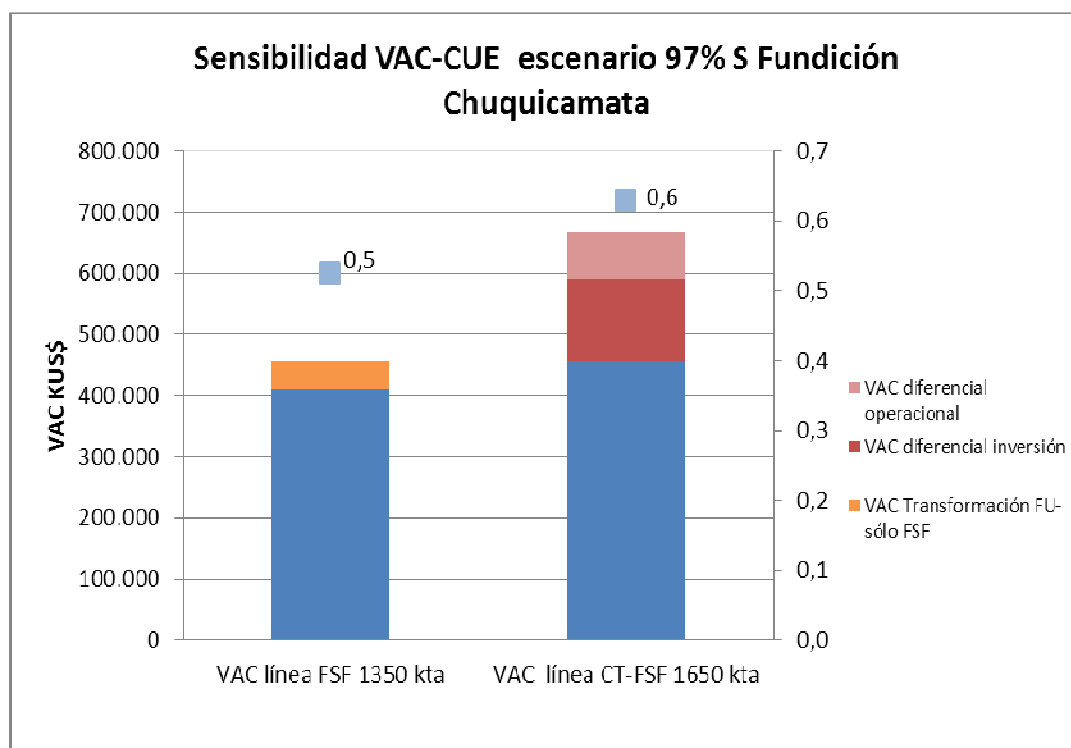
Esta situación sin embargo quedará acotada al cumplimiento de límites de cuotas de emisión de  $\text{SO}_2$  y As, meta difícil de lograr para el arsénico, aún con las soluciones a incorporar, requiriendo frente a concentrados sobre 0,5 % de As posiblemente una segunda unidad de tostación previa, para flexibilizar el tratamiento de concentrados normales, evaluados como el 70% de la carga.

#### 8.8.6 Sensibilidad de situación Fundición Chuquicamata en relación situación actual

Para valorizar en su integridad la situación de la Fundición Chuquicamata, frente a las soluciones de control ambiental, desde su situación actual base, se han incluido adicionalmente las inversiones asociadas al proyecto de transformación a una sola línea de fusión, incluyendo los costos de desvinculación de personal, los que se comparan con los proyectos de reducción, que le permitirían lograr comparativamente el 96%-97% de abatimiento de  $\text{SO}_2$ , manteniendo su actual capacidad de fusión de concentrados de 1.650 kta., situación que requiere 135 MUS\$ adicionales de inversión según lo indicado por Codelco y estimativamente 77 MUS\$ adicionales de VAC operacional determinados por el Consultor.

Bajo tal condición el valor actualizado de costos total con el caso Optimización analizado alcanzaría a 450 MUS\$, frente al necesario para mantener el esquema operación con 2 líneas de fusión equivalente a 662 MUS\$, análisis que no valoriza la pérdida de capacidad de fusión, analizable en función de la disponibilidad de concentrados.

Gráfico 8.8.6 Costo para alcanzar escenario 96-97% S Fundición Chuquicamata



Fuente: Elaboración propia.



---

## **9. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CALETONES**

### **9.1 General**

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Estimar los costos de inversión y costos incrementales de operación de la fundición Caletones, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento, producto de las soluciones a implementar, y los plazos de proyectos necesarios.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento 6%).
- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad nominal de procesamiento de concentrados para las instalaciones, en base lo registrado el año 2010, vale decir considerar, que lo que cada faena puede procesar, se mantiene inalterada respecto del año base seleccionada, del cual se ha recabado información de mayor detalle y calidad.

Lo anterior con el fin de establecer el impacto de cada medida de reducción de emisiones en el costo marginal de procesamiento de concentrado, mediante la implementación de sistemas de control y seguimiento.

Por lo tanto el escenario base para la fundición Caletones considera una capacidad de fusión nominal anual de 1.372 kt/año de concentrados de cobre, generados en la Mina el Teniente, con un contenido promedio de azufre de 32,41 % y 0,167 % de Arsénico para el quinquenio 2012-2016.

## 9.2 Descripción General de la Fundición

Esta instalación esta ubicada en la Cordillera de los Andes, sexta región a 1.550 metros sobre el nivel del mar, en una explanada de limitado espacio, por lo que dispone sus escorias finales a alrededor de 5 km de Caletones. La población más cercana la constituye el poblado de Coya distante alrededor de 20 km, y a una cota de alrededor de 600 m sobre el nivel del mar.

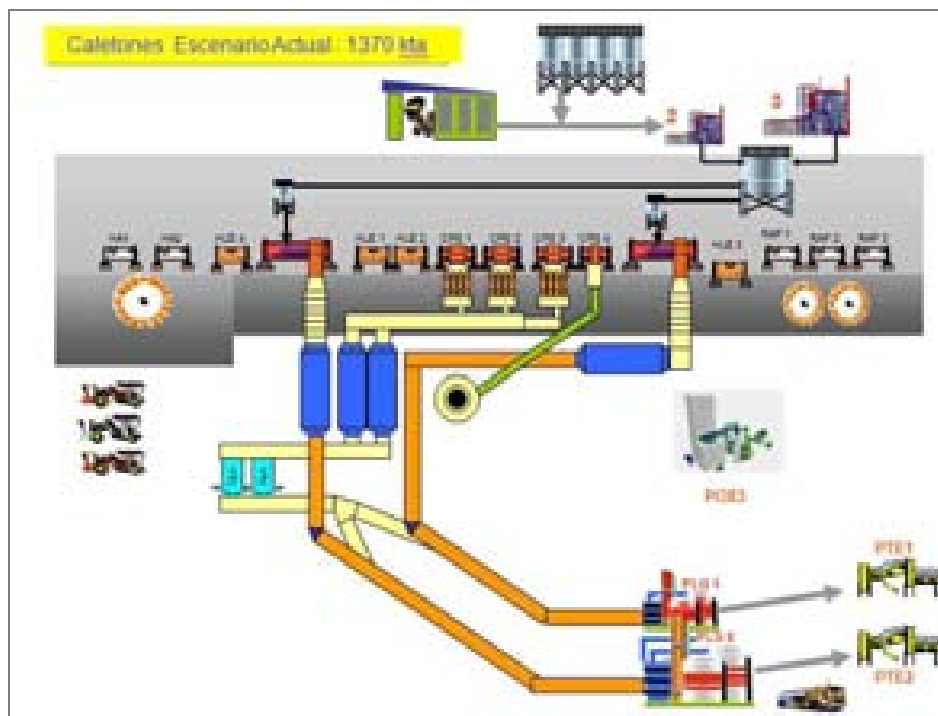
La fundición Caletones inició sus actividades el año 1922 como una fundición integrada al complejo el Teniente y a la fecha ha pasado por sucesivos cambios tecnológicos, que derivan en su configuración actual constituida por:

- Recepción en línea, sobre correa transportadora y tolvas 3.000, de concentrado húmedo con 9% humedad, desde el área concentración de Caletones.
- 2 Secadores de lecho fluidizado, para el secado de concentrados hasta 0,2% humedad, con 210 t/h de capacidad total. Existe una tercera planta en operación durante períodos de mantenimiento. Cada planta esta equipada con separación sólido-gas, mediante filtros de manga, descarga y transporte neumático del concentrado “seco” hacia los CT.
- 2 Convertidores Teniente, como unidades de fusión que operan con 100% inyección de concentrados, fundiendo en promedio 2.150 t/d por unidad.

- 4 Convertidores Peirce Smith, tres de 4,65m  $\Phi$  \* 10,67 m L y uno de menor tamaño, 3,96 m  $\Phi$  \* 10,67 m L, actualmente no conectado al sistema general de manejo gases, evacuación de gases por chimenea auxiliar.
- 2 Plantas de limpieza y producción de ácido sulfúrico de 172 y 280 kNm<sup>3</sup>/hr, con 8 - 8,7% SO<sub>2</sub>, en operación desde los años 1998 y 2001 respectivamente, ambas como parte del Plan de Descontaminación de Caletones.
- 4 Hornos de limpieza de escorias (HLE) de tipo basculantes, con evacuación de gases por chimeneas independientes.
- 5 Hornos de Refino basculantes, con chimeneas independientes de evacuación de gases y sistema de moldeo de ánodos y RAF.

Adicionalmente la planta cuenta para sus procesos con una planta de aire, 2 plantas de oxígeno de 1.200 t/d, planta de chancado y manejo de circulantes, redes de servicio de agua industrial, circuitos de agua de enfriamiento primarios y secundarios, red de agua potable, energía eléctrica, patios de manejo y almacenamiento de productos, así como plataformas de despacho.

Figura 9.2 Diagrama operacional Fundición Caletones



Fuente: Base de datos Consultor-Caletones.

Dentro de los proyectos relevantes realizados las últimas décadas en Caletones se destacan:

El levantamiento de la Nave convertidores en 4,5 m realizado el año 1985, (con una detención de 45 días) para permitir la posterior instalación de los Convertidores Teniente de 5 m de diámetro, los años 1987 y 1989 respectivamente, considerando el diseño del sistema de gases primarios de cada CT en base cámara de enfriamiento evaporativo, un precipitador electrostático (Joy) y evacuación de gases a una chimenea centralizada de 500 pie de altura.

Posteriormente con la instalación de la primera planta de ácido, se incluyó el tendido de un ducto de 2,5 m de diámetro y alrededor de 500 m de longitud, para transportar los gases de 1 CT hacia la planta de lavado y limpieza de gases nominada PLG1 de 172 Nm<sup>3</sup>/h ubicada a menor cota en Caletones, que como parte del Plan de Descontaminación entró en operaciones el año 1998.

El año 2001 se concretó la instalación de nuevas campanas primarias y un sistema de enfriadores radiativos en 3 CPS, nuevos precipitadores Joy y 2 ventiladores de tiro inducido intermedios, ductos de empalme a la línea de gases del CT con conexión a un nuevo ducto de 3 m de diámetro para la alimentación a la PLG 2 de 280.000 Nm<sup>3</sup>/h de gas que inició operaciones el año 2002, para tratar los gases de 1 CT y 2 CPS en soplado.

Durante el año 2003 se consolidó el proyecto Aumento Capacidad de Fundición, (PDT), que limitado por el sistema de manejo y tratamiento de gases, dotó básicamente de mayor capacidad de secado, oxígeno, transporte neumático de concentrados para aumentar la capacidad de fusión de 1.250 a 1.330 kta, adecuándola a un mayor nivel de generación de concentrados del complejo mina–concentradora.

Posteriormente durante el año 2009 se concretó el proyecto Restitución de capacidad de la PLG1, que superó problemas en su soplador principal y otros, producto de su operación durante 12 años. La RCA del proyecto Restitución Capacidad Diseño Planta Limpieza de Gases N°1 – a través de la RCA 111/2005- de 21-09-2009 Ord. 000824 del 21 de Agosto de 2009, CONAMA Región de O'Higgins, llegó a concordar cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> de esta instalación para el periodo 2010-2014, acotadas a 100 kta.

Con respecto al contaminante arsénico la normativa establece un límite máximo anual de emisión de 375 t/a, conforme al decreto DS N°165 de 1998.

En los últimos años la Fundición Caletones ha postulando y desarrollado una serie de estudios para proyectos que se encuentran en estados de pre-inversión e inversión, tal como se indica a continuación:

Tabla 9.2 Proyectos en Estudio Fundición Caletones

Proyecto	Etapas
Reemplazo Casco CPS N°4	Ejecución al 2013
Mejoramiento Sistema de Manejo de Gases – Convertidores Teniente (CT's)	Factibilidad
Adecuación Plantas Tratamiento de Efluentes	Factibilidad
Optimización Sistema de Secado Fluo-sólido	Pre-factibilidad

Nota: Proyectos en Desarrollo - Continuidad Operacional

Fuente: Base de datos del consultor-Caletones.

### 9.2.1 Descripción de la Planta

La fundición está compuesta por los siguientes equipos principales

Recepción de concentrados : Sobre correa 212, Tolvas 3.000, canchas (100% concentrados Teniente).

Secado : 2 secadores Fluo-sólido Fuller (80 t/h), Metso (120 t/h).

Horno de fusión : 2 Convertidores Teniente (5,0 m x 22 m).

---

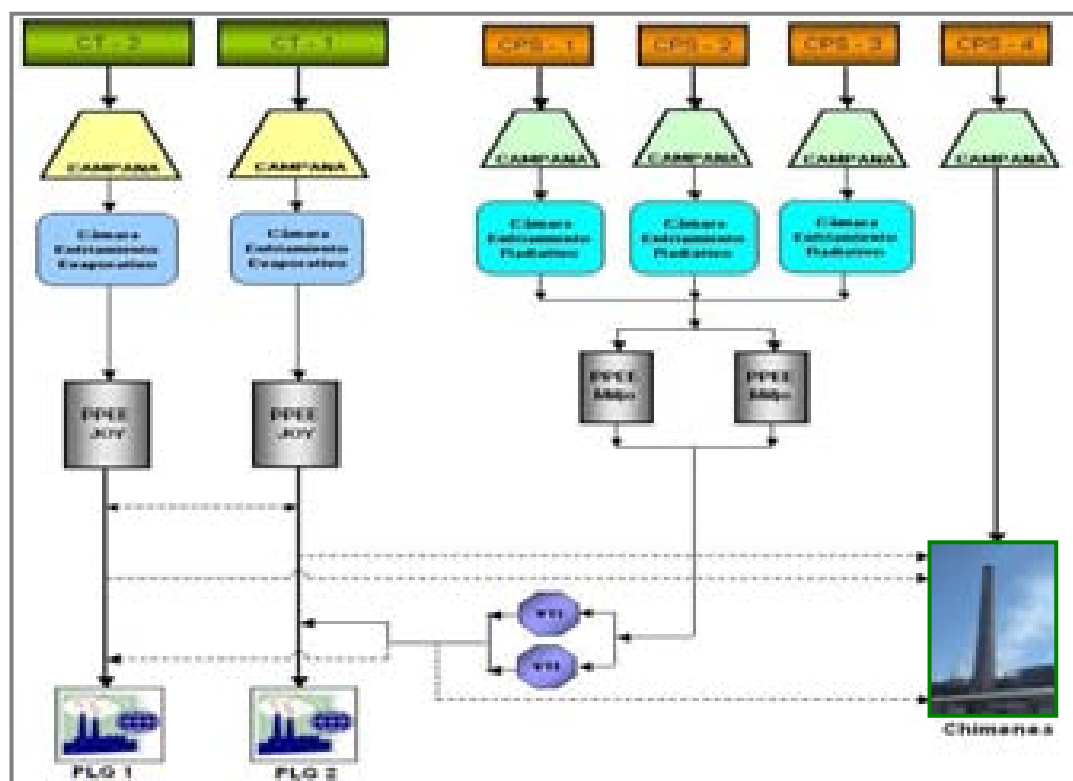
Limpieza de escoria	: 4 hornos basculantes limpieza escoria Teniente (4,6 m $\Phi$ * 12,7 y 10 m L)
Convertidores	: 4 Peirce-Smith (tres de 4,6 m $\Phi$ x 10,6 m y 1 de (4,0m $\Phi$ x 10,7mL).
Hornos de Ánodos	: 5 basculantes (4,0 m $\Phi$ x 11,7 m), dos ánodos, tres RAF.
Ruedas de Moldeo	: 1 ruedas OK (80 t/h)- ánodos 280-400 kg, 2 carruseles RAF
Plantas de oxígeno	: 2 Air Liquide (800 t/d y 400 t/d)
Plantas de ácido	: 2 Plantas simple contacto (3500 t/d) Mitsubishi y Kvaerner.
Otros	: 2 Planta de neutralización ácido débil con cal, oxidación, calcinación.
Dimensiones nave	: 350 m *19 m *25 m, con 4 puentes grúa de 100/50

### 9.2.2 Descripción del Sistema de Manejo y Limpieza de Gases

La fundición Caletones dispone de un sistema de manejo y limpieza de gases primarios para el tratamiento de 452.000 Nm<sup>3</sup>/h, en 2 plantas de ácido sulfúrico de simple contacto de 172.000 y 280.000 Nm<sup>3</sup>/h para 8,7% y 8% SO<sub>2</sub>, respectivamente.

La configuración del sistema esta diseñada para el tratamiento permanente de los gases de soplado de los dos CT y 2 CPS, pero no permite el tratamiento de gases del CPS. N°4, unidad que durante los días que requiere operar (110 d/a), tiene evacuación directa por chimenea, reduciendo la tasa de captura y fijación de S, según de muestra en el esquema siguiente.

Figura 9.2.2 Esquema Simplificado Sistema Manejo Gases Primarios Fundición Caletones.



Fuente: Base de datos del Consultor-Caletones.

El crecimiento progresivo y asincrónico en el tiempo, ya antes indicado de este sistema, genera debilidades para el control de tiraje y por ende la captura de gases primarios, caracterizado por:

- La ausencia de un ventilador dedicado para cada Convertidor Teniente (VTI), fuente principal de generación de  $\text{SO}_2$ , que evacua sus gases por tiraje inducido desde la Planta de ácido N°1 para el CT2 y para el CT1 junto a los gases de CPS en la Planta de ácido N°2, incrementando la variabilidad del flujo.



- Campanas primarias en CT de diseño antiguo y que por alta dilución (110%-130%)<sup>26</sup> enfrían la corriente de gases de 113.000 Nm<sup>3</sup>/h-12,98% SO<sub>2</sub> a temperaturas cercanas a 600°C, gases que alimentan posteriormente en cada CT una cámara horizontal de enfriamiento evaporativo, que incorpora agua atomizada para bajar la temperatura de los gases a cerca de 390° C, generando un volumen adicional de agua a manejar de alrededor de 13.000 Nm<sup>3</sup>/h por unidad. Esta agua es extraída en la planta de lavado de gases que alimenta las plantas de efluentes y precipitación del arsénico, como arsenito-arseniato cálcico, generando la siguiente oxidación del arsenito y calcinación para estabilización. Ca<sub>3</sub> (AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>\*2 H<sub>2</sub>O. Desde las cámaras de enfriamiento los gases pasan a cada precipitador electrostático y mediante ductos de conexión hacia la planta de lavado de gases y posterior tratamiento hasta ácido sulfúrico. **El tiraje en estas unidades es regulado desde la Planta de ácido (soplador y control de dampers).**
- Campanas primarias refrigeradas por agua en 3 de los 4 CPS, que con 100% a 120% de dilución evacuan del orden de 75.500 Nm<sup>3</sup>/h-7,2% SO<sub>2</sub> promedio por unidad, conectadas a enfriadores radiativos, donde se reduce la temperatura del gas a cerca de 390°C, para pasar a precipitadores electrostáticos para la limpieza de polvos y Ventiladores Intermedios de Tiro inducido, (VTI) que además de regular el tiraje permiten la descarga de estos gases en el ducto de la PLG2, generando algunas perturbaciones en la operación del CT1, por la discontinuidad operativa del soplado de los CPS.
- Restringidos los espacios por la topografía del lugar para conexiones de ductos del manejo de gases, Precipitadores Electrostáticos, Ventiladores de tiro inducido, y plantas de Limpieza de Gases y producción de ácido, distantes

---

<sup>26</sup> Base de datos de proyectos del Consultor.

alrededor de 400 m de desde la descarga de gases limpios de polvos de los CT, que a su vez se encuentran bastante alejados por la longitud de la Nave Convertidores, según disposición de equipos existentes con el CT1 en el extremo centro Rancagua y el CT2 en el extremo Sewell.

- Recirculación de los polvos recuperados en cámaras de enfriamiento y extracción a procesamiento externo de los polvos recolectados en los Precipitadores Electrostáticos, de mayor contenido de As (~2.730 t/a), que se procesan vía hidrometalurgia, retornando el ripio con contenido de cobre a Fundición.

Lo anterior es particularmente importante para la búsqueda de soluciones de mejoramiento medioambiental, ya que necesariamente debe analizarse el sistema de manejo de gases como un conjunto, dado que las limitaciones de espacio, junto a deficiencias presentes en el sistema de manejo de gases (dificultades de control de tiraje, infiltraciones de aire, falta de capacidad de enfriamiento de gases, capacidad insuficiente de VTI o de captación de polvos y limitaciones por las PAS) pueden hacer ineficientes o no factibles medidas de mejoramiento, tales como campanas primarias de alto rendimiento y secundarias de captación de gases, en este último caso restringidas por la altura de la Nave y la operación de los puentes grúas.

Como sistemas secundarios de evacuación de gases, la Fundición Caletones presenta la operación de las plantas de secado Fluo-sólido (2 en operación con sus respectivas plantas de filtros de mangas), 4 Hornos basculantes de limpieza de escoria y 5 Hornos de refinación, todos con chimeneas de baja altura independientes, además de las chimeneas para la evacuación de gases de cola de Plantas de ácido de simple absorción, chimeneas que en este caso no estarían sometidas a Límites de Emisión por no haber centros poblacionales adyacentes.

La fundición Caletones con la configuración de equipos actuales, declaró una captura y Fijación de 88% de S, fundamentalmente por la falta de conexión del CP4 al sistema Manejo de Gases Primarios, de disponer de dos PAS de simple contacto y por la condición general de su sistema de gases, con deficiencias para la operación de los CT, procesando un total de gases para saturar en volumen las PLG (452.000 Nm<sup>3</sup>/h<sub>BS</sub>), que tienen una capacidad fija de conversión de 42.500 Nm<sup>3</sup>/h fino de SO<sub>2</sub>, en base seca.

### 9.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

#### 9.3.1 Emisión de Azufre y Arsénico

La distribución estimada de emisiones durante el año 2010, con 87,6% de fijación de S, presenta una diferencia menor respecto al valor inicialmente declarado de 88%, que se justifica al considerar la operación del CPS4 con evacuación de gases por chimenea. La diferencia es mayor contra los datos de emisión informados para el año 2010 (64.234 t/a de S y 201 t/a de As) que permite calcular una fijación de 85,4% de S. La distribución por fuentes de emisión, aplicada a la condición de mediano plazo se muestra a continuación:

Tabla 9.3.1 Emisiones de Azufre y Arsénico Fundición Caletones

Caletones	Med. Plazo	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	1.372.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,41
Ley Media As en concentrados (%)		0,167

Emisión por Fuentes t/a Fundición Caletones	Base Med. Plazo	
	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario CT (giro+campana)	12.744	59
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	4.261	18
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)+ CPS 4	22.826	6
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HLE	611	102
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d
Gases de cola PAS	11.492	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	488	25
Otras fuentes	2.632	1
Ajustes	-874	-3
<b>Total emisión t/a</b>	<b>54.180</b>	<b>208</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,19\%</math> S</b>	<b>87,8</b>	<b>90,9</b>

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes entregados por el MMA.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S.

### 9.3.2 Emisión de Mercurio

No existen antecedentes a futuro de procesamiento de concentrados con contenidos de Hg en esta instalación, aunque si existen registros en los concentrados del 2010.

En la Fundición Caletones la presencia de Hg habría sido detectada en el material precipitado en la planta de efluentes, residuo peligroso que Caletones finalmente dispone en Hidronor, a través del centro de procesamiento de RISES, a un costo significativo.

### 9.3.3 Emisión de material particulado

Las emisiones de material particulado de los procesos de secado, se controlan a través de la operación de los filtros de mangas asociados a las plantas, que fueron diseñados para asegurar una pérdida de “concentrado secado” inferior a 0,1%. El control es mediante mantención periódica, control de variaciones de presión e inspección visual incorporando la última planta en operación (PSFS3) sistemas de tipo modular compatibilizado, que facilitan el recambio de mangas.

Periódicamente se realizan mediciones isocinéticas de material particulado en la descarga de chimeneas. Se ha desarrollado ingeniería para el Potenciamiento de la PSLF N°2, que presenta limitaciones para la mantención de filtros.

Otras fuentes de emisión de material particulado, la constituyen los Hornos de Limpieza de escorias, en los que se inyecta carboncillo para el proceso de reducción, que genera más que material particulado, carbón incombusto (pet coke) y hollín (humos negros) durante la etapa de reducción, para lo cual estos hornos no cuentan con medidas de control.

En similar situación de emisiones de humos negros, se encuentran los hornos de refinado, que inyectan en el baño petróleo como reductor del oxígeno absorbido por el cobre blister en la primera etapa de oxidación del azufre residual.

Actualmente Caletones inyecta también carbonato de calcio y nitrato de sodio para aumentar la eliminación de arsénico y antimonio en las escorias, en el proceso de refinación para producir cobre refinado a fuego (RAF). En la etapa de reducción realiza un tratamiento de la eliminación de selenio y telurio, con agregado de carbón sobre el baño, con la generación de gases de alta temperatura y de humos coloreados por la presencia de seleniuro de sodio.

La producción de cobre refinado a Fuego como cobre RAF, será en breve discontinuada, en razón a condiciones comerciales, capacidad disponible de refinería, seguridad a las personas y fundamentalmente de control ambiental, ante la dificultad de generar un tratamiento de los gases para estos 3 hornos. Para tal fin se está adquiriendo una segunda rueda de moldeo de ánodos (dual) a instalar junto a los hornos de refino del sector Sewell, la que deberá estar operativa el 2013, llevando el 100% de la producción de Caletones a calidad y forma de ánodos (280 y 400 kg).

#### 9.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica

Se mantiene acá la arquitectura tecnológica de 2CT- 3 CPS-4 HLE, con equipos que basculan, uno en proceso de soplado continuo, otro discontinuo (proceso batch) y los HLE, con unidades semi-continuas de reducción y sedimentación. Los CT y los CPS disponen para la evacuación de gases de boca de una campana de gases, que no tiene un sello perfecto y por lo tanto genera emisión de contaminantes como SO<sub>2</sub>, As y otros contaminantes menores.

Para contrarrestar esta situación, en los ductos de gases de los CPS se dispone de ventiladores de tiro inducido (2 VTI), que por la succión producen una presión negativa dentro de la campana o tiraje entre 3 a 5 mm de agua, generando una

infiltración de aire externo hacia el interior de la campana (infiltraciones del orden de 110% a 120%).

En el caso de los CT, en esta Fundición el tiraje es generado directamente por los sopladores de las plantas de ácido sulfúrico y la actual infiltración de las campanas, a la fecha de alta data, entre 120 a 130%, presentando además perturbaciones en el tiraje por la operación de los CPS, que descargan sus gases en el ducto común del CT1 hacia la PLG2.

Se generan también emisiones en los CT, cuando la boca se desplaza fuera de la campana, para operaciones tales como el cambio de tobera de inyección, cambio de pasaje de sangría y apertura de toberas, y operaciones que aunque no frecuentes implican carga o descarga por boca de materiales calientes, que en general impiden superar el 95% promedio de soplado.

En el caso de los CPS, el proceso mismo implica varios giros para el carguío y descarga de materiales caliente y por ende la generación de gases a la atmósfera, especialmente durante el giro mismo que se realiza con la unidad de soplado para evitar la obstrucción de las toberas, situación válida para CT y CPS. En el caso de los CPS, aunque el carguío de metal caliente es por boca, la adición de carga fría chancada, es agregada a través de una compuerta lateral en la campana, situación que en Caletones se genera en los CPS N° 1 y 2, siendo en el resto de los CPS, adicionada por boca.

En operación normal, la PAS N° 2 al procesar los gases de CT1 y CPS, frente cualquier restricción o variación significativa del flujo de gases a procesar por perturbaciones dinámicas, genera emisiones de gases contaminantes (puff de gases en boca).

Los Convertidores Teniente de Caletones, no cuentan con sistema de captura de emisiones en las sangrías de metal de los CT, canales y ollas, tanto en el caso de hornos estáticos como el Flash.

En Caletones el sistema de manejo de gases se encuentra confinado a espacios estrechos de circulación de camiones para la extracción del cobre, que no facilitan trabajos de intervención mayor a los equipos como el reemplazo u overhaul de Precipitadores Electrostáticos, o la instalación de nuevos VTI asociados a la operación de los Convertidores Teniente.

#### 9.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables en el Control de Emisiones de Azufre y Arsénico

De la tabla de emisiones por fuentes considerada para el mediano plazo, podemos concluir que las emisiones relevantes se encuentran en:

- En los CPS, donde las emisiones relevantes se dan en las campanas y en los giros realizados para recibir las ollas de MB, la adición de carga fría, para el control de temperatura (CPS N°3 y 4) y los giros para descarga de blister. Especial fuente de emisiones a resolver, en la situación del CPS4, no conectado actualmente al sistema de enfriamiento y limpieza de gases, que evacúa sus gases directamente por chimenea auxiliar, cuando es requerida su operación por mantención de alguno de los 3 CPS, emitiendo alrededor de 5.700 t/a de S (durante 110 días por años).
- En los CT por presión puntual en las campanas, emisiones durante los giros y en las sangrías de MB.
- Los gases de cola de las Plantas de ácido, que en este caso son de simple contacto, con una eficiencia de conversión de 97,0%.



Las soluciones tecnológicas se han priorizado tomando en consideración criterios de cuantía en relación al monto de emisiones, la factibilidad de reemplazo de equipos con menores interferencias operativas y requerimientos de modificaciones de infraestructura.

En este sentido, la captación de los gases fugitivos por boca de CT y CPS, que requiere de campanas secundarias, será considerada como solución más tardía en razón de lograr un buen control del sistema primario, y a que la altura de la nave de fundición es relativamente limitada con una altura de 25 m. La posterior ingeniería deberá revisar la posibilidad de su instalación por sobre las campanas primarias, para la circulación de los puentes grúas.

Como mejoramientos del mediano plazo, existen estudios en los que se analizó la posible sustitución del sistema de enfriamiento evaporativo de los CT en su cámara de enfriamiento horizontal, por un sistema mixto con enfriadores radiantes<sup>27</sup>, que representa una holgura volumétrica para el tratamiento de gases en Planta de ácido de hasta 26.000 Nm<sup>3</sup>/hr, aprovechables para captura de SO<sub>2</sub>, con las adecuaciones necesarias en contacto y absorción o el reemplazo de esta cámara y la campana por un caldera recuperadora de calor, según estudio desechado por baja rentabilidad.

Como base de mejoramiento previo a soluciones de ingeniería, la Fundación Caletones durante el año 2011 y 2012 realiza acciones de mejoramiento operacional, para:

- Copar la capacidad de las plantas de limpieza de gases en Flujo y concentración

---

<sup>27</sup> Solución extraída de base de datos y experiencia del consultor

- Eliminar infiltraciones en los trenes de gases
- Lograr continuidad en la secuencia de soplado de los CPS

#### 9.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

Los proyectos a implementar para incrementar el nivel de fijación de Azufre y Arsénico por la Fundición Caletones en desarrollo y los previstos por el Consultor, se indican a continuación:

- Conexión CPS N°4 al tren de gases (Manejo Operacional)

Este proyecto a implementar el año 2013, posterior al reemplazo de casco del CPS 4, permitirá incorporar a esta unidad al tren de gases de los Convertidores Peirce Smith (3 unidades), con su campana, sistema de enfriamiento radiativo y sistema de recuperación de polvos.

Por el requerimiento de mantener siempre 3 unidades calientes, esta unidad debe operar durante los periodos en que una de las 3 unidades restantes se encuentra en mantención general, periodo estimado en 110 días al año, evitando así la generación de alrededor de 11.400 t/a de SO<sub>2</sub> evacuados a la atmósfera, a través de la chimenea auxiliar.

Este proyecto, más condiciones de un mejor manejo operacional comprometido por la fundición, permitirían operar con un nivel de fijación de S esperado cercano al 90% (44.470 t/a de S y por ende el doble de SO<sub>2</sub>), con una inversión reportada de 26.000 kUS\$, para este proyecto.

---

- Remplazo de Campanas Primaria CT y Ventiladores de Tiro Inducido (VTI)

El reemplazo de las campanas primarias por unidades de mayor eficiencia, es requerido para ambos CT, que como antes se indicó utilizan campanas con alta infiltración y más de 20 años en operación.

El reemplazo de campanas a realizar por línea de CT, idealmente durante las reparaciones generales de cada unidad, (21 días cada 18 meses) deberá incluir la revisión del sistema de enfriamiento, el overhaul del precipitador existente en cada unidad, la instalación de nuevos VTI para esta unidades, un nuevo trazado de conexión de gases del CT1 con CPS, con posible cámara de homologación de presiones y concentración, para el mejoramiento global del tiraje en estos equipos que constituyen el núcleo del proceso de tratamiento de concentrados de Caletones y tienen un alto potencial de incremento de fusión.

Detenciones para conexiones de mayor plazo que la reparación general, generan en el caso de Caletones, serios problemas de manejo de concentrados a ventas, por cuanto es una instalación que opera en línea, con mínimo inventario intermedio con la concentradora en un sistema just in time, situación que ha llevado anteriormente a postergar proyectos de reemplazo de equipos.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, (2014-2015) permitirían tener operativo el sistema a comienzos de 2016, en atención a que fundición Caletones tiene ya estudios conceptuales sobre el tema.

La inversión requerida para el reemplazo de campanas y acondicionamiento del sistema de manejo de gases de CT, como proyectos complementarios se estima en 47.200 kUS\$.

De acuerdo al potencial de reducción de emisiones de esta mejora por proyecto, se tendrá una disminución de emisiones de azufre de 1,2 %.

- Reemplazo de Campanas Primarias de CPS

El reemplazo de campanas de los CPS (3 unidades), y sus sistemas de refrigeración primarios y secundarios, permitirá reducir niveles de infiltración y emisiones por mejor control de tiraje. El proyecto puede realizarse entre el año 2015 y 2016 con una inversión estimada de 42.300 KUS\$, operando a mediados del 2016.

- Cambio de Plantas de ácido a Doble Absorción

Involucra readecuar el reactor de conversión de cada planta (PLG 1 y 2), usualmente en la salida del tercer lecho con un absorbedor intermedio, que recupera parte del  $\text{SO}_3$  como ácido, favoreciendo así la reacción de conversión en el último lecho, lo que permite incrementar la eficiencia de conversión hasta niveles de 99,2-99,5%. Se recomienda cambiar también catalizador del primer lecho del reactor (Cs) para operar con mayores concentraciones de  $\text{SO}_2$  y potenciar los sistemas de enfriamiento, e instalar sistemas de recuperación de calor como opción técnicamente más factible y conveniente.

Existe experiencia previa en la Corporación del Cobre para esta adaptación, realizada anteriormente en la Planta de Ventanas, con especialistas fabricantes

de planta de ácido por lo que el proyecto podría realizarse los años 2015 y primer semestre del 2016 durante las detenciones de cada planta.

La inversión requerida se estima en 51.700 KUS\$ y permitiría reducir las emisiones de Azufre en 1,9%

Con los proyectos anteriores a mediados del año 2016, la Fundición Caletones estaría en condiciones cercanas de alcanzar un 93,9% de fijación S +/- 0,19% de S y 92,4 % de As.

- Captación y tratamiento de gases fugitivos en boca CT y CPS, y sangrías CT (MB)

Para el control de emisiones fugitivas desde la boca de los CT y CPS, como solución tecnológica se plantea la instalación de campanas secundarias adosadas a las campanas primarias, las que deberán captar las emisiones asociadas también al giro de estas unidades.

Como condición mejorada de los ambientes de trabajo, el sistema de manejo de emisiones fugitivas también debiera considerar la instalación de campanas en las sangrías de metal de los CT. El diseño deberá considerar ventiladores de tiro inducido y una planta de lavado alcalino de los gases para un volumen estimado de 660.000 Nm<sup>3</sup>/hr. Un diseño preliminar de estas instalaciones, aunque con evacuación de gases por la antigua chimenea fue anteriormente desarrollado<sup>28</sup>, considerando el limitado espacio de Caletones para la instalación de equipos, que en este caso consideraron la incorporación de 5

---

<sup>28</sup> Ingeniería Conceptual proyecto Desarrollo del negocio Fundición y Manejo de gases fugitivos, Hatch Ingeniería, 2007.

VTI, en la ubicación de los antiguos precipitadores Koppers de evacuación de gases a la antigua chimenea.

Las inversiones asociadas a este proyecto a realizar el año 2016 y 2017, representan alrededor de 105.800 kUS\$, y permitirán reducir emisiones en alrededor de 1,7%.

Con los proyectos anteriores a comienzos del año 2018, la Fundición Caletones estaría en condiciones de cumplir un **escenario 95% de captura, con una fijación global de azufre de 95,6% +/- 0,19% de S y 93,3 % de As.**

- Remplazo Hornos de Limpieza de Escoria por planta de flotación

En la actualidad en Caletones existen 4 Hornos basculantes de tratamiento de escoria que utilizan la inyección de carbón pulverizado para la reducción de la magnetita contenida en las escorias de los Convertidores Teniente, componente que aumenta la viscosidad, desfavorece la separación metal escoria y facilita el atrapamiento de cobre sulfurado. Reducida la magnetita de escorias con un contenido de sílice adecuado, los hornos de tratamiento durante un tiempo sedimentan fases, extrayendo por boca las escorias más limpias, y con menor periodicidad el metal acumulado en el fondo, recargando el horno con nuevas ollas de escoria en un proceso semi-continuo.

Las escorias finales obtenidas con contenidos mayores a 1% son enviados a Colón para su procesamiento marginal por flotación, en razón a mejorar la recuperación metalúrgica de la instalación.

La reducción de escorias es un proceso endotérmico, que requiere uso de quemadores, y genera gases con contenido de material particulado, SO<sub>2</sub> y

arsénico, que son evacuados por chimeneas independientes. Desde la perspectiva ambiental es recomendable la eliminación de esta fuente emisora de difícil control y tratamiento por el proceso del enfriamiento, chancado, molienda y flotación de estas escorias, como en el caso de Altonorte, retornando a fusión el concentrado de escoria generado.

Bajo el objetivo de aumentar abatimiento de Azufre y principalmente Arsénico, con una fijación al menos en un 1% superior a la de azufre, el Consultor recomienda incorporar para la Fundición Caletones el reemplazo de los Hornos de Tratamiento de Escoria, por una Planta de Flotación de Escorias de CT, permitiendo una mayor fijación de As de 4,5% y de 0,8% de S según evaluación de esquemas operativos de fundición, desarrollado en el punto 3 de este informe.

Este proyecto permitiría utilizar las actuales instalaciones de enfriamiento de escoria final y transporte hasta el sector de la Nueva planta (Caballo Muerto o Barahona), lugar cercano al paso de la canal de relave, donde se mezclaría con los relaves primarios de complejo concentración, ya que representaría no mas del 4% de éstos.

La inversión estimada para esta planta de 80.000 kUS\$, escalados por capacidad de un estudio referencial desarrollado por el Consultor, en que analizó esta opción<sup>29</sup>. Aunque se han determinado los requerimientos de energía eléctrica y agua para esta opción, no se incluyen costos incrementales de operación, ya que estos serían levemente inferiores a los actuales de los Hornos de Limpieza de Escoria, de alrededor de 14 US\$/t escoria al año 2008, con la ventaja de una mayor recuperación de cobre.

---

<sup>29</sup> Base de datos de proyectos del Consultor

Sobre los anteriores, el último proyecto a realizarse entre los años 2017 y 2018, permitirían alcanzar en Caletones al año 2019, **el escenario de 96% de captura con una fijación de 96,4 +/- 0,19 % de Azufre y 97,8% de arsénico.**

El efecto por proyecto de reducción de emisiones, calculado en bases a las fuentes detectadas y las eficiencias asignadas e indicadas en el capítulo 5. (Ej.: 85% abatimiento de S y As en planta de lavado alcalino) se indica en la siguiente tabla:

Tabla 9.5.1 Proyectos de Reducción Emisiones Fundición Caletones

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Caletones</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Manejo operacional	0,8	0,3	6.958	8
Conexión CPS 4	1,3	0,1	11.490	2
Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	1,2	1,1	10.601	25
Reemplazo campanas CPS	1,0	0,1	8.799	1
Plantas de ácido doble absorción	1,9	-	16.502	-
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT	0,6	0,5	5.363	12
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	0,7	0,2	6.640	4
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	0,4	0,3	3.207	7
<b>Escenario 96% S</b>				
Planta de flotación de escorias /reemplazo HLE	0,8	4,5	6.842	104

Fuente: Elaboración propia.

## 9.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con las mejoras indicadas en los puntos anteriores se obtienen las siguientes distribuciones de emisiones residuales por fuentes, expresadas en toneladas.



**Tabla 9.6 Emisiones según Captura-Fijación de Azufre y Arsénico por escenario  
Fundición Caletones**

<b>Caletones</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	1.372.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,41
Ley Media As en concentrados (%)		0,167

<b>Emisión por Fuentes t/a</b> <b>Fundición Caletones</b>	<b>Base Med. Plazo</b>		<b>Escenario de 95% S</b>		<b>Escenario de 96% S</b>	
	<b>Azufre</b>	<b>Arsénico</b>	<b>Azufre</b>	<b>Arsénico</b>	<b>Azufre</b>	<b>Arsénico</b>
Fugitivo primario CT (giro+campana)	12.744	59				
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d	3.232	15	3.232	15
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	4.261	18	2.657	12	2.657	12
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)+ CPS 4	22.826	6				
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	7.411	2	7.411	2
Chimenea y sangrías HLE	611	102	611	102		
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d	n/d	n/d	31	1
Gases de cola PAS	11.492	0	3.241	0	3.241	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Refino HA	488	25	488	25	488	25
Otras fuentes	2.632	1	2.632	1	2.632	1
Ajustes	-874	-3	-874	-3	-3.715	-5
<b>Total emisión t/a</b>	<b>54.180</b>	<b>208</b>	<b>19.400</b>	<b>153</b>	<b>15.979</b>	<b>49</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,19\%</math> S</b>	<b>87,8</b>	<b>90,9</b>	<b>95,6</b>	<b>93,3</b>	<b>96,4</b>	<b>97,8</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	34.780	55	3.421	104
Toneladas de ácido incremental (t/a)			84.921		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

En la sección de ajustes de la tabla 9.6 para el escenario de 96% S se incluye adicionalmente un ajuste por circuito de flotación de escorias debido a que existe una menor recirculación de azufre y arsénico en el proceso. En la flotación de escorias una parte del azufre y en mayor proporción de arsénico son descartados en los relaves.

Para fundición Caletones no se ha incorporado proyectos para el control de emisiones por límites en chimeneas, por la disposición de esta instalación alejada de centros poblados.

### 9.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Para poder dar cumplimiento a los escenarios definidos y desarrollar las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As se considera el siguiente cronograma:

Tabla 9.6.1 Cronograma de cumplimiento de Escenarios

CRONOGRAMA DE PROYECTOS PARA CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION CALETONES						
PROYECTOS PARA DESCONTAMINACION	AÑO					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub>	87,8%	89,9%		93,9%	95,6%	96,4%
Conexión CPS N°4 a Tren de gases CPS (Manejo operacional)	xxxxxxxxxx					
Reemplazo Campanas Primarias 2 CT y Nuevos VTI		xxxxxxx	xxxxxx			
Reemplazo Campanas Primarias CPS (3 unidades )			xxxxxx	xxxxxx		
Doble Absorción en PLG1 y PLG2			xxxxxx	xxxxxx		
Captación y Neutralización Gases Secundarios CT y CPS, y sangrías CT (MB)				xxxxxxx	xxxxxxxxxx	
Reemplazo Hornos Tratamiento Escoria por Planta de Flotación					xxxxxxx	xxxxxxxxxx

Fuente: Elaboración propia.

De este cronograma se puede inferir que el 94% de fijación de Azufre, es factible alcanzarlo como fecha más temprana a mediados del año 2016, en razón a que se realiza primero el mejoramiento de los sistemas de manejo de gases primarios y posteriormente la transformación de las plantas de ácido a doble contacto, proyecto que implica intervenir ambas plantas, que realizan su mantención general cada 18 meses, reparando a menos una por año.

El escenario de 95% para Caletones es posible de lograr a fines del año 2017 con el tratamiento total de gases fugitivos por boca de CT y CPS, y sangrías del CT.

Como opción final una fijación de 96,4% al eliminar la operación de los HLE y flotar la totalidad de las escorias de los CT.

#### 9.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Mediano y Largo Plazo

La situación de sustentabilidad ambiental de Caletones, dependerá además de las prácticas operacionales de Manejo de gases principalmente de la oportuna y exitosa realización de los proyectos planteados y del fiel cumplimiento de sus programas de reemplazo de equipos, situación que por razones técnico económicas ha postergado en frecuentes ocasiones, como es el caso del reemplazo de campanas de CT en operación por mas de 25 años, el reemplazo u overhaul de precipitadores electrostáticos y soluciones al trazado general de manejo de gases primarios en análisis desde el año 2004.

Por otra parte esta instalación tiene el potencial cierto de aumentar niveles de fusión en los Convertidores Teniente desde los 2.100 t/d de concentrados por unidad a niveles promedios de 2.400 t/d, que le permitirían enfrentar mayores niveles de producción del complejo mina-concentradora, actualmente en análisis, lo cual debe ser una perspectiva para el diseño de los sistemas de captura o tratamiento a reemplazar o incorporar, ya que como equipos de procesamiento metalúrgico utilizarían los actuales CT potenciados.

Los equipos de captura y abatimiento entonces, deben lograr eficiencias mayores a las consideradas (eficiencia de campanas primarias CT 98,5 % y 98% para CPS, eficiencias de campanas secundarias CT de 98,5% y 80% para CPS, eficiencia planta de tratamiento 85%, entre otros), para absorber con un mayor nivel de fijación el cumplimiento de cuotas de emisión.

### 9.6.3 Análisis sobre Infraestructura, Espacios Disponibles e Interferencias

En general los trabajos de conexión o reemplazo de equipos asociados a los proyectos para la Fundición Caletones, están acotados por los periodos de reparación generales de los CT y PLG cada 18 meses, donde una línea de fusión y tratamiento de gases se detiene por alrededor de 21 días, con la detención de una planta de ácido junto a la detención de un CT, oportunidad en que la instalación ajusta su capacidad de tratamiento a alrededor del 60% de su tratamiento diario, programando en forma paralela con intervenciones en el área mina-concentradora, para reducir excedentes de concentrados a ventas.

Para enfrentar el procesamiento de los gases fugitivos que se captarían desde las campanas de los CT, CPS y sangrías de MB se dispone de limitado espacio para instalación de los VTI, en el lugar en que se encontraba a los antiguos precipitadores electrostáticos de los hornos de reverbero, ubicado en el sector norte de la Fundición. Adyacente aunque en un nivel superior se encuentra las instalaciones de la antigua planta de ácido, donde podría ubicarse la planta de neutralización de gases, evacuando finalmente los gases por la antigua chimenea.

La opción de eliminación de los Hornos de Limpieza de Escoria (4 unidades), para el tratamiento de escorias vía Flotación, deberá analizar en profundidad la ingeniería, para la modificación mayor del piso nave de Convertidores en los sectores de sangrías de escoria requeridas para la recepción de ésta, mediante los camiones Krebs utilizados hoy para la recepción y transporte de escorias finales de descarte, que cuentan con una ruta bajo nivel al interior de la nave adyacente al CT2. La realización de estos trabajos es usualmente de alta interferencia operativa, al igual que los de reemplazo de campanas que tienen que realizar trabajos en altura al interior de la nave, durante periodos estrechos de mantención

y también modificaciones externas en los circuitos primarios y secundarios de agua de refrigeración.

Otra área de alta complejidad por limitaciones de espacio la constituye el sector de las plantas de ácido adyacentes a los reactores de conversión, donde se debería instalar la nueva torre de absorción intermedia para cada planta.

## 9.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 9.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/- 30%, las inversiones y recursos pre-inversionales (7% de la inversión) requeridos por escenario para la Fundición Caletones, alcanzan por escenario:

- Escenario 95% fijación de S con 292,1 MUS\$.
- Escenario 96% fijación de S y 97% en As con 377,7 MUS\$.

Tabla 9.7.1.a Costos de capital por escenario y proyectos Fundición Caletones

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub Total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Manejo Operacional	0	0	0	No aplica
1.2	Conexión CPS 4	26.000	1.820	27.820	20 años
1.3	Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	47.200	3.304	50.504	15 años
1.4	Reemplazo campanas CPS	42.300	2.961	45.261	15 años
1.5	Plantas de ácido doble absorción	51.700	3.619	55.319	18 años
1.6	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	46.000	3.220	49.220	20 años
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	36.800	2.576	39.376	20 años
	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	23.000	1.610	24.610	20 años
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>273.000</b>	<b>19.110</b>	<b>292.110</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>				
2.1	Planta de flotación de escorias	80.000	5.600	85.600	20 años
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>353.000</b>	<b>24.710</b>	<b>377.710</b>	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación la tabla 9.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 9.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Caletones

COSTOS DE INVERSIÓN		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8
ITEM	DESCRIPCIÓN	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>									
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>								
1.1	Manejo Operacional	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Conexión CPS 4	0	1.820	26.000	0	0	0	0	0
1.3	Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	0	0	3.304	23.600	23.600	0	0	0
1.4	Reemplazo camapanas CPS	0	0	0	2.961	28.200	14.100	0	0
1.5	Plantas de ácido doble absorción	0	0	1.810	1.810	32.027	19.673	0	0
1.6	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	0	0	0	2.147	1.073	15.333	30.667	0
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	0	0	0	1.717	859	12.267	24.533	0
	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	0	0	0	1.073	537	7.667	15.333	0
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>0</b>	<b>1.820</b>	<b>31.114</b>	<b>33.308</b>	<b>86.295</b>	<b>69.040</b>	<b>70.533</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>								
2.1	Planta de flotación de escorias	0	0	0	0	2.800	2.800	40.000	40.000
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>0</b>	<b>1.820</b>	<b>31.114</b>	<b>33.308</b>	<b>89.095</b>	<b>71.840</b>	<b>110.533</b>	<b>40.000</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 9.7.2 Costos incrementales de operación

Se han determinado los costos incrementales de operación, asociados a las naturalezas de gastos relevantes, relacionadas con las medidas de control de emisiones, que considera el incremental de recursos energéticos asociados a los nuevos sistemas de manejo de gases (VTI intermedios de CT, nuevos VTI para manejo de gases fugitivos y planta de lavado de gases, entre otros), los costos de mantención asociados a las nuevas unidades, el personal y los reactivos necesarios para el acomplejamiento de Azufre y Arsénico como yeso impuro en la planta de tratamiento de gases fugitivos, producto final que como tal ha incluido un costo de disposición.

Para la disposición de residuos sólidos, en el caso específico de la Fundición Caletones, se ha valorizado la disposición de estos materiales a una tarifa de 300 US\$/t.

La mayor captura de Azufre en Caletones llevaría a una mayor producción de ácido sulfúrico en el primer escalón, equivalente a 65.823 t/a de ácido, cuya venta se ha incorporado como un crédito a los costos, a un ingreso marginal de 20 US\$/t, considerando su venta final en Mejillones a un precio de LP de 65 US\$/t y la distancia a puerto y Mejillones de esta Fundición.

No se han incorporado en este caso inversiones, como tampoco costos de operación asociados a monitoreo y control de emisiones por chimenea, que al menos las plantas de ácido sulfúrico deben mantener operativos o instalar, como prevención al medio ambiente laboral, debiendo esta instalación sus estaciones de monitoreo y registro de impacto en las zonas aledañas.

Tabla 9.7.2 Costos incrementales de operación por escenario Fundición Caletones

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS INCREMENTALES					
		COSTO INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenimiento	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
		KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	SO <sub>2</sub>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>						
1.1	Manejo Operacional	0	-	-	-	-	6.958
1.2	Conexión CPS 4	11	11	0	0	-	11.490
1.3	Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	336	335	2	0	-	10.601
1.4	Reemplazo campanas CPS	2	0	2	0	-	8.799
1.5	Plantas de ácido doble absorción	3.750	2.582	0	1.168	-	16.502
-	Producción de ácido sulfúrico	-1.698	-	-1.698	-	-	-
1.6	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	8.326	1.318	1.329	1.329	4.350	5.363
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	8.581	1.055	1.063	1.063	5.400	6.640
	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	4.598	659	665	665	2.610	3.207
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>23.907</b>	<b>5.960</b>	<b>1.362</b>	<b>4.225</b>	<b>12.360</b>	<b>69.560</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>						
2.1	Planta de flotación de escorias	No Considera	No Considera	No Considera	No Considera	No Considera	6.842
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>23.907</b>	<b>5.960</b>	<b>1.362</b>	<b>4.225</b>	<b>12.360</b>	<b>76.402</b>

Fuente: Elaboración propia.



### 9.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

El consumo adicional de energía eléctrica, para lograr el cumplimiento de reducción de emisiones en estudio, se verá incrementado significativamente por los volúmenes de los gases a procesar, estimados considerando un estándar de 3.300 KWH por cada 100.000 Nm<sup>3</sup>/h en los sistemas de manejo como los VTI y de 5.200 KWH por igual base, al estar enclavados a una torre lavadora.

El costo promedio usado para el mediano plazo para la energía eléctrica alcanza a 84,5 US\$/MWH.

Las medidas de control planteadas como proyectos, llevan a determinar un consumo incremental anual de 70,5 GWH/año, para lograr el escenario de fijación de azufre de 95%, situación significativa frente el actual consumo de Caletones cercano a 405 GWH/año.

Para el escenario de 96% este incremento se hace más significativo, con 122,5 GWH/a, en este último considera los equipos asociados al chancado y molienda de la planta de flotación, que probablemente no estaría instalada en el mismo Caletones, sino más cercana al sector Barahona, por la cercanía a la canal centralizada de relaves.

Tabla 9.7.3 Consumo incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía	Consumo incremental de agua
Fundición Caletones	Año	MW/h/a	m3/a
<b>Escenario 95% S</b>			
Manejo operacional	2013	-	-
Conexión CPS 4	2014	132	-
Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	2016	3.960	12.393
Reemplazo campanas CPS	2016	-	11.107
Plantas de ácido doble absorción	2016	30.555	15.598
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT	2018	15.600	4.500
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	2018	12.480	3.600
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	2018	7.800	2.250
Consumo MWh/a		70.527	
<b>Escenario 96% S</b>			
Planta de flotación de escorias/reemplazo HLE	2019	52.000	712.500
Consumo MWh/a		122.527	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9.7.3.a Incremento Energía Eléctrica

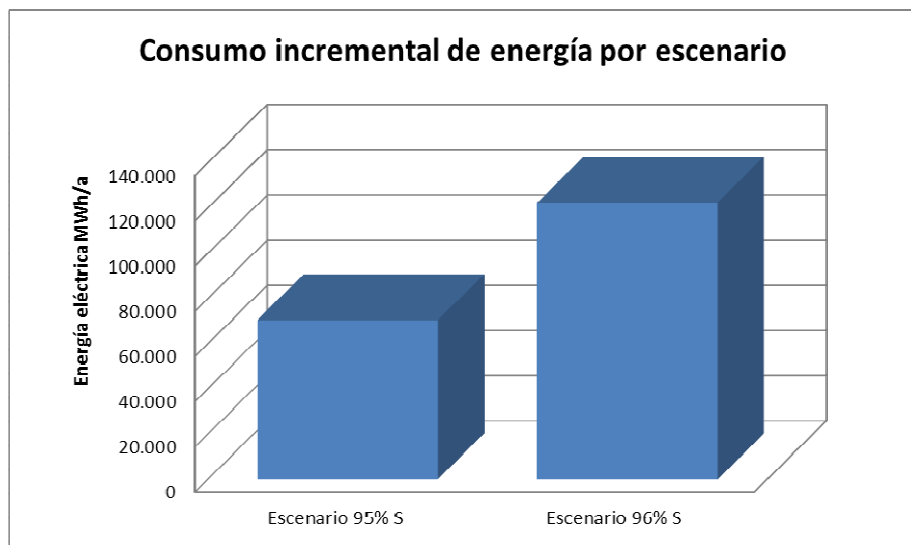
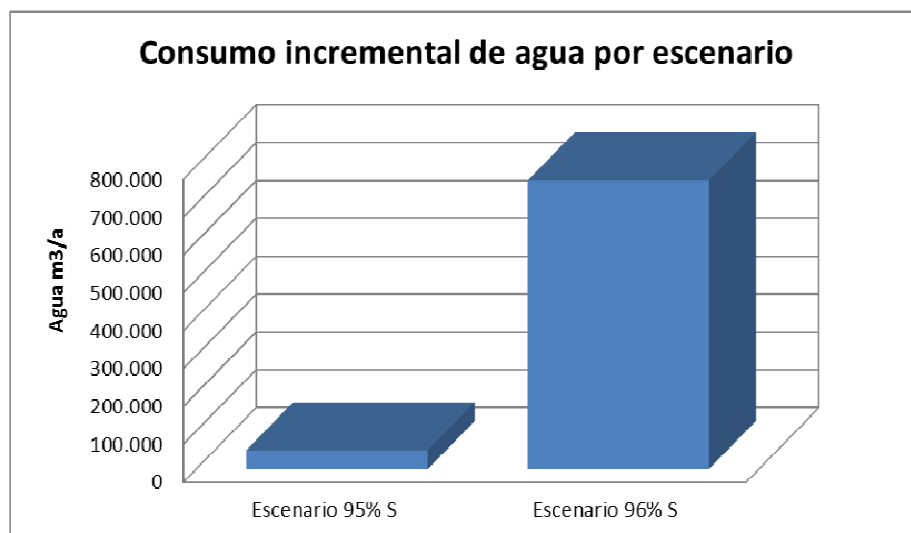


Gráfico 9.7.3.b Incremento Consumo Agua industrial



Fuente Gráficos 9.7.3 a y b: Elaboración propia.

La sustitución de los hornos de tratamiento piro metalúrgicos de escorias por flotación, conlleva también a un incremento significativo del agua de reposición, necesaria para las operaciones de molienda, flotación y transporte de relaves, con un índice de 0,75 m<sup>3</sup>/t de escoria.

## 9.8 Resultados Técnico/Económicos de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

### 9.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

La reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As, por fuentes para la Fundición Caletones se muestra en gráficos 9.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes, ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor, y ajustes por circuito de flotación de escorias.

Gráfico 9.8.1.a Emisiones Caletones de SO<sub>2</sub> por escenario

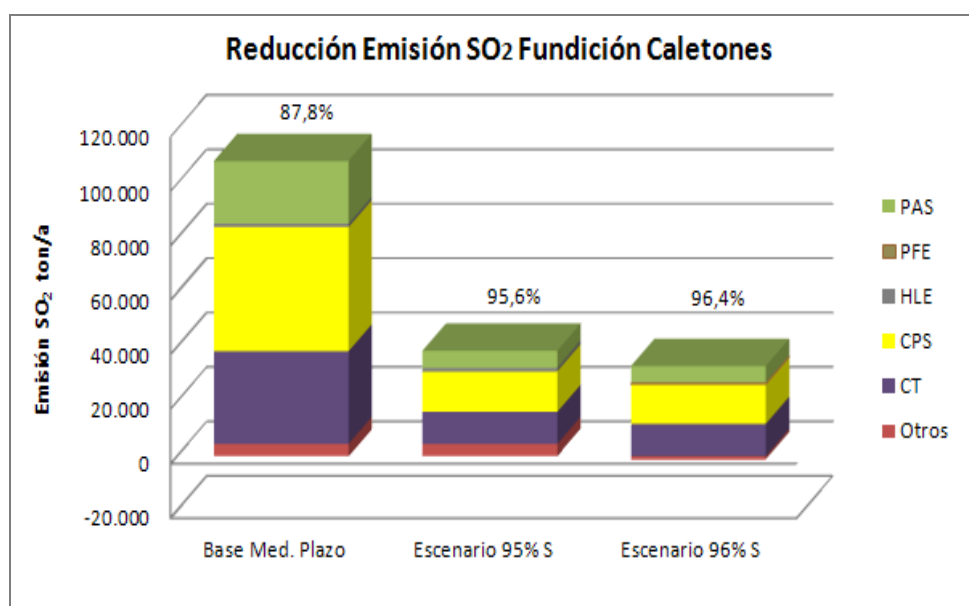
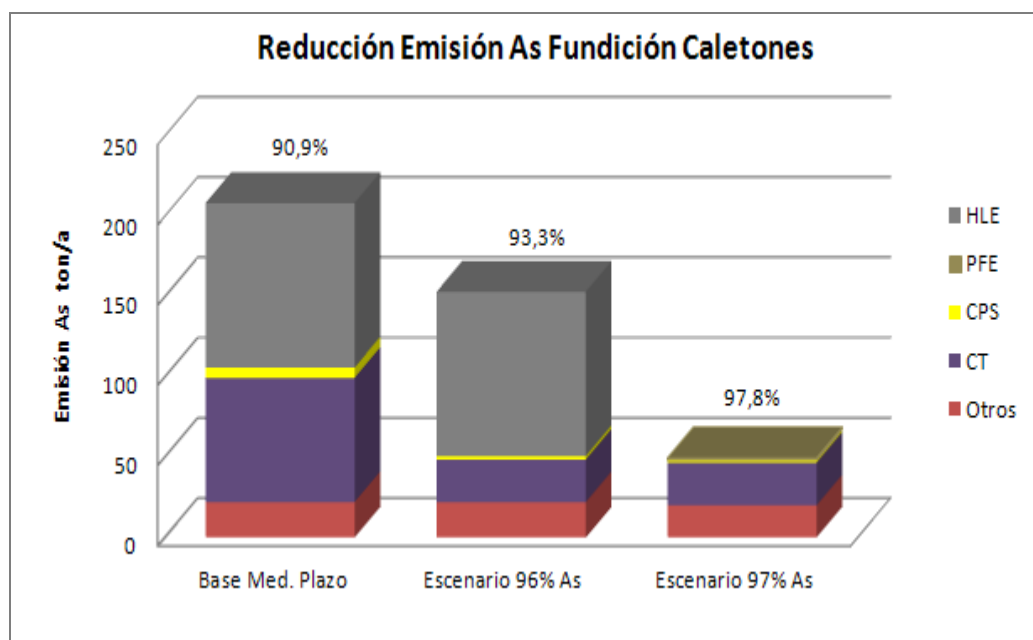


Gráfico 9.8.1.b Emisiones Caletones de Arsénico por escenario



Fuente Gráficos 9.8.1 a y b: Elaboración propia.

## 9.8.2 Cumplimiento de cuotas con emisiones proyectadas Azufre y Arsénico

Las figuras siguientes muestran que a partir del año 2018 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de  $\text{SO}_2$  y As proyectadas por la autoridad para la Fundición Caletones.

Gráfico 9.8.2.a Cuotas de Emisiones SO<sub>2</sub> Caletones por escenario

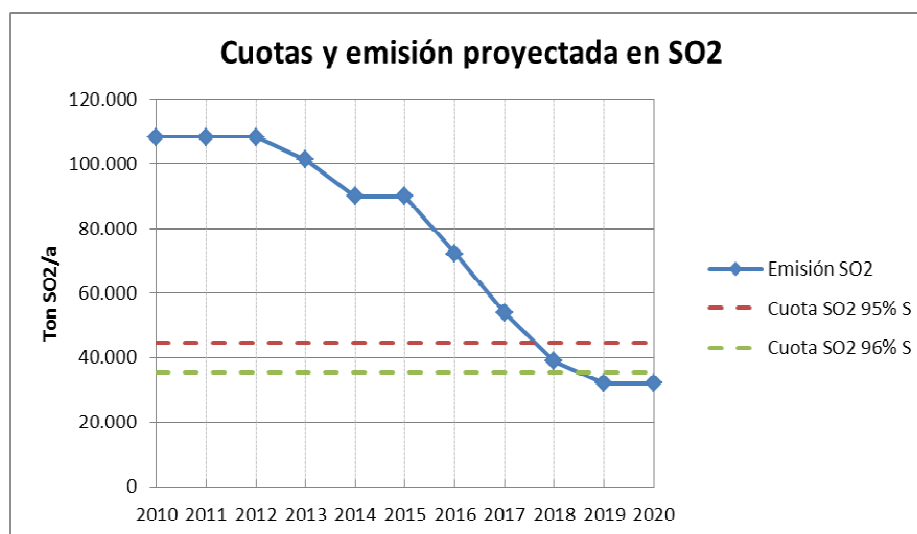
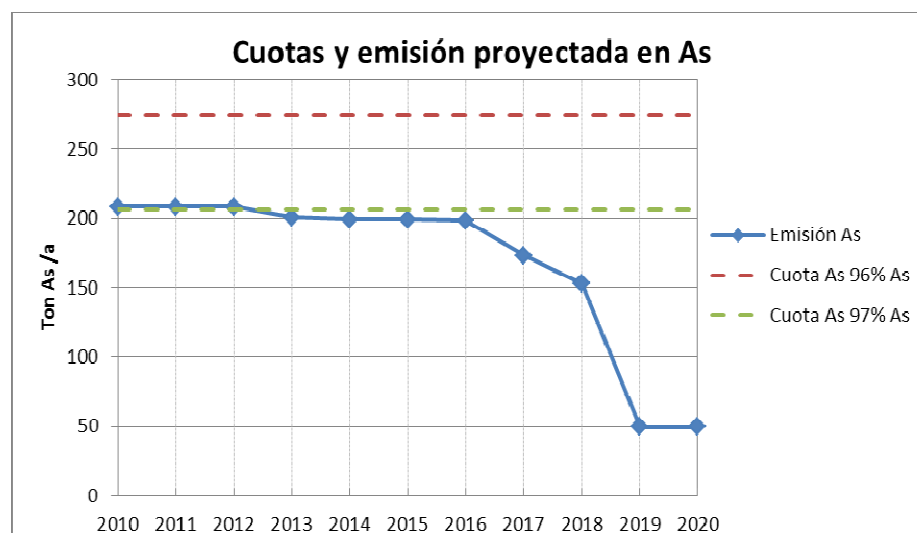


Gráfico 9.8.2.b Cuotas de Emisiones As Caletones por escenario



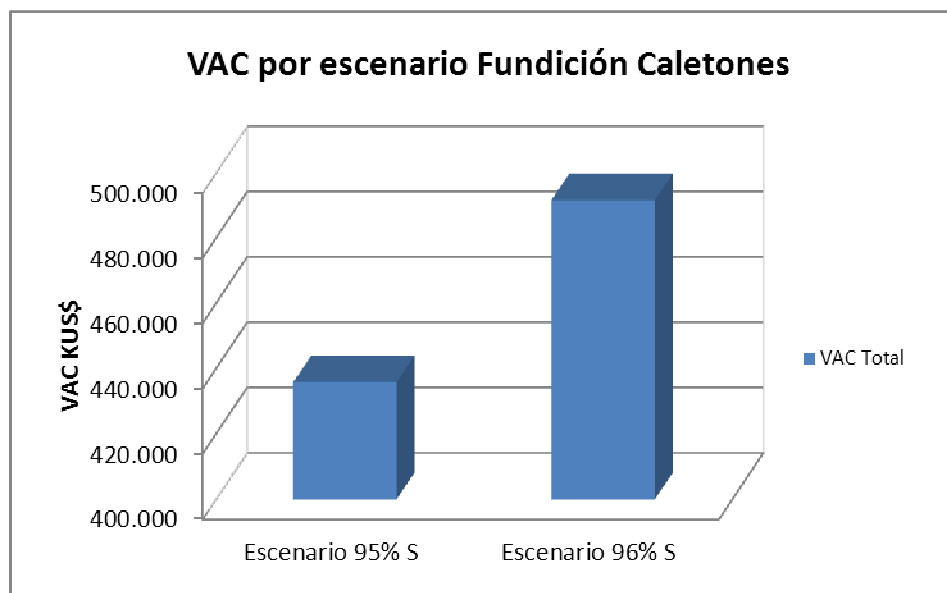
Fuente Gráficos 9.8.2 a y b: Elaboración propia.

### 9.8.3 Determinación de VAC y CAE

La determinación en un período de 25 años del valor actualizado de costos (VAC) para la Fundición Caletones, considerando una tasa social de descuento de 6%, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados evaluar por la autoridad, representarán los siguientes VAC acumulados:

- Escenario de 95% Fijación  $\text{SO}_2$  de un VAC de 435,9 MUS\$
- Escenario de 96% Fijación  $\text{SO}_2$  de un VAC de 491,6 MUS\$

Gráfico 9.8.3.a Valor Actualizado de Costos soluciones medioambientales  
Caletones por escenario

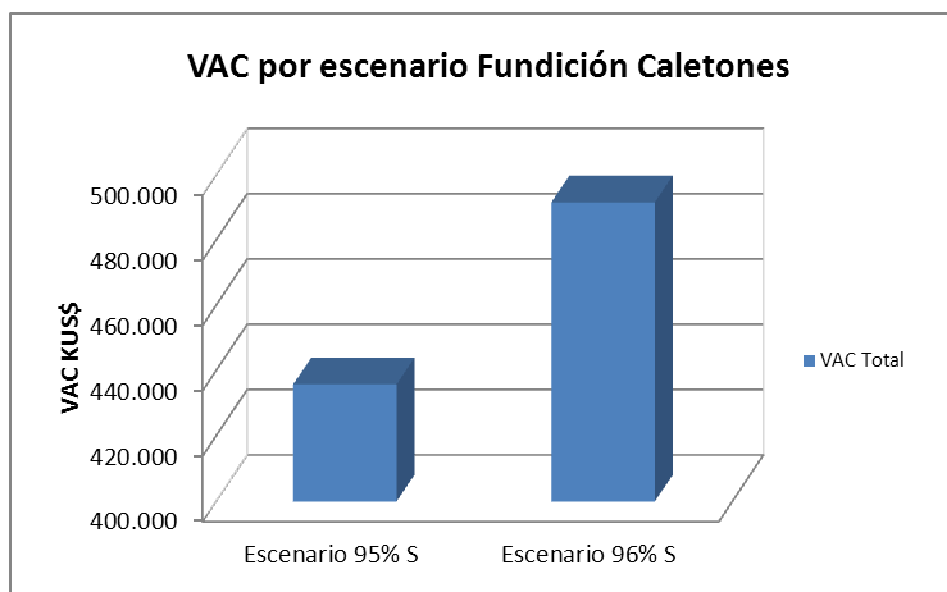


Fuente: Elaboración propia.

De igual modo la determinación del costo anual equivalente o valor en cuotas fijas anuales (CAE) para la Fundición Caletones, considerando una tasa social de descuento de 6% en un período de operación dentro de los 25 años, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados evaluar por la autoridad, representarán los siguientes CAE:

- Escenario de 95% Fijación  $\text{SO}_2$  de un CAE de 34.099 kUS\$/a
- Escenario de 96% Fijación  $\text{SO}_2$  de un CAE de 38.461 kUS\$/a

Gráfico 9.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medioambientales Caletones por escenario



Fuente: Elaboración propia.



#### 9.8.4 Relación Costo /Efectividad para el control de Emisiones de SO<sub>2</sub>.

Con los antecedentes entregados, para el cumplimiento de los escenarios de abatimiento de azufre proyectados, se requieren los siguientes recursos expresados como indicadores económicos y que llevan a los siguientes costos unitarios equivalentes por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida promedio en el periodo:

- **Escenario de 95% Fijación SO<sub>2</sub> de un CUE de 0,61 kUS\$/ t SO<sub>2</sub>**
- **Escenario de 96% Fijación SO<sub>2</sub> de un CUE de 0,64 kUS\$/t SO<sub>2</sub>**

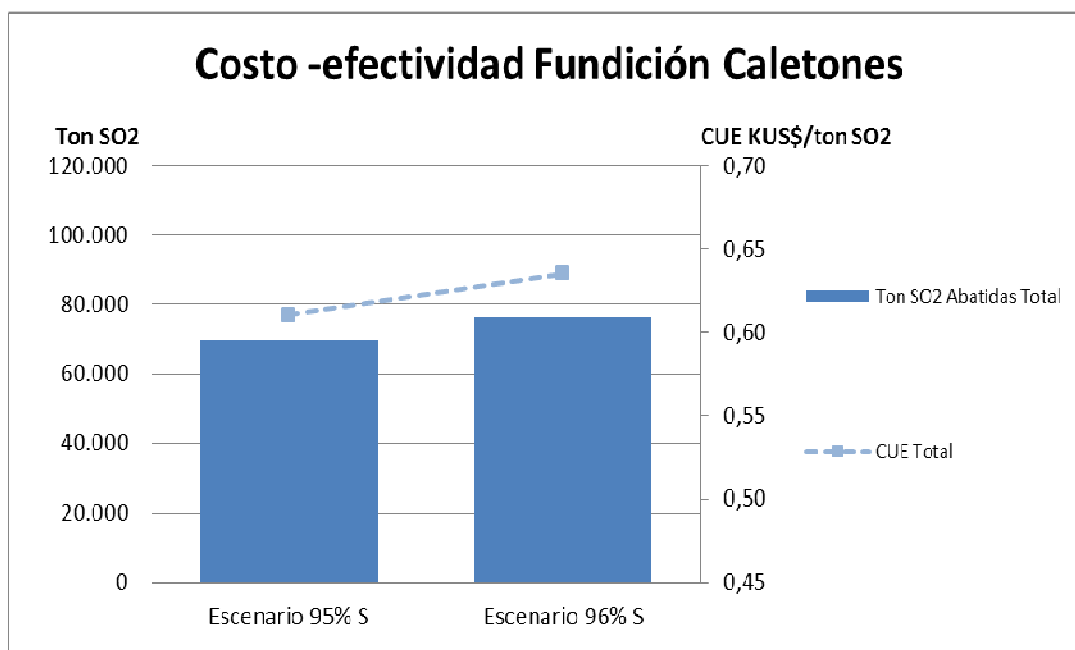
Por el volumen de procesamiento de la instalación, los valores proyectados son de menor cuantía, que el de instalaciones de mayor nivel porcentual de abatimiento, en correspondencia con la parte inferior de la curva exponencial esperada de costo/nivel de abatimiento.

Tabla 9.8.4 indicadores económicos por escenarios Fundición Caletones

		INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
ITEM	DESCRIPCIÓN	INVA	VAC	CAE	CUE
	COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS	KUS \$	KUS \$	KUS \$/a	KUS \$/Ton
1	Escenario Captura 95% S				
1.1	Manejo Operacional	0	0	0	
1.2	Conexión CPS 4	30.257	30.369	2.376	
1.3	Reemplazo campanas CT y nuevos VTI	54.262	57.145	4.470	
1.4	Reemplazo camapanas CPS	46.298	46.312	3.623	
1.5	Plantas de ácido doble absorción	53.997	85.636	6.699	
-	Producción de ácido sulfúrico	-	-15.956	-1.248	
1.6	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	33.707	93.665	7.327	
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	26.966	88.758	6.943	
	Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías MB CT	16.853	49.965	3.909	
	Total Escenario Captura 95% S	262.340	435.895	34.099	0,6
2	Escenario Captura 96% S	55.765	55.765	4.362	0,9
2.1	Planta de flotación de escorias	55.765	55.765	4.362	
	Total Escenario Captura 96% S	318.105	491.660	38.461	0,6

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9.8.4 Costo Unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida Caletones



Fuente: Elaboración propia.

#### 9.8.5 Proyección de futuro para la Fundición Caletones

Como antes se indicó, la perspectiva de cumplimiento de escenarios de mayor abatimiento de SO<sub>2</sub> en esta instalación, debe ir acorde a mejorar la captura de gases de los CT y CPS, incrementando en los primeros la continuidad del soplado y evitando todo giro para retorno o extracción de materiales, que indirectamente genera un aumento de nivel de fusión y captura. Para tal fin paralelamente también deberá generar opciones para el tratamiento sólido de las escorias de refinación y conversión o tratamiento alternativo de éstas.

Como propuesta de cambio estructural, la opción del procesamiento total o parcial hasta 50% del cobre hasta metal blanco granallado y el proveniente del soplado continuo de un CPS, permitirían integrar esta instalación de Codelco con el de la Fundición Ventanas, que con nueva tecnología de conversión y la Refinería Electrolítica dejaría de ser un centro de fusión, opción anteriormente estudiada, según datos bases del consultor.

## **10. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN VENTANAS**

### **10.1 General**

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Estimar costos de inversión y operación incrementales de fundición Ventanas, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento y/o fiscalización, producto de estas inversiones.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento 6%)

- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad nominal de procesamiento de concentrados para cada fundición registrada el año 2010, esto es, que la cantidad de concentrados que cada faena puede procesar se mantiene inalterada respecto del año base seleccionado.

Lo anterior con el fin de establecer el impacto de cada medida de reducción de emisiones en el costo marginal de procesamiento de concentrado, mediante la implementación de sistemas de control y seguimiento.

Por lo tanto el escenario base para fundición Ventanas considera una capacidad nominal de fusión anual de 436 kt/año de concentrados de cobre.

## 10.2 Descripción General de la Fundición

La fundición Ventanas inició sus actividades el año 1962 siendo una fundición maquiladora para la pequeña y mediana minería de propiedad de la empresa nacional de Minería (ENAMI). Se inició con una capacidad de producción de 100 kt/ año de concentrado, basada en la operación de un horno de reverbero y tres convertidores Peirce-Smith.

En el año 1990, se inició la instalación de una planta de ácido sulfúrico de capacidad 290 kt/año de ácido con un costo de US\$ 55 millones, para iniciar un plan de abatimiento de dióxido de azufre. El año 1991 adquirió una planta de oxígeno de 315 t/d (300 t/d O<sub>2</sub> gaseoso y 15 t/d de O<sub>2</sub> líquido) para su utilización en el horno de reverbero y en un convertidor Teniente, además incrementó la capacidad de la fundición de 325 kt/año de concentrado a 480 kt/año, con un costo de capital de US\$ 29,5 millones.

Entre los años 1997 y 1998, se dio inicio a un plan de modernización de la fundición, con el objetivo de dar cumplimiento al Plan de Descontaminación a acoger por la empresa (D.S 252/1992), que incluyó la instalación de un horno eléctrico de limpieza de escoria, Demag de 9,5 MVA, con la finalidad de detener el horno de reverbero. Se incluyó también el incremento de la capacidad de tratamiento de gases del convertidor Teniente y los convertidores Peirce-Smith (CPS) por expansión de la planta de ácido existente a 396 kt/año y modificaciones al sistema de limpieza de gases, incluyendo la instalación de un precipitador electrostático en los CPS.

El proyecto redujo la capacidad de la fundición a 420 kt/año de concentrado con un costo de capital de 56,2 millones.

Al año 2010, la fundición cuenta con 4 precipitadores electrostáticos de captura de polvos para limpieza de gases, 2 en el Convertidor Teniente, 1 en los convertidores Peirce-Smith y 1 en el horno eléctrico.

El año 1997 ENAMI firmó un contrato con GasValpo por US\$ 7,5 millones, para suministro de gas natural, así cambió sus instalaciones a quemadores duales, reteniendo de esta manera el potencial de uso de otros combustible.

El 1° de mayo del año 2005 la fundición y refinería Ventanas fue transferida a CODELCO CHILE.

#### 10.2.1 Descripción de la Planta

La fundición está compuesta por los siguientes equipos principales

Recepción de concentrados	: Buzones, canchas y mezcla de concentrado
Secado	: 1 secador rotatorio Fuller (60 t/h)
Horno de fusión	: 1 convertidor Teniente (4,0 m x 15,0 m)
Limpieza de escoria	: 1 horno eléctrico Demag (10 m diámetro x 5 m alto) (9,5 MVA).
Convertidores	: 3 Peirce-Smith (3,0 m x 9,4 m)
Horno de retención	: 1 rotatorio (3,0 m x 25 m)
Hornos de Ánodos	: 1 rotatorios (4,0 m x 9,0 m) 2 hornos reverbero (6,5 m x 16,0 m)
Ruedas de Moldeo	: 2 ruedas OK (45 t/h)- ánodos 275 kg
Plantas de oxígeno	: 1 Air Liquide (315 t/d)
Plantas de ácido	: 1 Peterson doble contacto (1.200 t/d)
Otros	: Planta de neutralización ácido débil con cal
Dimensiones nave	: 203 m *20 m *15 m

## 10.2.2 Descripción Sistema Manejo y limpieza de Gases

El sistema de manejo de gases considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas de los reactores, hasta el ingreso de los gases en planta de ácido sulfúrico.

En la figura a continuación, se muestra el esquema del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición Ventanas.

Figura 10.2.2 Esquema operativo del sistema de manejo de gases de Fundición Ventanas.



Fuente: Antecedentes entregados por el MMA.

El sistema de manejo de gases en líneas independientes dedicadas, para atender cada una de las operación unitarias de fusión, conversión y limpieza de escorias, incluyendo precipitadores electrostáticos y VTI, es la disposición de equipos considerada ideal por la nula interferencia y competencia entre los flujos de gases, lo que permite su dosificación (mezcla) antes de su ingreso a planta de ácido.

Lo anterior es particularmente importante para la búsqueda de soluciones de mejoramiento medioambiental, ya que necesariamente debe analizarse el sistema de manejo de gases como un todo. Cualquier deficiencia al interior del sistema de manejo de gases (infiltraciones de aire, falta de capacidad de enfriamiento de gases, capacidad insuficiente de VTI, falta de control de tiraje, capacidad insuficiente de captación de polvos e insuficiente capacidad de tratamiento de PAS) puede hacer ineficiente medidas de mejoramiento, tales como campanas primarias y secundarias de captación de gases.

El sistema de captación, manejo y limpieza de gases, funciona basado en el control de tiraje que es el efecto físico de depresión que genera la aspiración de los VTI y que hace posible el ingreso de aire de dilución en las campanas primarias, en equilibrio con la aspiración e impulso de los gases generado por el ventilador principal de planta de ácido, para su ingreso a la limpieza húmeda y secado de los gases y para vencer las caídas de presión provocada por las torres de catálisis y absorción, principalmente.

La fundición Ventanas con la configuración de equipos actuales, presenta una captación de azufre entre 93 y 94%, fundamentalmente por disponer de una PAS de doble contacto y doble absorción, no procesar polvos de precipitadores electrostáticos y la disminución de emisión de gases secundarios del CT, a consecuencia del aumento de la capacidad de tratamiento de gases de la PAS (125 a 140 kNm<sup>3</sup>/h).



### 10.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

#### 10.3.1 Emisión de Azufre y Arsénico

Considerando el criterio conservador de distribución de emisiones por fuentes, bajo el valor medio de fijación de Azufre y Arsénico declarado versus el calculado, la distribución estimada de emisiones y contenido proyectado de azufre para el mediano plazo, permite visualizar los siguientes tonelajes de emisión por fuentes.

Tabla 10.3.1 Emisiones de Azufre y Arsénico Fundición Ventanas

<b>Ventanas</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	436.000
Ley Media S en concentrados (%)		31,29
Ley Media As en concentrados (%)		0,18

<b>Emisión por Fuentes t/a</b> <b>Fundición Ventanas</b>	<b>Base Med. Plazo</b>	
	<b>Azufre</b>	<b>Arsénico</b>
Fugitivo primario CT (giro+campana)	2.853	15
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	980	5
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	3.940	1
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HE	324	12
Residual tratamiento gases HE	n/d	n/d
Gases de cola PAS	970	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	54	8
Otras fuentes	755	0,2
Ajustes	-709	-3
<b>Total emisión t/a</b>	<b>9.168</b>	<b>39</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,55\%</math> S</b>	<b>93,3</b>	<b>95,1</b>

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes entregados por el MMA.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en

base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de azufre.

### 10.3.2 Emisión de mercurio

La generación del mercurio está fuertemente relacionada con el tratamiento de concentrados de cobre con contenido de oro, el que normalmente se encuentra acompañado con mercurio. Esto generará emisiones en su estado gaseoso, mayoritariamente en la etapa de fusión de los concentrados.

Se estima que sobre el 98% de mercurio contenido en los concentrados (promedio 9 ppm) pasa a la fase gaseosa y se distribuye en forma similar al As, vale decir preferentemente en la fusión. Por lo tanto, la mayor proporción del mercurio ingresado a la fundición es capturado en los precipitadores electrostáticos secos y eventualmente una pequeña proporción llega a la PAS, donde es captado en la etapa de limpieza húmeda.

Adicionalmente, la PAS de fundición Ventanas dispone de una torre de limpieza de mercurio (EFI supuesta superior al 56%), se prevé el cumplimiento ajustado del límite en chimenea proyectado por el MMA de 0,07 mg/Nm<sup>3</sup>, lo que también permite asegurar la producción de ácido sulfúrico con menos de 1 ppm, de este elemento.<sup>30</sup>

Aunque la mayoría de los sistemas de descarga, que contienen metales se controlan eficazmente con los mismos controles de depuración que para el material particulado, el mercurio seguirá en estado de vapor a temperatura ambiente y puede atravesar algunos equipos de control.

---

<sup>30</sup> Global Emission and Production of Mercury during the Pyrometallurgical Extraction of Nonferrous Sulfide Ores.

Consecuentemente, el remanente de mercurio fugitivo debe ser capturado junto con los gases secundarios y fugitivos. Como fue mencionado, en el tratamiento de estos gases, debe cuidarse que la temperatura de la solución en el proceso venturi/scrubber debe mantenerse por debajo de la temperatura ambiente (5 a 10 °C). Una alternativa para soslayar el tema de la temperatura, es usar carbono activado para capturar el mercurio.

### 10.3.3 Emisión de material particulado

Las emisiones de material particulado de los procesos de secado, fusión y conversión de cobre, puede contener metales pesados volátiles. Las emisiones fugitivas pueden ser mayores que las recuperadas y por lo tanto, el control de las emisiones fugitivas es especialmente importante.

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

En el caso específico de Ventanas, la operación de secado, deberá implementar mejoras para el control del material particulado, a igual que para los gases del horno eléctrico, con el fin de asegurar cumplimiento de límites por chimenea, y por ende en el secado mejorar también la recuperación metalúrgica de la fundición.

## 10.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura tecnológica

La arquitectura tecnológica CT/CPS/HE, tiene la característica de poseer dos operaciones unitarias con equipos que basculan, uno con proceso continuo y otro discontinuo (proceso batch), como son el CT y los CPS, respectivamente, lo que significa que la boca de estos equipos con su campana de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto se puede generar emisión de contaminantes como SO<sub>2</sub>, As, Hg, MP y otros. Para contrarrestar esta situación, en los ductos de gases se

dispone de ventiladores de tiro inducido (VTI), que por succión producen una presión negativa dentro de la campana, generando una infiltración de aire externo hacia el interior de la campana (se opera idealmente con infiltraciones del orden de 100 a 120%).

No obstante lo anterior, las emisiones más importantes son generadas cuando estos equipos están recibiendo materiales por boca, estando ellos en posición de soplado y por lo tanto emitiendo todos los gases de proceso a la atmósfera, situación válida para CT y CPS. Por esta razón, operacionalmente debería reducirse drásticamente el giro del CT a lo estrictamente necesario (cambio de tobera de inyección, cambio de pasaje de sangría y apertura de toberas), cualquier agregado de material debería ser granulado y agregado por gurr gun o inyección.

Para el caso de los CPS, aunque el carguío de metal caliente es por boca, la adición de carga fría, debería ser agregada a través de una compuerta lateral en la campana.

En operación normal, estando la PAS procesando los gases de CT y CPS, cualquier restricción en el flujo de gases a procesar o por perturbaciones dinámicas, generará emisiones de gases contaminantes (puff de gases en boca).

Del punto de vista de las emisiones en sangría de CT, canales y ollas, ellas son similares al resto de los hornos de fusión, ya que las sangrías, canales y ollas, son instalaciones similares.

La fundición Ventanas tiene la ventaja de disponer a la fecha de una planta de ácido de doble absorción.

#### 10.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables en el control de Emisiones de Azufre y Arsénico

En la etapa de recepción de concentrados, éstos se reciben en camiones encarpados y el material es descargado en parrillas sobre piso de tolvas subterráneas. La preparación de la carga para el CT se realiza en correas encapsulada y los sitios se encuentran cerrados y confinados.

En la etapa de secado de concentrados en fundición Ventanas, se generan bajas emisiones de azufre, por el uso de gas natural como combustible en esta etapa, aunque si hay emisiones de material particulado.

De los antecedentes de la Emisión Base Mediano plazo de Azufre y Arsénico indicada en el punto 10.3.1, se puede concluir que las emisiones relevantes se encuentran en:

- Emisiones fugitivas de las campanas primarias, en los giros y en las sangrías de MB, para el caso del CT.
- Emisiones fugitivas de las campanas primarias de CPS, principalmente en los giros realizados para recibir las cargas de MB y la carga fría, para el control de temperatura.

Los proyectos y soluciones tecnológicas se han priorizado tomando en consideración las fuentes de mayores emisiones y también aquellas que impliquen menores interferencias operativas o modificaciones de infraestructura mayores.

En este sentido, la captación de los gases fugitivos de CT y CPS, que requiere de campanas secundarias, ha sido considerada como solución más tardía, en razón a que la altura de la nave de fundición, es relativamente baja (15m) y probablemente debería modificarse previamente.

Las emisiones en CT y CPS, en una primera instancia se abordan desde su componente de emisiones por giros de los equipos, por que Ventanas deberá adoptar prácticas operacionales que limiten los giros a lo estrictamente necesario.

En este sentido, es importante el mejoramiento ambiental que genera la alimentación mecánica de carga fría a los CPS, evitando hacer esta operación por boca. Actualmente, Ventanas desarrolla un proyecto para determinar la mejor solución para la fusión del scrap de refinería, mientras tanto se considera mantener la adición de scrap por boca a los CPS.

#### 10.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

En primera instancia, se indican algunos proyectos que Ventanas indica en etapa de materialización y que apuntan a un mejoramiento medioambiental de la fundición.

- Disminución de la Emisión de Material Particulado en Secado

El material particulado generado en el secador de concentrados, donde se utiliza como combustible GN, se separa de la corriente gaseosa mediante una planta de filtros de mangas.

Actualmente la fundición se encuentra desarrollando un proyecto de potenciamiento del filtro de mangas, mediante un Up Grade general, mejorando la captura de material particulado y permitiendo asegurar una emisión menor a 100 mg/Nm<sup>3</sup>.

La disminución de emisión de MP indicada anteriormente, es insuficiente y se requerirá un mejoramiento adicional, para alcanzar una emisión inferior a 50 mg/Nm<sup>3</sup> para dar cumplimiento a límites por chimenea, que esta nueva regulación podría incluir, considerando Ventanas adyacente a área poblacional.

El proyecto de mejora del filtro de mangas contempla dos fases, la primera fase es obtener una situación de diseño que permita asegurar una emisión menor a  $100 \text{ mg/Nm}^3$ , esta fase como se mencionó anteriormente, se encuentra en desarrollo y su implementación y puesta en marcha se proyecta a realizar el primer semestre de 2012. La inversión estimada es de 2,5 MUS\$.

La segunda fase del proyecto para obtener una emisión de MP inferior a  $50 \text{ mg/Nm}^3$  se realizará el 2013 y la inversión estimada alcanza a 3 MUS\$.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirán tener operativo el sistema a comienzos de 2014.

- Tratamiento gases metalúrgicos HE

Para el caso de las emisiones de material particulado del HE de limpieza de escoria, donde se emplea un precipitador electrostático seco, actualmente se está realizando un Up Grade general, lo que permitirá durante el segundo semestre de 2012, un mejoramiento de su eficiencia para volver a su condición de diseño de una emisión de  $120 \text{ mg/Nm}^3$ .

En el HE de limpieza de escoria, por el ambiente reductor requerido, se regeneran compuestos en la escoria liberando As, el que escapa en los gases y es capturado como MP, una vez que este precipita al disminuir la temperatura. La emisión de As por esta vía es del orden de 3 a 4%.

Por lo anterior, para capturar y abatir el arsénico en los gases del HE, éstos se limpiarán en el precipitador electrostático seco y se ha considerado en la evaluación de costos conducirlos posteriormente a una nueva planta de limpieza de gases fugitivos de la fundición, de lavado de gases alcalino, bajo el

cual también se posibilitaría parcialmente el cumplimiento de límites de chimenea.

La inversión del proyecto se estima de 8,7 MUS\$, el cual estaría en operación el año 2015.

Los costos de operación incrementales asociados a esta tecnología, consideran el mayor requerimiento energético ( $MWH/Nm^3/h$ ), gastos en reactivos y mantención, así como los costos de disposición de residuos de la nueva planta, considerados en 300 US\$/t.

- Tratamiento Alternativo a Hornos con Limpieza de escorias mediante flotación

Para efectuar la limpieza de las escorias, la mayoría de las fundiciones están optando por el reemplazo de los hornos a enfriamiento de escorias y tratamiento por flotación, lo que mejora la recuperación de cobre, además de reducir emisiones de arsénico.

Para el caso particular de la fundición Ventanas una planta de flotación de escorias en su instalaciones es inviable, por la falta de terrenos aledaños para la disposición de los relaves y los permisos requeridos de la autoridad, pero existen opciones a analizar, frente a la situación de tener población cercana a sus instalaciones, dadas las características cancerígenas de este elemento (según la calificación de la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer IARC).

La opción de limpieza de escoria mediante proceso de flotación tiene un importante impacto en la captura y abatimiento de As estimada entre 4% y 5%, del total ingresado a la fundición y bajo en el abatimiento de S (0,8%), además mejora la recuperación de cobre de la fundición en un estimado de 1,5 a 1,8 %.



Para la fundición Ventanas, hacer viable el cambio del proceso de limpieza piro metalúrgica por flotación, requeriría una gestión contractual externa y considerar el enfriamiento y chancado de las escorias en la planta y su transporte al sector norte del país, donde sea viable la flotación de estas escorias.

Bajo tal contexto se estima que Ventanas debe estudiar esta opción para el mediano plazo, realizando el análisis contractual y los estudios de factibilidad del sistema de enfriamiento controlado de las escorias y equipos de almacenamiento y carguío a camiones, con lo que el reemplazo podría estar disponible no antes del 2017, aportando con este cambio a una potencial mejora de reducción de emisiones de As.

- Captación y limpieza de gases de sangrías CT y HE

Mejoramiento de la captación y limpieza de azufre y arsénico en la fundición, mediante la captación y tratamiento de los gases de sangrías (fugitivos) de CT y HE. La solución considera la instalación mejorada de pequeñas campanas localizadas por sobre las sangrías, canales y olla, los ductos y ventiladores para el manejo y conducción de estos gases diluidos a una planta de limpieza de lavado alcalino, donde se abatiría MP, SO<sub>2</sub> y eventualmente Hg. La planta se localizaría en la periferia de la fundición.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirían tener operativo el sistema el primer semestre de 2014, en atención a que fundición Ventanas ya tuvo experiencia previa de captura con este tipo de instalaciones.

La inversión requerida se estima cercana a 23,5 MUS\$, y de acuerdo al potencial de reducción de emisiones de esta medida de control, se tendrá una disminución de azufre de 0,4 %.

Los costos de operación incrementales asociados a esta tecnología, consideran el mayor requerimiento energético ( $\text{MWH/Nm}^3/\text{h}$ ), los gastos en reactivos y mantención, así como disposición de residuos de la nueva planta (300 US\$/t).

- Adición de carga fría por campana a CPS

Para evitar las emisiones de gases de procesos en la operación de agregado de carga fría por boca a los CPS, Ventanas está desarrollando un proyecto de agregado mecánico lateral a la campana de los CPS de este material, mediante una correa transportadora.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirá tener operativo el sistema a fines del 2013. La inversión requerida se proyecta en 1,5 MUS\$.

- Mejora MAGA y Aumento de la capacidad de tratamiento de gases de la PAS

Esta medida de control persigue el mejoramiento de la capacidad de tratamiento de gases de la PAS, a través de una disminución de las emisiones de gases fugitivos por boca, al controlar la dilución en campanas de CT y CPS a una cifra inferior a 100 %, alcanzando captaciones en campanas de CT y CPS de 97% y 95%, respectivamente. Esto implicará potenciar la PAS, para poder procesar gases de una mayor concentración de  $\text{SO}_2$ , estimada en 10,5 a 11,5 %, vale decir llevarla a un tratamiento de  $16.100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $\text{SO}_2$ .

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirá tener operativo el sistema a comienzos de 2015, en atención a que fundición Ventanas ya ha tenido experiencia con aumento de capacidad de PAS.

La inversión requerida se estima en 18 MUS\$ y de acuerdo al potencial de reducción de emisiones de estos cambios tecnológicos, se tendría una disminución de emisión de azufre del orden de 0,7 %.

- Tratamiento de gases de cola PAS

Actualmente por la chimenea en planta de ácido se emiten del orden de 1.720 mg/Nm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> y con un tratamiento de estos gases se podría alcanzar una emisión inferior a 400 mg/Nm<sup>3</sup>, lo que podría permitir alcanzar una reducción de emisiones de SO<sub>2</sub> de 0,6% respecto de la alimentación.

Existen varias alternativas de tratamiento a analizar por Ventanas para el tratamiento de estos gases, tales como el proceso con PERACIDOX o SUPEROX, que básicamente consiste en agregar un venturi/scrubber que trata los gases con agua oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para producir ácido sulfúrico, o la del proceso Cansolv que permite abatir azufre con recuperación de ácido, pero a que a la fecha el Consultor no dispone de antecedentes válidos de inversiones, eficiencias y costos de operación para incorporar a este análisis normativo, por tal motivo ha considerado la solución de lavado alcalino tradicional con cal para la formación de yeso<sup>31</sup>, se ha incluido el costo de disposición como residuo sólido en 300 US\$/t.

Los costos de inversión para la planta de lavado de gases de cola de 116.000 Nm<sup>3</sup>/hr se estiman en 19,2 MUS\$<sup>32</sup>.

El proyecto operaría en el año 2016, con costos de operación que corresponden principalmente a materiales (reactivos) y energía eléctrica. Se

---

<sup>31</sup> Best Available Techniques for Pollution Prevention in control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries- Production of Sulphuric Acid (2000), p. 38-40

<sup>32</sup> Aumento Captación de SO<sub>2</sub> Fundición HVL, estudio de Perfil, Jacob 2011

asumen irrelevantes los costos incrementales en dotación, ya que no es superior a 6 personas.

El Consultor destaca sin embargo, que para la fundición Ventanas, que se encuentra emplazada en la costa, el proceso de limpieza de gases cola con agua de mar ALSTOM Seawater FGD, considerado un proceso Best Available Technologies (BAT), puede resultar en una muy buena alternativa para reducir sus emisiones de SO<sub>2</sub>, particularmente frente a escenarios más exigentes.

Este proceso de ALSTOM, ofrece las siguientes características:

- Eficiencia de reducción de SO<sub>2</sub>: 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

El proceso estaría en operación en la termoeléctrica AS Gener cercana del puerto Ventanas para el lavado de gases de baja concentración de SO<sub>2</sub>.

Con la implementación de las medidas indicadas anteriormente, se proyecta alcanzar **una captación global de azufre de 95,4 +/-0,55%, 96,8 % de As y el cumplimiento de límites por chimeneas definidos por la autoridad.** Para el último fin se han incluido también inversiones del orden de 2,9 MUS\$, de sistemas postcombustión para el tratamiento de humos negros en los hornos anódicos (3 unidades), y 1,1 MUS\$ para adecuar la infra estructura para monitoreo y control de límites en chimenea, además del tratamiento para los gases de cola PAS, tratamiento de particulado en la Planta de secado y el tratamiento de los gases metalúrgicos del Horno Eléctrico, ya antes indicados.

- Captación y tratamiento de gases fugitivos CT y CPS

La captación y tratamiento de gases fugitivos de campanas primarias, como se mencionó anteriormente podría requerir de modificaciones en las estructuras de la nave de fundición (alzamiento del techo), que necesariamente pasan por una detención de la fundición por un período de al menos 45 días, con todos los costos que ello implica.

Como lo anterior resulta extremadamente oneroso, el Consultor sugiere optar por la solución de una doble campana consistente en dos cubiertas paralelas desplazables, instalada sobre la campana primaria, que descienden cuando es necesario descargar blíster/escoria o agregar carga, en el caso de los CPS<sup>33</sup>. Esta cubierta dispone de aspiradores verticales y horizontales tipo pico de pato, que descargan los gases por ductos ubicados por los costados de la campana primaria.

Los gases así capturados se conducirían a una nueva planta de limpieza húmeda de gases fugitivos para el abatimiento de MP, SO<sub>2</sub>, As. La inversión estimada asociada a ambas campanas secundarias, sistema de tiro inducido y la planta de limpieza húmeda de gases fugitivos es de 60 MUS\$. Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirá tener operativo el sistema a comienzos de 2017.

Los costos de operación incrementales asociados a esta tecnología, consideran el mayor requerimiento energético (MWH/Nm<sup>3</sup>/h), gastos en reactivos y mantención, así como los gastos de disposición de residuos de la nueva planta (300 US\$/t).

---

<sup>33</sup> Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC), documento BREF.

De acuerdo al potencial de reducción de emisiones de esta medida de control, se tendría una disminución de azufre de 1,5%, del total de azufre ingresado y consecuentemente posibilita a alcanzar en Ventanas **una captura global de azufre de 96,9 +/- 0,55 % y de 97,6% de As.**

El efecto por proyecto de reducción de emisiones, calculado en bases a las fuentes detectadas y las eficiencias asignadas indicadas en el capítulo 5 (Ej.: 85% abatimiento de S y As en planta de lavado alcalino), se indica en la siguiente tabla:

Tabla 10.5.1 Proyectos de Reducción de Emisiones Fundición Ventanas

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Ventanas</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120 kNm <sup>3</sup> /h	0,4	1,0	1.122	8
Adición de carga fría por campana o culata CPS	0,3	-	777	-
Mejora MAGA y aumento capacidad tratamiento gases PAS	0,7	0,4	1.891	3
<b>Límites de chimenea</b>				
Tratamiento gases de cola PAS 116.000 Nm <sup>3</sup> /h	0,6	-	1.650	-
Eliminación humos negros y opacímetro HA (tres)	-	-	-	-
Tratamiento gases metalúrgicos HE	0,1	0,3	236	2
Infraestructura monitoreo control	-	-	-	-
Filtro de mangas secador (MP)	-	-	-	-
<b>Escenario 96% S</b>				
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	0,6	0,03	1.604	0,3
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT	0,9	0,8	2.483	6

Fuente: Elaboración propia.

## 10.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con los proyectos antes mencionados implementados, la distribución de emisiones en la fundición queda como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 10.6.a Emisiones según Captura-Fijación de Azufre y Arsénico por escenario Fundición Ventanas

<b>Ventanas</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	436.000
Ley Media S en concentrados (%)		31,29
Ley Media As en concentrados (%)		0,18

Emisión por Fuentes t/a	Base Med. Plazo		Escenario de 95% S		Escenario de 96% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario CT (giro+campana)	2.853	15	2.241	12		
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d	n/d	n/d	999	5
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	980	5	529	3	529	3
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	3.940	1	3.218	1		
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	2.417	1
Chimenea y sangrías HE	324	12				
Residual tratamiento gases HE	n/d	n/d	96	4	96	4
Gases de cola PAS	970	0				
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	146		146	
Refino HA	54	8	54	8	54	8
Otras fuentes	755	0,2	755	0,2	755	0,2
Ajustes	-709	-3	-709	-3	-709	-3
<b>Total emisión t/a</b>	<b>9.168</b>	<b>39</b>	<b>6.330</b>	<b>25</b>	<b>4.287</b>	<b>18</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,55\%</math> S</b>	<b>93,3</b>	<b>95,1</b>	<b>95,4</b>	<b>96,8</b>	<b>96,9</b>	<b>97,6</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	2.838	14	2.043	7
Toneladas de ácido incremental (t/a)			4.168		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

El cumplimiento de límites en chimenea por otra parte, no sería 100% factible en los niveles de As establecidos para chimeneas de plantas de lavado, con las eficiencias proyectadas, situación que para otros elementos estaría posibilitada.

Tabla 10.6.b Tabla cumplimiento límites por chimenea Fundición Ventanas

Cumplimiento Límites en Chimenea Fundición Ventanas										
Fuente Generadora y Sistema de Tratamiento	Tecnología a Implementar	Volumen	Conc. SO2	Conc As	EFI trat	Concentración proyectada mg/Nm3				Observaciones
		Nm3/hr	mgr/Nm3	mgr/Nm3	%	400 SO2	0,5 As	0,07-0,1 Hg	50 MP	
Tratamiento gases de Cola PAS doble absorción	Lavado scrubber solucion alcalina	115.850	2.050	-	85	308	-	0,07 *	-	Requiere disponer 4.500 t/a yeso
	Cansolv, para producción de ácido			-	95		-		-	Requiere vapor no existente y ampliacion capacidad conversión y enfriamiento PAS, limitadas
Tratamiento gases secundarios chimenea HE	Precipitador Electrostático y lavado alcalino	50.000	670	6,2	85	100	0,9	s/a	0,9	Requiere disponer 650 t/a yeso impuro
Captura y Tratamiento gases Sangria CT-HE	Campana, VTI, Lavado alcalino, 70% capt	120.000	1.640	10	85	246	1,5	-	1,5	Requiere disponer 3.800 t/a yeso impuro
Captura y Tratamiento gases Fugitivos CT-CPS	Campanas, VTI, Lavado alcalino 98,5%-80% captura	300.000	1.935	3,3	85	290	0,5	-	0,5	Requiere disponer 11.100 t/a yeso impuro
Secador Rotatorio baja capacidad	Incremento Mantenición de mangas	45.000	< 10	-	-	Informar	-	-	Informar	Usa Gas natural, bajo

Nota (\*): Considera torre des-mercurizadora eficiencia 56% y mínima fijación en ácido.

Fuente: Elaboración propia.

### 10.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Con las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As, Hg y MP, y poder dar cumplimiento a los escenarios definidos y los límites de emisiones en chimenea, ellos se cumplirían según el siguiente cronograma:



Tabla 10.6.1 Cronograma de cumplimiento de escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION VENTANAS					
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO				
	2013	2014	2015	2016	2017
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 93,3%			95,4%	96,9%	
Adición Mecánica de Carga fría CPS por campana	xxxxxxxxxxxx				
Captación y Tratamiento Gases Fugitivos Sangría CT y HE	xxxxxxxxxxxx				
Tratamiento de gases de cola PAS			xxxxxxxxxxxx		
Mejora Maga y Aumento Tratamiento PAS		xxxxxxxxxxxx			
Tratamiento gases metalúrgicos HE		xxxxxxxxxxxx			
Aumento Capacidad Filtro de Mangas/Secador y PPEE de HE	xxxxxxxxxxxx				
Captación y Tratamiento Gases Secundarios CT y CPS			xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx	
Flotación de Escorias de CT				00000	0000000000

Fuente: Elaboración propia.

## 10.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Mediano y Largo Plazo

Para el consultor es importante transparentar la realidad de una fundición en términos que el conjunto de operaciones unitarias debe operar a su máxima eficiencia de parámetros operacionales de calidad de la carga, capacidad de procesamiento de ella, equipos de captura y manejo de gases metalúrgicos, planta de limpieza de gases y captura/limpieza de gases fugitivos para que como conjunto, la fundición cumpla un determinado nivel de captura y emisión de contaminante.

En la práctica, lo normal es que de tiempo en tiempo, cualquier equipo del conjunto descrito anteriormente baje su eficiencia o falle y consecuentemente como conjunto no se cumpla el nivel de captura y emisión de contaminante. Como esta planteado el cumplimiento de la norma en nivel de captura y cuota de emisión, no es una solución bajar el nivel de fusión como ocurre actualmente y por lo tanto el único camino viable es que nominalmente la fundición debe poseer un nivel captura superior en al menos 0,5% por sobre la norma, para poder amortiguar las fallas puntuales de los equipos.

Por otro lado, hay que tener claro que los niveles de eficiencia declarados por los proveedores de equipos en el mejor de los caso se cumple, con el equipo nuevo recién instalado, pero con el correr del tiempo su eficiencia disminuye y su ineficiencia debe ser absorbida por la mayor eficiencia de captura (0,5%), indicada anteriormente.

Como se comprenderá, cuando la eficiencia de los equipos comienza a decaer, se acepta un determinado nivel de deterioro antes de programar una detención de fundición, por el impacto económico que ello significa.

No es viable detener los equipos para reparación, tan pronto ellos presenten deterioro (pérdidas de eficiencia) que pueden ser absorbidas por el mayor nivel de captura, porque esto atentaría contra la continuidad operativa de fundición, situación de la más alta necesidad.

Por otro lado, algunas mantenciones requieren equipos especiales (camiones de transporte pesado, grúas de levante mayor, generadores portátiles, etc), que no poseen las fundiciones (porque son de uso puntual) y que es necesario arrendar y por lo tanto hay que tomar el lugar que corresponda en la lista de espera, hasta que haya disponibilidad del equipo.

Lo anterior, junto al hecho de considerar una banda de incerteza en cumplimiento fiel del nivel de abatimiento, indica que con los proyectos considerados permitirían a la Fundición Ventanas cumplir los escenarios normativos propuestos.

#### 10.6.3 Comentarios sobre Infraestructura, Espacios Disponibles e Interferencias

Para enfrentar el procesamiento de los gases fugitivos que se captarán desde las sangrías del CT y HE, se dispone de espacio en el lugar en que encontraba el horno de reverbero y sus calderas recuperadoras de calor, conjunto que estuvo ubicado al costado sur del HE. El espacio requerido varía entre 100 a 120 m<sup>2</sup>.

La alimentación mecánica de carga fría lateral en las campanas de los CPS, no presentará problemas ya que no existen instalaciones mayores por los costados de las campanas y no requerirá disponer de altura adicional. La compuerta lateral debe estar a una altura tan cercana como sea posible a la boca del convertidor.

El mejoramiento de planta de ácido, que básicamente apunta a aumentar su capacidad de tratamiento de gases y recuperación de calor, se desarrolla dentro de los límites de la PAS. Se requiere aumentar la capacidad del ventilador principal, cambiar reactores existentes de catálisis y torres de absorción por otros de mayor tamaño y aumentar la capacidad de enfriamiento de estos equipos, aprovechando este calor.

Las interferencias se circunscriben a la instalación y conexión de estos equipos, que son fabricados externamente y llegan a la planta previos a la mantención anual de la fundición, para su instalación y conexiones necesarias.

El cambio del proceso de limpieza de escorias de CT, se remite a la detención del HE una vez que se disponga de las canchas de enfriamiento de escoria (forzado y natural), las que deberían estar ubicadas en el sector sur oriente del HE, limitado

por el cierre perimetral contiguo al camino público. Para el transporte de las ollas se requerirá de camiones tipo KRESS. Adicionalmente, debe prepararse un sector para acumulación y despacho, vía camiones, de la escoria chancada a la zona norte.

La captación de los gases fugitivos desde las campanas del CT y los CPS, es el proyecto mas conflictivo por su impacto sobre los costos de la fundición (interferencia mayor), si se opta por campanas secundarias tradicionales, que necesariamente requeriría de una detención mayor de fundición de al menos 45 días (experiencia de Fundición Caletones), por esta razón se sigue optando por la alternativa de una campana especial, como se indicó anteriormente y que no requeriría de esta detención de fundición.

Previo al funcionamiento de las campanas secundarias, deberá estar en funcionamiento la ampliación de capacidad de tratamiento de la PAS, para poder procesar el SO<sub>2</sub> adicional captado por el mejoramiento de las campanas primarias.

## 10.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 10.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/- 30%, las inversiones y recursos pre-inversionales (7% de la inversión) requeridos por escenario para la Fundición Ventanas, alcanzan:

- Escenario 95% fijación de S y límites de chimenea con 86,1 MUS\$
- Escenario 96% fijación de S y límites en chimenea con 150,3 MUS\$

Tabla 10.7.1.a Costos de capital por escenario Fundición Ventanas

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub Total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Adición de Carga Fría por Campana o Culata CPS	1.500	105	1.605	20 años
1.2	Captación y Tratamiento Gases Fugitivos de Sangrías CT/HE 120 kNm3/h	23.512	1.646	25.158	15 años
1.3	Mejora MAGA y Aumento Capacidad Tratamiento Gases PAS	18.000	1.260	19.260	20 años
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Tratamiento Gases de Cola PAS 116.000 Nm3/h	19.226	1.346	20.572	20 años
1.1.2	Eliminación Humos Negros y Opacimetro HA (Tres)	2.850	200	3.050	20 años
1.1.3	Tratamiento Gases Metalúrgicos HE	8.700	609	9.309	18 años
1.1.4	Infraestructura Monitoreo Control	1.198	84	1.282	20 años
1.1.5	Filtro de Mangas Secador (MP)	5.500	385	5.885	15 años
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>37.474</b>	<b>2.623</b>	<b>40.098</b>	
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>80.487</b>	<b>5.634</b>	<b>86.121</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96 % S</b>				
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	32.000	2.240	34.240	20 años
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	28.000	1.960	29.960	20 años
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>140.487</b>	<b>9.834</b>	<b>150.321</b>	

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de estas inversiones y su reposición por término de vida útil, en un plazo de 25 años, han permitido al Consultor calcular la inversión actualizada INVA por escenario, utilizando una tasa de descuento de 6% anual, considerando como año cero el 2011.

A continuación la tabla 10.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 10.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Ventanas

COSTOS DE INVERSIÓN								
ITEM	DESCRIPCIÓN	AÑO 1 2011	AÑO 2 2012	AÑO 3 2013	AÑO 4 2014	AÑO 5 2015	AÑO 6 2016	AÑO 7 2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>								
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>							
1.1	Adición de Carga Fría por Campana CPS	0	105	1.500	0	0	0	0
1.2	Captación y Tratamiento Gases Fugitivos de Sangrías CT/HE 120 kNm3/h	0	1.646	23.512	0	0	0	0
1.3	Mejora MAGA y Aumento Capacidad Tratamiento Gases PAS	0	0	1.260	18.000	0	0	0
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>							
1.1.1	Tratamiento Gases de Cola PAS 116.000 Nm3/h	0	0	0	1.346	19.226	0	0
1.1.2	Eliminación Humos Negros y Opacímetro HA (Tres)	0	0	200	2.850	0	0	0
1.1.3	Tratamiento Gases Metalúrgicos HE	0	0	609	8.700	0	0	0
1.1.4	Infraestructura Monitoreo Control	0	0	84	1.198	0	0	0
1.1.5	Filtro de Mangas Secador (MP)	385	2.500	3.000	0	0	0	0
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>385</b>	<b>2.500</b>	<b>3.892</b>	<b>14.094</b>	<b>19.226</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>385</b>	<b>4.251</b>	<b>30.164</b>	<b>32.094</b>	<b>19.226</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96 % S</b>							
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	0	0	0	1.120	1.120	32.000	0
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	0	0	980	980	28.000	0	0
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>385</b>	<b>4.251</b>	<b>31.144</b>	<b>34.194</b>	<b>48.346</b>	<b>32.000</b>	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 10.7.2 Costos incrementales de operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en 9,1 MUS\$/año para el escenario 95% y 16,4 MUS\$/año para el escenario de 96%, incorporan el caso de producción incremental de ácido como un crédito al costo, la venta del ácido adicional generado tiene un ingreso marginal neto de 40 US\$/t.

Tabla 10.7.2 Costos de Operación incrementales por escenario Fundición  
Ventanas

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTALES					
		COSTO TOTAL INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>	<b>2.604</b>	<b>563</b>	<b>369</b>	<b>532</b>	<b>1.140</b>	<b>3.790</b>
1.1	Adición de Carga Fría por Campana CPS	12	8	4	0	0	777
1.2	Captación y Tratamiento Gases Fugitivos de Sangrías CT/HE 120 kNm <sup>3</sup> /h	2.731	527	532	532	1.140	1.122
1.3	Mejora MAGA y Aumento Capacidad Tratamiento Gases PAS	28	28	0	0	-	1.891
-	Producción de ácido sulfúrico	-167	-	-167	-	-	-
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>						
1.1.1	Tratamiento Gases de Cola PAS 116.000 Nm <sup>3</sup> /h	2.888	510	514	514	1.350	1.650
1.1.2	Eliminación Humos Negros y Opacímetro HA (Tres)	1.554	-	1.554	0	-	-
1.1.3	Tratamiento Gases Metalúrgicos HE	636	220	111	111	195	236
1.1.4	Infraestructura Monitoreo Control	1.120	-	1.120	0	-	-
1.1.5	Filtro de Mangas Secador (MP)	140	-	140	-	-	-
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>6.338</b>	<b>729</b>	<b>3.438</b>	<b>625</b>	<b>1.545</b>	<b>1.885</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>9.108</b>	<b>1.293</b>	<b>3.974</b>	<b>1.156</b>	<b>2.685</b>	<b>5.675</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>7.306</b>	<b>1.318</b>	<b>1.329</b>	<b>1.329</b>	<b>3.330</b>	<b>4.086</b>
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	3.428	703	709	709	1.307	1.604
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	3.879	615	620	620	2.023	2.483
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>16.414</b>	<b>2.611</b>	<b>5.303</b>	<b>2.485</b>	<b>6.015</b>	<b>9.762</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los costos determinados corresponden de disposición de residuos sólidos (riles no incluidos), reactivos y principalmente Energía Eléctrica, situación que se destaca, porque conlleva asociado también a requerimiento de reforzamiento de instalaciones de distribución y subestaciones eléctricas no consideradas en esta estimación.

Otros criterios relevantes usados en la determinación de costos, son los gastos de mantención asociados a las plantas como una porcentaje de la inversión, y la inclusión de recursos de operación para la medición discreta periódica y/o el monitoreo continuo de emisiones de cada una de las chimeneas

### 10.7.3 Energía Incremental y agua adicional requerida

El consumo adicional de energía eléctrica se ve incrementado significativamente por los volúmenes de gases a procesar, estimados considerando un estándar de 3.300 MWH/a por cada 100.000 Nm<sup>3</sup>/h en los sistemas de aspiración o VTI y de 5.200 MWH/a por igual base al estar enclavados a una torre lavadora.

El costo promedio usado para el mediano plazo de Energía Eléctrica alcanza a 84,5 US\$/MWH.

Lo anterior lleva a determinar un consumo anual de 15,3 GWH/a para lograr el cumplimiento de límites y una fijación de 95% y 30,9 GWH/a para el escenario de 96%. De igual modo habrá un incremento del consumo de agua industrial de reposición, según se indica en tabla siguiente:

Tabla 10.7.3 Consumo incremental de energía y agua industrial

Inversiones kUS\$	Puesta en operación	Consumo incremental Energía	Consumo incremental de agua
Fundición Ventanas	Año	MW/h/a	m3/a
<b>Escenario 95% S</b>			
Captación y tratamiento gases fugitivos de sangrías CT/HE 120 kNm <sup>3</sup> /h	2014	6.240	1.800
Adición de carga fría por campana o culata CPS	2014	100	
Mejora MAGA y aumento capacidad tratamiento gases PAS	2015	329	
<b>Límites de chimenea</b>			
Tratamiento gases de cola PAS 116.000 Nm <sup>3</sup> /h	2016	6.032	1.740
Eliminación humos negros y opacímetro HA (tres)	2015	2.236	
Tratamiento gases metalúrgicos HE	2015	2.600	750
Infraestructura monitoreo control	2015	-	
Filtro de mangas secador (MP)	2012-2014	-	
Consumo MWh/a		15.301	
<b>Escenario 96% S</b>			
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	2017	8.320	2.400
Captación y tratamiento gases campana secundaria CT	2017	7.280	2.100
Consumo MWh/a		30.901	

Nota: El valor en color azul corresponde al consumo incremental de petróleo en t/a, para eliminación de humos negros.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 10.7.3.a Incremento Energía Eléctrica

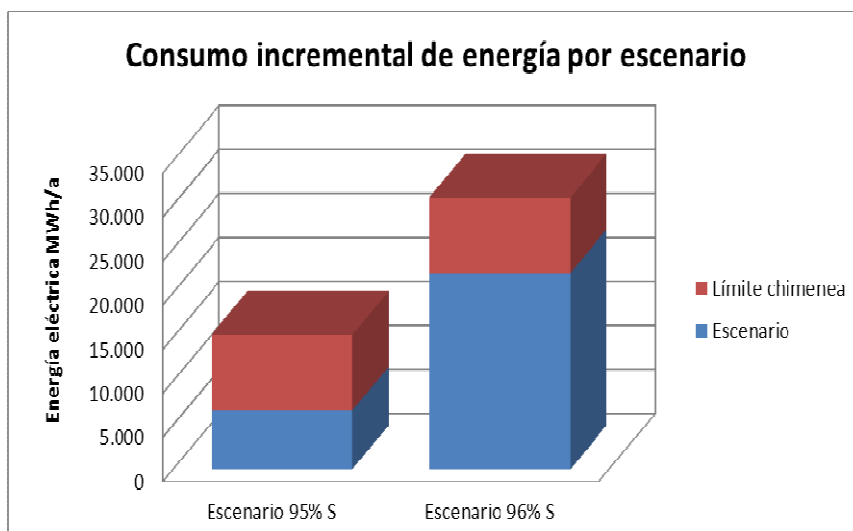
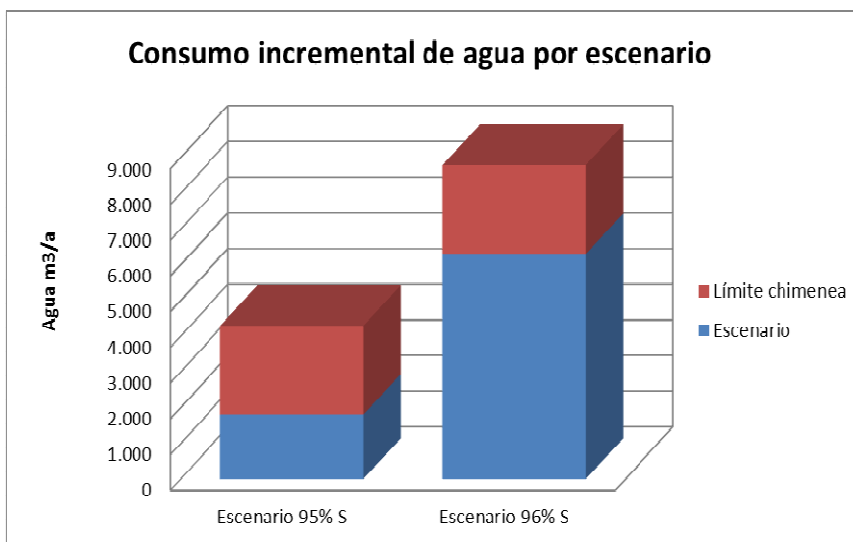


Gráfico 10.7.3.b Incremento Consumo Agua industrial



Fuente Gráficos 10.7.3 a y b: Elaboración propia.

## 10.8 Resultados Técnico/Económico de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición Ventanas, para que dicha instalación pueda enfrentar nuevos escenarios regulatorios en el mediano plazo, que le permitirían reducir emisiones de Azufre y Arsénico, con niveles de captura y fijación de 95% y 96% en azufre, y superiores en arsénico.

Lo anterior junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales permiten evaluar el valor presente (VAC) de dichas medidas, la determinación del Costo anual equivalente (CAE) como una medida comparativa la razón costo efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE), que como referente de otras instalaciones y específicamente para 6 fundiciones de Canadá alcanzaba en un estudio normativo al año 2004, entre 1.900 a 2.000 US\$ canadienses por t de SO<sub>2</sub> abatida <sup>34</sup>, costo que crece exponencialmente para mayores niveles de abatimiento.

### 10.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

La reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> As por escenario y la inclusión de límites se muestra en las figuras 10.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes y ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor.

---

<sup>34</sup> Technical Assessment of Environmental Performance Emission Reduction Options for the base metals Smelter, p. internet [www.ec.gc.ca](http://www.ec.gc.ca), Canada, 2004.

Gráfico 10.8.1.a Emisiones Ventanas de SO<sub>2</sub> por escenario

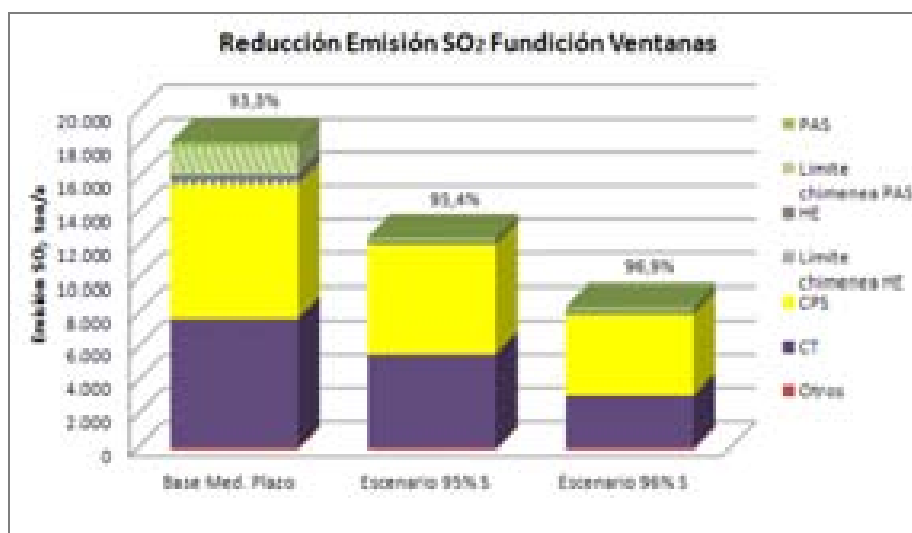
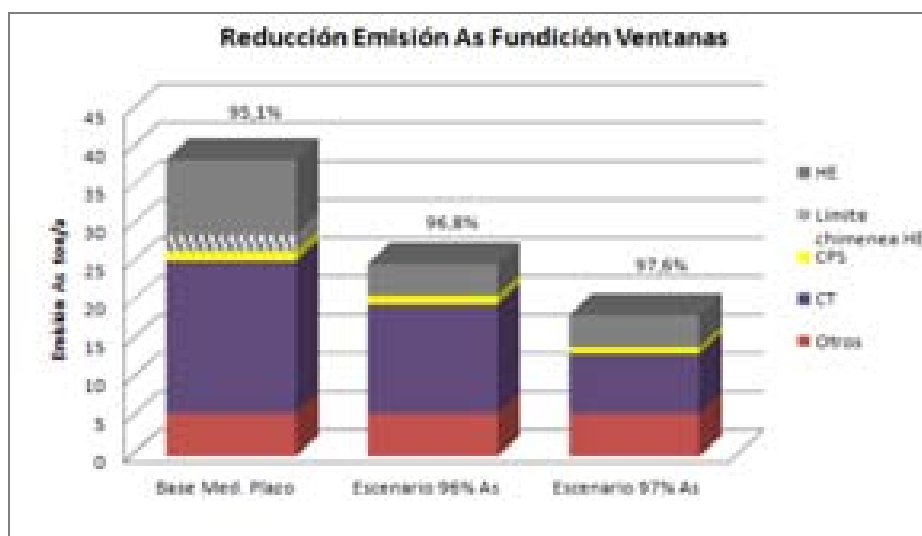


Gráfico 10.8.1.b Emisiones Ventanas de Arsénico por escenario

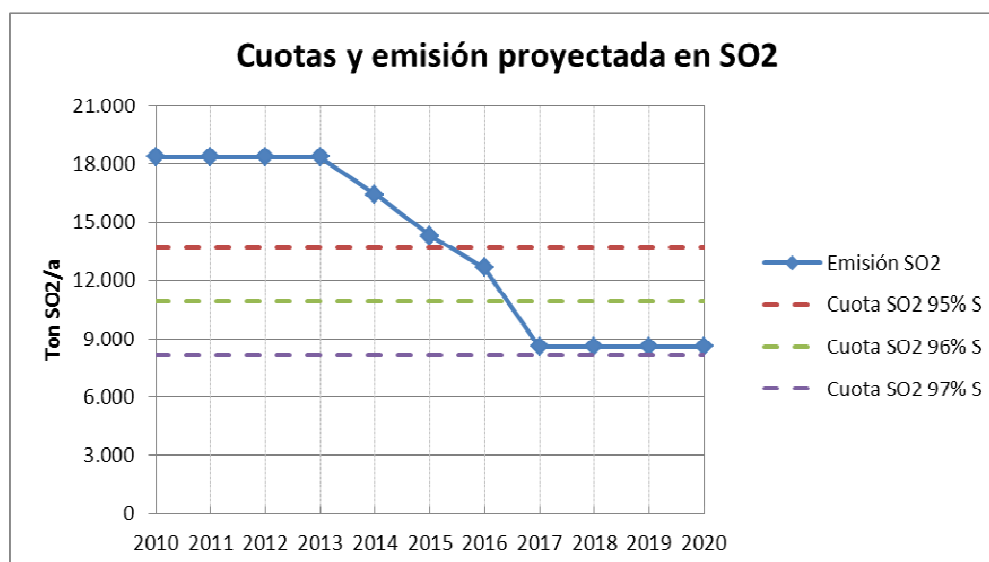


Fuente Gráficos 10.8.1 a y b: Elaboración propia.

## 10.8.2 Cumplimiento de cuotas con emisiones proyectadas Azufre y Arsénico

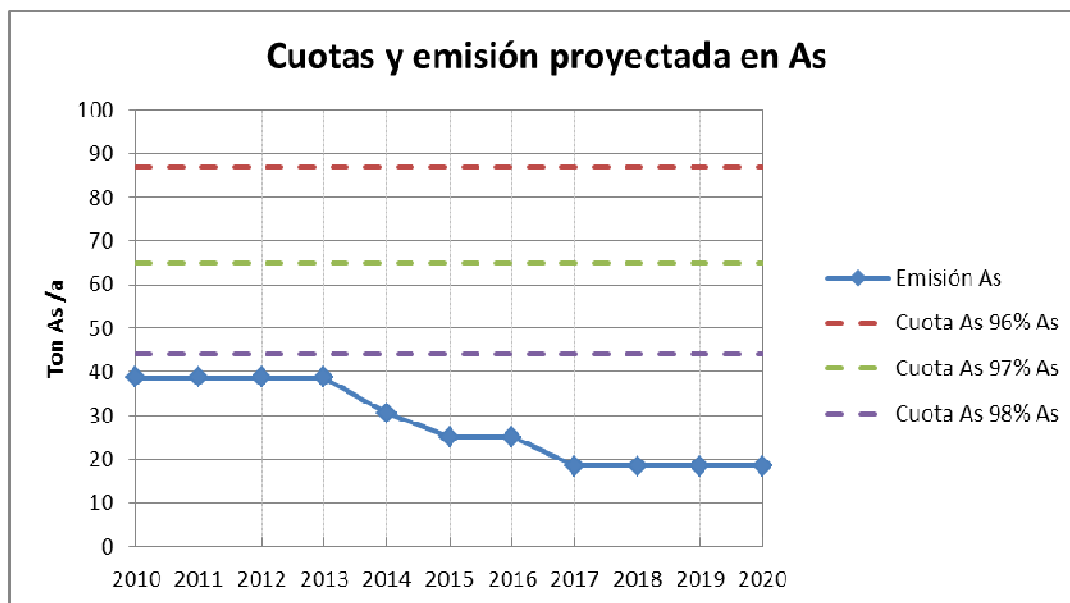
La figura siguiente muestra que a partir del año 2017 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> para el escenario 96%, proyectadas por la autoridad para Ventanas en los primeros diez años y con holgura para el As.

Gráfico 10.8.2.a Cuotas de Emisiones SO<sub>2</sub> Ventanas por escenario



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10.8.2.b Cuotas de Emisiones As Ventanas por escenario



Fuente: Elaboración propia.

### 10.8.3 Determinación del VAC y CAE

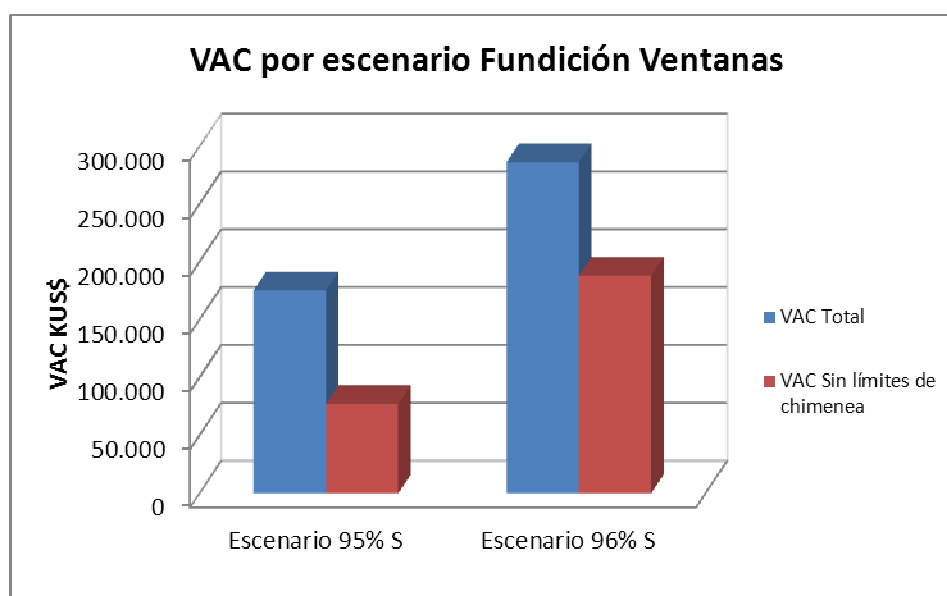
La determinación en un período de 25 años del valor actualizado de costos (VAC) para la Fundición Ventanas, considerando una tasa social de descuento de 6%, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes VAC, valorizados como escenarios acumulativos:

- Escenario de 95% Fijación S, VAC total de 175,5 MUS\$, de los cuales 98,1 MUS\$ corresponden a soluciones para control de límites en chimenea.

- Escenario de 96% Fijación S, VAC de 286,37 MUS\$ de los cuales 98,1 MUS\$ corresponden a soluciones para el control de límites en chimenea.

Respecto a los resultados, la última cifra de VAC puede afectar la supervivencia de esta instalación maquiladora de concentrados. La situación se visualiza en el gráfico siguiente:

Gráfico 10.8.3.a Valor Actualizado de Costos soluciones medioambientales  
Ventanas por escenario



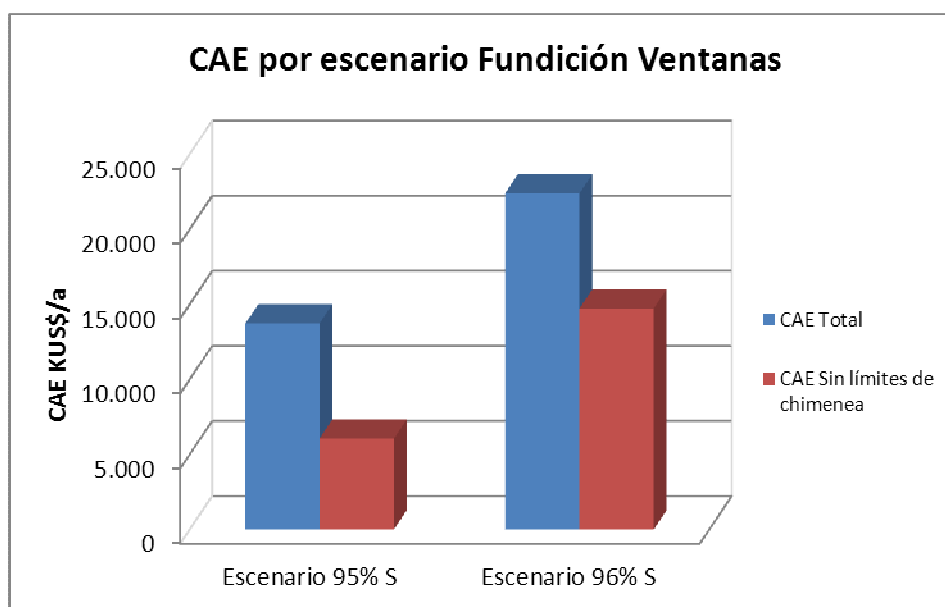
Fuente: Elaboración propia.

De igual modo la determinación del costo anual equivalente o valor en cuotas fijas anuales (CAE) para la Fundición Ventanas, considerando una tasa social de descuento de 6% en un período de operación dentro de los 25 años, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes CAE:

- Escenario de 95% Fijación S, CAE de 13.728 kUS\$/a
- Escenario de 96% Fijación S, CAE de 22.396 kUS\$/a

La situación se visualiza en el gráfico siguiente:

Gráfico 10.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medioambientales Ventanas por escenario



Fuente: Elaboración propia.

#### 10.8.4 Relación Costo/Efectividad para el Control de Emisiones de SO<sub>2</sub>

Con los antecedentes mostrados en el cálculo de costo efectividad para el cumplimiento de escenarios de captura de azufre, lleva a un costo unitario de **2.800 US\$/t abatida de SO<sub>2</sub>**, para ambos escenarios incluyendo límites por chimenea que gravan significativamente los planes, y si éstos no son considerados implican 1.900 y 2.300 US\$/ t abatida de SO<sub>2</sub> para los escenarios de 95% y 96% respectivamente.

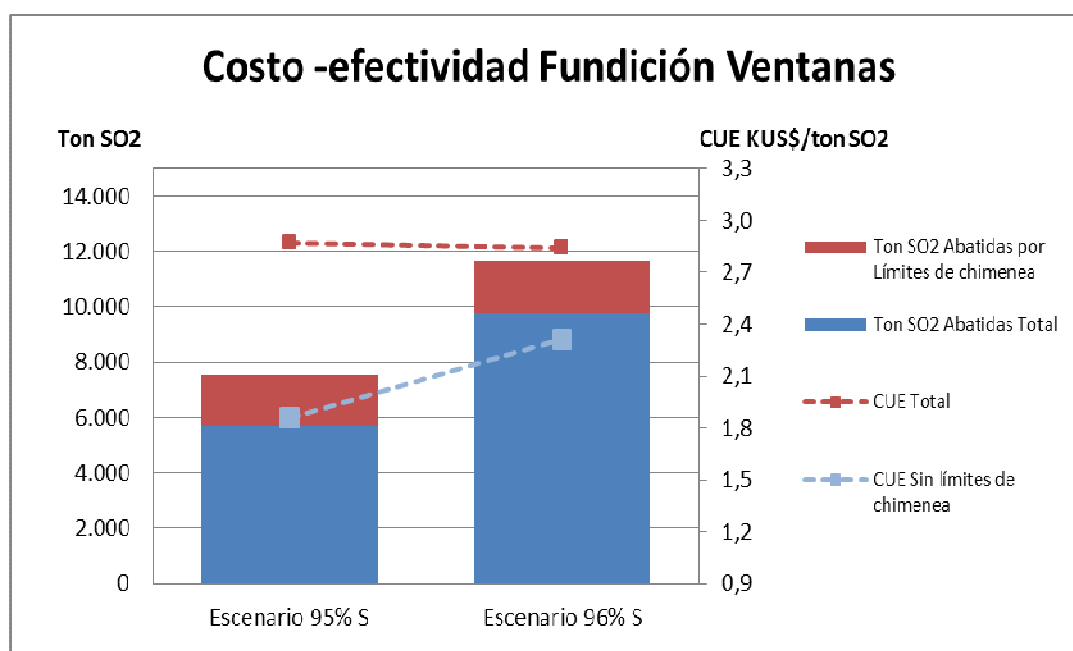
Tabla 10.8.4 Indicadores económicos por escenarios Fundición Ventanas

ITEM	DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
		INVA	VAC	CAE	CUE
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>	<b>50.950</b>	<b>77.384</b>	<b>6.054</b>	<b>1,9</b>
1.1	Adición de Carga Fría por Campana CPS	1.746	1.868	146	
1.2	Captación y Tratamiento Gases Fugitivos de Sangrías CT/HE 120 kNm3/h	29.443	57.050	4.463	
1.3	Mejora MAGA y Aumento Capacidad Tratamiento Gases PAS	19.761	20.020	1.566	
-	Producción de ácido sulfúrico	-	-1.554	-122	
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Tratamiento Gases de Cola PAS 116.000 Nm3/h	19.913	44.662	3.494	
1.1.2	Eliminación Humos Negros y Opacímetro HA (Tres)	3.129	17.607	1.377	
1.1.3	Tratamiento Gases Metalúrgicos HE	9.817	15.745	1.232	
1.1.4	Infraestructura Monitoreo Control	1.315	11.752	919	
1.1.5	Filtro de Mangas Secador (MP)	7.034	8.339	652	
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>41.208</b>	<b>98.105</b>	<b>7.674</b>	<b>5,1</b>
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>92.158</b>	<b>175.489</b>	<b>13.728</b>	<b>2,9</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>53.329</b>	<b>110.802</b>	<b>8.668</b>	<b>2,8</b>
2.1	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CPS	24.283	51.244	4.009	
	Captación y Tratamiento Gases Campana Secundaria CT	29.046	59.558	4.659	
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>145.487</b>	<b>286.291</b>	<b>22.396</b>	<b>2,8</b>

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 10.8.4 Costo Unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida Ventanas



Fuente: Elaboración propia.

#### 10.8.5 Proyección de Futuro para la Fundición Ventanas

La situación de arquitectura tecnológica asociada a la mantención del proceso de conversión con giros CPS y emisiones secundarias, también en el proceso de fusión, gravan significativamente a esta instalación, adyacente a una zona poblada, por lo que el Consultor recomienda analizar un cambio tecnológico estructural, para eliminar el proceso tradicional de conversión, incorporando nuevas tecnologías de conversión continua, anteriormente exploradas a nivel de perfil, a través del estudio FURE centro, según datos bases del consultor.

Con centros poblados cercanos a la fundición Ventanas, es ambientalmente poco recomendable mantener el proceso de fusión, por lo que debería profundizarse el escenario en que Ventanas tiene solo conversión continua (FCF) y Refinería Electrolítica. Bajo tal condición la fusión de concentrados se realiza en Caletones y el metal blanco se envía a Ventanas para su procesamiento.

## 11. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICION POTRERILLOS

### 11.1 General

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Estimar costos de inversión y operación incrementales de fundición Potrerillos, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento y/o fiscalización, producto de estas inversiones.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa social de descuento 6%).
- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad nominal de procesamiento de concentrados para cada fundición registrada el año 2010, esto es, que la cantidad de concentrados que cada faena puede procesar se mantiene inalterada respecto del año base seleccionado.

Lo anterior con el fin de establecer el impacto de cada medida de reducción de emisiones en el costo marginal de procesamiento de concentrado, mediante la implementación de sistemas de control y seguimiento.

La fundición Potrerillos considera una capacidad nominal de fusión anual de 680 kt/año de concentrados de cobre, con un contenido medio de S inicialmente indicada de 32% y bajo los últimos antecedentes de 33,6%.

## 11.2 Descripción General de la Fundición

La Fundición Potrerillos inició sus operaciones el año 1917 con horno reverbero como fundición integrada a la Mina el Salvador, aunque en la actualidad el aporte en sus concentrados es mínimo, pasando a constituirse en una maquiladora

En el año 1988, como primera iniciativa de carácter ambiental se realizó la reubicación de la escuela (D-4) a un sector de menor impacto en emisiones del Fundición. De similar manera el año 1990 se concretó una práctica de flexibilidad operacional para el procesamiento de concentrados externos de mayor contenido de As en horarios de menor impacto en el campamento Potrerillos.

En el año 1992, la División Salvador instaló una red de monitoreo de calidad del aire en sectores circundantes a la instalación, en el marco de la entrada en vigencia del Decreto 185. Los resultados entregados por la red el año 1994, oficializados al Servicio de Salud, indicaron que la calidad del aire estaba lejana al cumplimiento de normas.

El año 1997 mediante el Decreto supremo N°18 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, se declaró el campamento Potrerillos como zona saturada por anhídrido sulfuroso y material particulado respirable, así como una área circundante. Lo anterior provocó que en Junio del año 1999 el DS N°179 lleve a establecer un Plan de Descontaminación del área circundante a la Fundición Potrerillos.

El Plan de descontaminación de Potrerillos propuesto por la División y aprobado por CONAMA, consideró inversiones del orden de 295 MS\$ (MALIGAS (año 1997), Planta de Acido (año 2000), Control de emisión de Polvos, Mejoramiento de Campanas y Reemplazo del Horno Reverbero por un nuevo CT de 5 m  $\Phi$  \* 22m L, que pasó a constituir su única unidad de fusión a partir del año 2002). El proyecto que materializó estas Inversiones se denominó Cambio Tecnológico de la Fundición Potrerillos y se consolidó en operación el año 2003.

Dado que para cumplir normas aplicables a la población, se requerían altas inversiones, que hacían inviable el negocio Fundición y refinería, el año 1999 se erradicó el campamento Potrerillos y se colocó en operación un centro de Alojamiento (CAP) en el área externa, así como un nuevo sistema de turnos de operación, medidas que aunque permiten la operación, gravan los costos de operación y rendimientos del sistema productivo.

#### 11.2.1 Descripción de la Planta

La Fundición Potrerillos al año 2010 está compuesta por los siguientes equipos principales:

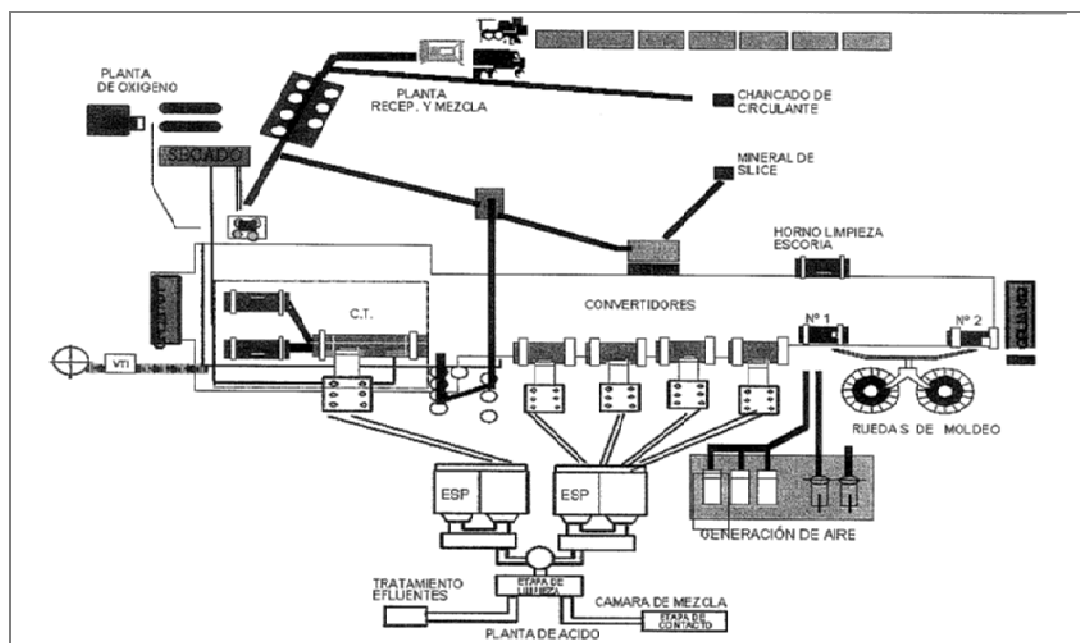
Recepción de concentrados : Cancha, Buzones y sistema de mezcla de concentrados en correas.

Secado	:	1 secador Fluosólido (120 t/h) 9% a 0,2% humedad
Horno de fusión	:	1 Convertidor Teniente (5m $\Phi$ x 22 m L)
Limpieza de escoria	:	2 Hornos Basculantes HLE de (4,5 m $\Phi$ x 12,7m L)+ 1HLE de 4,5 m $\Phi$ +10,5 mL
Convertidores	:	3 Peirce-Smith (4m $\Phi$ x 9,1m L) + CT4(deshabilitado)
Hornos de Ánodos	:	2 Hornos basculantes Refino (4 m $\Phi$ x 9,1m L)
Ruedas de Moldeo	:	2 ruedas (twin) Demag (48 t/h)
Plantas de oxígeno:	:	1 planta oxígeno 95% pureza (550 t/d)

Plantas de Acido : 1 simple contacto– volumen 200 kNm<sup>3</sup>/h -9,5% SO<sub>2</sub>  
 Otros : Planta de neutralización ácido débil con cal  
 Dimensiones nave : 213 m L \*23 m A \*19 m H

La disposición esquemática de equipos se muestra en figura 11.2.1

Figura 11.2.1 Disposición general de equipos y sistema de manejo de gases primarios de fundición Potrerillos.



Fuente: Información entregada MMA.

## 11.2.2 Descripción Sistema Manejo de Gases

El sistema de manejo de gases primarios considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas de los reactores, hasta el ingreso de los gases en la planta de limpieza y producción ácido sulfúrico.

Esta instalación cuenta con un sistema de captura de gases primarios, con succión desde una planta de ácido y apoyo de ventiladores de tiro Intermedio (VTI) en las líneas del CT y de los CPS, diseñado para capturar y conducir los gases provenientes del CT y un CPS en etapa de soplado. El sistema está constituido por campanas primarias en el CT (5m  $\Phi$  \* 22m L) y 3 CPS (4 m  $\Phi$  \* 9,1m L), las que se encuentran en estado deficitario y operan con capacidad limitada de succión, presentando a la fecha alrededor de 15 años en operación.

Para el enfriamiento de gases utilizan, tanto en el CT como en los CPS, cámaras con enfriadores radiantes que permiten el enfriamiento de los gases a alrededor de 400°C para la siguiente limpieza del polvo de los gases en precipitadores electrostáticos secos (2 disponibles para el CT y 2 para los CPS). La descarga y unificación de los gases se realiza en una conexión tipo pantalón, que permite la mezcla de gases CT y CPS, para alimentar la etapa de limpieza húmeda y lavado de gases y siguiente alimentación a la planta de contacto. El ácido débil impuro, producido en la etapa de limpieza, se trata en la planta de tratamiento de efluentes, generando un residuo arsenical.

Potrerillos también cuenta con un sistema básico de captura de gases fugitivos de la sangría de metal blanco del CT, que a través de un VTI, son evacuados por chimenea, para mejoramiento del ambiente laboral.

Durante el primer semestre del año 2010<sup>35</sup> se realizó para Potrerillos un Estudio de Diagnóstico de la situación del Sistema de gases del CT y CPS, a esa fecha con problemas, con soluciones de ingeniería a nivel básico para mejorar la fijación de azufre, a través de un mejor control de tiraje, inexistente a tal fecha y la disminución de la formación de  $\text{SO}_{3(g)}$  en el tren de gases para obtener una mayor

---

<sup>35</sup> Información entregada MMA 2011 Reunión con Fundición Potrerillos Mayo 2011 Presentación Fundición Potrerillos: Proyecto Integral Mejoramiento de Captación y Procesamiento de gases.

producción de ácido sulfúrico y mejorar la estabilidad operacional, que por corrosión afectaban la operación generando infiltración de aire y continuas intervenciones de mantención. Se incluyeron recomendaciones de ingeniería a la problemática de esa fecha del MALIGAS:

- Modificación del enfriador radiativo del CT,
- Disminución de las condiciones de infiltración y mejoramiento del tiraje en las campanas de los Convertidores Peirce
- Potenciamiento de los enfriadores radiativos de los CPS,
- Reemplazo de la conexión tipo pantalón por un mezclador anular horizontal de gases

Como parte de esta ingeniería se determinaron las inversiones requeridas y los beneficios esperados de menor mantención que hacían el proyecto de potenciamiento económicamente viable. Las inversiones no incluían intervenciones de ductos del MALIGAS, Precipitadores Electroestáticos, Ventiladores de Tiro Inducido, (VTI), juntas de expansión, Dumpers y válvulas, tornillos sin fin y otros.,

De acuerdo a la información actualizada de la Fundición Potrerillos, en general a inicios del año 2012 el estado del sistema de manejo gases primarios<sup>36</sup> es más precario aún y decreciente, evidenciando un alto grado de corrosión y un alto nivel de acumulación y arrastre de polvos hacia la planta de ácido. La corrosión se ha generado porque el sistema de enfriamiento de gases del CT, produce  $SO_3$  en cantidades mayores a las normales y consecuentemente frente enfriamientos se genera condensación de ácido sulfúrico, el cual corroe los equipos tales como VTI, precipitadores electroestáticos y ductos.

---

<sup>36</sup> Diagnostico Interno Fundición Potrerillos- Cochilco 2012, avalado en el diagnóstico por estudios y expertizaje del consultor.



La acumulación de polvos en los sistemas de manejo de gases y el arrastre de éstos hacia la Planta de Acido, es generado por una operación deficiente de los precipitadores electroestáticos secos, declarando también falta de capacidad en los equipos de limpieza actuales, los cuales además están en muy mal estado.

Producto de las condiciones deficientes antes descritas, la Planta de Acido recibe gases con contenidos de polvo y  $\text{SO}_3$  muy superiores a los de diseño, lo cual ha provocado un alto nivel de deterioro de sus componentes, tales como los precipitadores electroestáticos húmedos, la torre de secado y el reactor de conversión, poniendo en riesgo su continuidad operacional.

Para superar los problemas antes descritos, Potrerillos desarrolló otro estudio a nivel conceptual, para una solución técnica integral desde la boca de los hornos hasta la planta de ácido, que permita aumentar la producción de acido, que al 2011 aportó no más del 73% del abatimiento, disminuir costos de mantenimiento y consumo de energía, para asegurar la continuidad operativa de la Fundición y mejorar significativamente la fijación de Azufre.

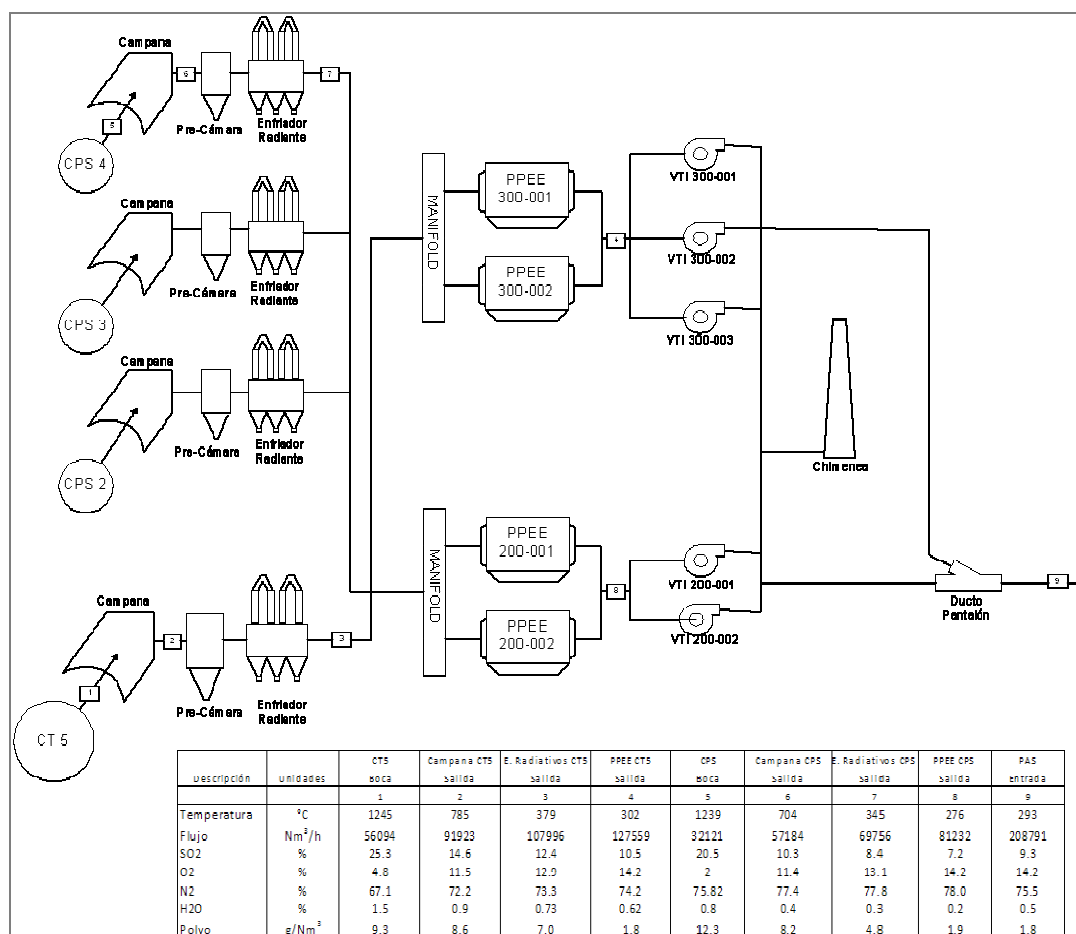
La solución elegida por la Fundición Potrerillos considera:

- Cambiar las campanas actuales del Convertidor Teniente y de los Convertidores Pierce Smith por otras de diseño mejorado, que capten con mayor eficiencia y dilución no superior al 100% los gases de proceso, con una mejor vida útil.
- Incorporar equipos de enfriamiento mixto evaporativo-radiativo para los gases del CT para enfriar mas rápido los gases y así disminuir la formación de  $\text{SO}_3$ . Esta es una solución técnica en aplicación en los Convertidores Teniente de la Fundición Chuquicamata y de la Fundición la Caridad en México.

- Ampliar la capacidad de limpieza de gases del Convertidor Teniente, incorporando un nuevo precipitador electroestático y reparando los existentes para así asegurar la llegada de gases limpios de polvo a la planta de ácido.
- Reemplazar ductos de gases con un nuevo trazado para disminuir distancias, pérdidas de carga y controlar velocidad, para evitar acumulación de polvos en su interior.
- Realizar una reparación mayor (Overhaul) o reemplazo de los Precipitadores electroestáticos de los gases de los CPS, para asegurar la llegada de gases limpios a la planta de ácido (PAS).
- Realizar el cambio del actual ducto pantalón (conexión y mezcla) por un mezclador anular horizontal que asegure una buena mezcla de los gases del Convertidor Teniente con los gases de los Convertidores Pierce Smith, sin producir perturbaciones al tiraje en la boca de estos equipos, que dificultan la captura, generando emisiones por boca y chimenea desde los CPS.
- Realizar una reparación mayor a los Equipos de Limpieza húmeda de la Planta de ácido, en especial a los precipitadores electroestáticos húmedos
- Reemplazar e Instalar un nuevo convertidor catalítico en la Planta de Ácido con doble contacto y absorción.
- Incorporar un sistema de recuperación de calor en el nuevo convertidor catalítico de la planta, con producción de vapor para la Refinería y de aire precalentado para el secado de concentrados. Solución estudiada a nivel de factibilidad, que representaría un costo de 10.9 MUS\$.

Con las medidas indicadas para la Recuperación del sistema de Manejo y Tratamiento de Gases, la Fundación Potrerillos estima logra en el mediano plazo un mejoramiento sustantivo de la fijación de S (80,5 % a 95%) y de arsénico (90 a 95%), que la instalación fija en polvos a ventas o procesamiento externo y en los residuos de la planta de efluentes.

Figura 11.2.2.a Diagrama de flujo del Sistema de Manejo de gases primarios de fundición Potrerillos



Fuente: Información entregada MMA.

La fundición Potrerillos con la configuración de equipos existentes al año 2010, declaró una fijación de azufre de 83,5% y una emisión 39.500 t/a de S y 460 t/a de As, pero como antes se indicara su situación del sistema MALIGAS se ha agravado a la fecha, informando a inicios del año 2012 una fijación promedio de S de 81,5% y un abatimiento como ácido sulfúrico del azufre no superior al 73%.

Reflejo de ésta condición se muestra, para dos meses tipo del año 2010 y 2011 balances de S, extraídos de información generada a la autoridad ambiental, en que en el transcurso de 18 meses, la fijación de azufre ha disminuido en 5 unidades porcentuales.

Figura 11.2.2.b Balances de S mensuales comparativos 2010 y 2011 Fundición Potrerillos.

**Balance resumido S mes típico 2010 (Mayo 2010)**

Entradas	t/s	%S	tf
Concentrados de cobre	56.650	32,2	18.216
Fundentes	7.568	0,5	40
Materiales circ fddos	13.253	3,5	468
Total	77.471	24,2	18.724

Salidas	t/s	%S	tf	% alimentado
Escoria Botadero	33.201	0,6	213	1,1
Polvos de Maligas	603	11,8	71	0,4
Materiales circ generados	27.853	0,9	251	
Acido comercial producido	45.454	32,2	14.619	78,1
Efluentes acidos a Lix (m3-t)	10.242	4,0	405	2,2
Total fijado sólidos, líquidos	117.353	13,3	15.560	83,1
Emisión S en gas mes			3.164	16,9

**Balance resumido S mes típico 2011 (Diciembre 2011)**

Entradas	t/s	%S	tf
Concentrados de cobre	53.425	32,6	17405
Fundentes	6.345	0,3	21
Materiales circ fddos	14.311	4,4	632
Total	74.081	24,4	18059

Salidas	t/s	%S	tf	% alimentado
Escoria Botadero	27.495	0,7	191	1,0
Polvos de Maligas	431	11,7	50	0,3
Materiales circ generados	31.934	1,3	406	
Acido comercial producido	40.750	32,2	13.105	72,6
Efluentes acidos a Lix	12.875	2,8	354	2,0
Total fijado sólidos, líquidos	113.485	12,4	14.106	78,1
Emisión S en gas mes			3.953	21,9

Fuente: Elaboración propia con información entregada MMA.

La instalación de sistemas secundarios para captura y tratamiento por neutralización de gases fugitivos, requeridos para cumplimientos superiores de la norma, se hace factible solo una vez superados los problemas del sistema primario, como situación futura a incorporar en su diseño.

---

### 11.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

#### 11.3.1 Emisión de Azufre y Arsénico

Dados los antecedentes del Sistema de manejo de gases indicado en el punto anterior y ara efectos de constituir la situación base más realista para el mediano plazo para la Fundición Potrerillos, que permita la con la determinación de fuentes para el análisis de soluciones, se incorporó a la modelación los antecedentes actualizados de los dos últimos años que indican la emisión de gases de CPS por chimenea, como manifestación final de la incapacidad del sistema para la captura de gases. Lo anterior por sobre los déficit de eficiencia de los sistemas de limpieza y tratamiento que han llevado a la planta de ácido de Potrerillos, a un bajo nivel de conversión y producción de ácido final

Adicionalmente, las proyecciones actualizadas de calidad de concentrados a tratar en el mediano plazo por la Fundición Potrerillos, evidencian una proyección de mayor contenido medio de Azufre en los concentrados 33,6% en lugar del 32,0% inicialmente indicado, situación que será sensibilizada para efectos de cuotas limites de emisión.

Lo anterior ha llevado a establecer como situación base una captura total de 82,3% +/-1,2% de S y de Arsénico asociado de 88,1% según se muestra en la tabla 11.3.1 siguiente.

Tabla 11.3.1: Distribución de emisión de azufre y arsénico Fundición Potrerillos

Potrerillos	Med. Plazo	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	680.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,0
Ley Media As en concentrados (%)		0,5

Emisión por Fuentes t/a Fundición Potrerillos	Base Med. Plazo	
	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario CT (giro+campana)	11.650	164
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	2.085	27
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	14.478	12
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HLE	299	152
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d
Gases de cola PAS	10.641	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	239	37
Otras fuentes y ajuste	1.205	1
Ajustes	-2.019	12
<b>Total emisión t/a</b>	<b>38.578</b>	<b>405</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 1,2</math> % S</b>	<b>82,3</b>	<b>88,1</b>

Fuente: Elaboración propia.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S.

### 11.3.2 Emisión de mercurio

La generación del mercurio está fuertemente relacionada con el tratamiento de concentrados de cobre con contenido de oro, el que normalmente se encuentra acompañado con mercurio, situación frecuente en las fundiciones maquiladoras. Esto generará emisiones en su estado gaseoso, mayoritariamente en la etapa de

fusión de los concentrados, que constituirán emisión en la medida que la captura de gases no sea suficiente estanca.

Se estima que sobre el 98 % de mercurio contenido en los concentrados (7ppm según antecedentes informados para la Fundición Potrerillos) pasa a la fase gaseosa y se distribuye en forma similar al As, vale decir preferentemente hacia los gases. Por lo tanto, la mayor proporción del mercurio ingresado a la fundición es capturado en los Precipitadores Electrostáticos secos, pasando a constituir parte de los polvos y sólo una proporción llega a la PAS, donde es captado en la etapa de limpieza húmeda.

La presencia de Hg en los concentrados procesados por la Fundición Potrerillos ha sido evidenciada en el total de concentrados tratados al año 2010, aunque no esta claro la fuente que lo contiene en mayor magnitud, por lo que como primera medida, ésta impureza deberá ser caracterizada en los concentrados para su posible segregación hacia una planta externa con sistema dedicado de control (torre desmercurizadora en PLG) o eventualmente considerar su instalación. Similar seguimiento del metal deberá realizarse en los polvos a ventas y efluentes arsenicales

Como referencia se indica que la Fundición Ventanas tiene una alimentación promedio de 9 ppm en concentrados y llega a producir un acido de calidad comercial, con un contenido no superior a 1 ppm de Hg, contando adicionalmente con una torre desmercurizadora en su PLG, que opera según requerimientos, con un eficiencia inferida de 55%

### 11.3.3 Emisión de material particulado

Las emisiones de material particulado de secado, fusión y conversión contienen elementos tóxicos tales como: arsénico, mercurio, plomo, níquel, entre otros. Las

emisiones fugitivas pueden ser mayores que las recuperadas, por lo tanto, el control de las emisiones fugitivas es especialmente importante.

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

En el caso de Potrerillos, la operación de secado dispone de un sistema de control de material particulado, constituido por filtros de mangas en la descarga del secador y transporte neumático del concentrado seco.

La línea base de material particulado es alta, por sus condiciones de ubicación geográfica, en una zona desértica montañosa expuesta a vientos, condición que lleva a la Fundición Potrerillos a cautelar las operaciones de manejo y descarga de materiales, en razón a mantener estándares de minimización de pérdidas metalúrgicas.

#### 11.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica

La arquitectura tecnológica CT/CPS/HLE tiene la característica de poseer tres operaciones unitarias con equipos que basculan, uno con proceso semi continuo y los otros dos con procesos discontinuos, lo que significa que la boca de estos equipos con su campana primaria de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto, se genera emisión de contaminantes como SO<sub>2</sub>, As, Hg, MP y otros.

La boca de los hornos de limpieza de escoria se utiliza también para el carguío de escorias a tratamiento y la descarga de las escorias finales limpias, después de un tratamiento de reducción del contenido de magnetita que permite la separación metal escoria de bajo contenido de cobre. El proceso de reducción genera también desorción de arsénico hacia los gases, condición que junto a parámetros técnico-económicos de recuperación metalúrgica, está llevando a las



Fundiciones al reemplazo de estos hornos, por el tratamiento de escorias vía: enfriamiento, chancado y planta de flotación, retornando el sulfuro de cobre recuperado como concentrado de escoria a fusión.

Como antes se ha indicado, para obtener una buena captura de gases primarios (Fusión y Conversión), en las campanas primarias se trata de generar una depresión o tiraje (-50 PA) en la descarga boca-campana. Dicha succión, más la necesaria para compensar las pérdidas de carga de los equipos de enfriamiento, (cámaras, tubos radiativos), los de limpieza de polvos (precipitadores electrostáticos) y las pérdidas en ductos, es generada por los ventiladores de tiro inducido (VTI) normalmente hasta la mezcla de gases y luego por el Ventilador principal de la Planta de ácido, la que con el apoyo ductos apropiados, permiten la conducción estanca de los gases hasta la planta de lavado y tratamiento final del  $\text{SO}_2$  hasta ácido sulfúrico.

El bajo nivel de captura y fijación de azufre en ácido de la Fundición Potrerillos evidencia deficiencias en el control de tiraje y el estado deficitario del sistema manejo de gases (MALIGAS), cuyos problemas de formación de  $\text{SO}_3$ , corrosión, alta infiltración de aire en el tren de gases, baja eficiencia de captura de polvos en precipitadores, ensuciamiento con polvo y contaminación del catalizador de la planta de Ácido, hacen insuficiente el sistema para la captura total de los gases primarios generados, obligando a descarga por chimenea auxiliar de gases, generando emisiones por presurización en la boca de los reactores, alta generación de ácido débil en la planta de lavado y una baja tasa de conversión del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en el reactor catalítico, con menor producción final de Ácido Sulfúrico.

Adicionalmente, emisiones importantes son también generadas cuando estos equipos están recibiendo materiales por boca, girando desde su normal posición de soplado y por lo tanto, emitiendo todos los gases de proceso a la atmósfera,

situación válida para el CT y especialmente los CPS, bajo su esquema de operación batch. (Carguío - soplado - vaciado del reactor).

Además de los diseños, la mantenibilidad, disponibilidad de los equipos existentes, un adecuado sistema de control de tiraje y las prácticas operacionales de cada instalación, constituyen factores relevantes en el control de emisiones. Similares configuraciones tecnológicas, a la existente en Potrerillos logran niveles de fijación de Azufre superiores al 92%, como son los casos de Ventanas y Altonorte.

#### 11.5 Selección de Soluciones Tecnológicas de Control de Emisiones de Azufre y Arsénico

De los antecedentes de la Distribución Base de Azufre y Arsénico ajustada para Potrerillos indicada en el punto 11.3, para la condición nominal se puede concluir que las emisiones relevantes de S se encuentran en:

- La boca del CT por las dificultades de control de tiraje en esta unidad de alta capacidad, que constituye la unidad de fusión de concentrados y que a mediano plazo, incrementará fusión con la mezcla concentrado fresco mas concentrado de escoria.
- La boca de los Convertidores Pierce Smith por las dificultades de control de tiraje, que produce emisiones fugitivas de las campanas primarias y también por chimenea, por la insuficiencia del sistema para captar estos gases.
- Emisiones de SO<sub>2</sub> en los gases de cola de la Planta de Acido, actualmente de simple contacto y baja eficiencia de conversión, por el contenido de polvo hasta ésta arrastrado, que incrementa pérdidas de carga, envenena el catalizador y reduce la succión de gases desde la planta.

Fuente generadora de emisiones de Arsénico y en menor proporción de azufre, son los Hornos de Refino y los Hornos de Limpieza de escorias que la Fundición Potrerillos sustituirá en el corto plazo (2012- 2013) por una Planta de Flotación de escoria, por ventajas económicas y ambientales.

Dada la lejanía de las instalaciones de Potrerillos con centros poblados, condición sobre la cual el MMA ha recomendado la aplicación de límites por chimeneas, no se han incorporado soluciones técnicas para el tratamiento de los gases de los Hornos de Refino que generan emisiones menores de azufre y Arsénico, aunque sí la presencia de humos visibles por hollín.

Los proyectos y soluciones tecnológicas para alcanzar los escenarios de fijación en estudio se han priorizado tomando en consideración los antecedentes de la actual situación de Potrerillos, la necesaria recuperación del sistema de gases MALIGAS, y bajo la consideración de las fuentes de mayores emisiones

El tratamiento integral de los gases secundarios de CT, sangrías y gases fugitivos de CPS, que requeriría de al menos dos plantas de lavado de gases, no ha sido considerado conveniente o efectivo por el alto volumen y baja concentración del gas en condición normal. Por lo tanto como medida para implementar una mayor nivel de captura y fijación solo se visualiza la implementación de campana secundaria en el Convertidor Teniente, a tratar en una planta de lavado alcalino de gases, junto a los gases de la sangría de metal blanco, solución viable una vez consolidada anteriores mejoras al sistema primario.

#### 11.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

Las medidas que Fundición Potrerillos deberá materializar para asegurar su continuidad operativa y lograr el mejoramiento del desempeño medioambiental de la fundición son:

- Recuperación del sistema de Manejo de Gases y Planta de ácido Sulfúrico

Este proyecto a realizar entre los años 2012 y mediados del año 2014, considera implementar soluciones para lograr una solución integral desde la boca de los hornos hasta la producción de ácido, reduciendo costos de mantención y asegurando la disponibilidad operacional de la Fundición.

La solución contempla reducir la formación de  $\text{SO}_3$  en el Convertidor Teniente, incorporando un sistema mixto de enfriamiento, con atomización previa de agua al enfriamiento radiativo, generar las aislaciones térmicas necesarias, ampliar la capacidad de limpieza de gases del Convertidor Teniente incorporando un nuevo precipitador electroestático para esta línea de gases.

Considera también un nuevo trazado de ductos de Gases para disminuir distancias pérdidas de carga y acumulación de polvos en su interior, En la línea de los Convertidores Peirce Smith se considera adecuar los sistemas de enfriamiento y un Overhaul mayor a los Precipitadores Electroestáticos para asegurar la llegada de gases limpios hacia la planta.

El proyecto incorpora el cambio del actual ducto pantalón por un mezclador anular horizontal que asegure una mezcla adecuada del CT con los de CPS, sin producir perturbaciones al tiraje en boca de estos hornos.

Se realizaría también una Reparación Mayor a los equipos de limpieza húmeda de la Planta de Acido con trabajos en la planta de Lavado de Gases, planta de Secado y Precipitadores húmedos. El proyecto se complementa con otro en la planta de acido donde se considera el cambio del Convertidor catalítico (reactor de conversión), la incorporación de sistema doble contacto y absorción y recuperación de calor.

En opinión del Consultor, el proyecto debería incorporar un sistema de control automático de tiraje del sistema MALIGAS, para asegurar las condiciones de tiraje y captura requeridas en las campanas primarias.

El desarrollo a la fecha de este proyecto se encuentra a nivel de ingeniería conceptual estimando una inversión del orden de 75.000 kUS\$, para obtener una recuperación del sistema, incrementando la fijación de Azufre en alrededor de 5,4% y cerca de 2,1% para arsénico, a partir del segundo semestre del 2014.

- Reemplazo de Hornos de Limpieza de Escoria por Planta de flotación

Como se indicara anteriormente, la Fundición Potrerillos reemplazará la operación de los Hornos de tratamiento de escoria por una planta de flotación, bajo la perspectiva de mejorar el rendimiento metalúrgico de esa instalación y también reducir emisiones de azufre y arsénico en el orden de 0,8% y 4,5% respectivamente.

El proyecto que cuenta con un desarrollo a nivel básico, se implementará entre los años 2012 y 2013, con una inversión de 80.800 kUS\$, que incluye los sistemas necesarios para el enfriamiento lento de escorias, pre-chancado, chancado, molienda, flotación, secado del concentrado de escoria, para retorno al proceso de fusión.

- Potenciamiento del Planta acido, cambio a doble absorción

El proyecto de potenciamiento de la planta de acido de Potrerillos a realizar entre los años 2013 y mediados del 2014, considera el reemplazo del reactor de catálisis, la incorporación de un sistema intermedio de absorción, que permita aumentar la eficiencia de la planta hasta niveles del 99,2% esperables

para plantas de doble absorción, reduciendo emisiones de gases de cola e incorporando un sistema de recuperación de calor para la generación de vapor.

Con el proyecto se obtendrá una mejora sustantiva de emisiones de S, evaluada en 4,5% del azufre nuevo alimentado a la fundición. La inversión estimada para este cambio se estima en 52.000 kUS\$.

El potenciamiento de la planta debería considerar disponibilidad, adaptación a condiciones de mayor concentración de SO<sub>2</sub> y capacidad asegurada (200.000 Nm<sup>3</sup>/hr bs), para no frenar el proceso de tratamiento de gases primarios, frente condiciones mejoradas de captura y manejo de gases primarios.

- Reemplazo de campanas primarias de CT y CPS

Este proyecto a implementar entre los años 2014 y 2015, deberá incorporar campanas de alta eficiencia acordes al objetivo de incremento de captura esperado de 2,1% del S alimentado a la Fundición, reduciendo infiltración y posibilitando, en el caso del diseño de la campana del Convertidor Teniente, la posterior operación de una campana secundaria.

La inversión se estima en 15.000 kUS\$ y el reemplazo de la campana del CT, se debe realizar durante una detención general de la planta.

- Campana secundaria CT, sangría metal blanco y lavado alcalino de gases fugitivos

Con el mejoramiento en la captación y limpieza de azufre y arsénico del sistema primario de la fundición, es factible incrementar la fijación de Azufre y Arsénico, para tratar de alcanzar el escenario cercano al 96% de abatimiento a

través de la instalación de una campana secundaria capaz de capturar los gases provenientes de las operaciones de giro del reactor, a las que necesariamente esta expuesto, así como los gases de la sangría de metal actualmente evacuados hacia una chimenea, los que serían conducidos hacia una planta de lavado alcalino de los gases de un volumen aproximado de 230.000 Nm<sup>3</sup>/hr, cuyo diseño las fases de ingeniería deberán precisar.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de pre factibilidad, factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirían tener operativo el sistema no antes del año 2017, año al que el resto de las fundiciones podrán tener mayores niveles de desarrollo en la captura y tratamiento de gases diluidos La inversión estimada para esta solución para abatir aproximadamente 1,4% del S se estima en 34.500 kUS\$.

En resumen los proyectos necesarios para el cumplimiento de escenarios previstos para la Fundición Potrerillos se indican en la tabla siguiente

Tabla 11.5.1 Proyectos de reducción Emisiones Fundición Potrerillos

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Potrerillos</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	5,4	2,1	23.514	71
Planta Flotación de escorias	0,8	4,5	3.348	154
Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	4,2	-	18.186	-
Reemplazo campanas CT- CPS	2,1	1,3	9.179	46
<b>Escenario 96% S</b>				
Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	1,4	1,2	6.015	41

Fuente: Elaboración propia.

## 11.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con las mejoras indicadas en los puntos anteriores, la distribución de emisiones por fuentes expresadas en toneladas se modifica y queda como sigue:

Tabla 11.6 Emisiones según Captura/Fijación de Azufre y Arsénico por escenario  
Fundición Potrerillos

<b>Potrerillos</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	680.000
Ley Media S en concentrados (%)		32,0
Ley Media As en concentrados (%)		0,5

Emisión por Fuentes t/a Fundición Potrerillos	Base Med. Plazo		Escenario de 95% S		Escenario de 96% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario CT (giro+campana)	11.650	164	3.834	54		
Residual tratamiento fugitivo primario CT	n/d	n/d	n/d	n/d	1.611	23
Fugitivo Sangría CT MB/Escoria	2.085	27	2.085	27	1.300	17
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	14.478	12	5.948	5	5.948	5
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HLE	299	152				
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d	15	1	15	1
Gases de cola PAS	10.641	0	1.548	0	1.548	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Refino HA	239	37	239	37	239	37
Otras fuentes y ajuste	1.205	1	1.205	1	1.205	1
Ajustes	-2.019	12	-3.409	9	-3.409	9
<b>Total emisión t/a</b>	<b>38.578</b>	<b>405</b>	<b>11.464</b>	<b>134</b>	<b>8.456</b>	<b>92</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 1,2\%</math> S</b>	<b>82,3</b>	<b>88,1</b>	<b>94,7</b>	<b>96,1</b>	<b>96,1</b>	<b>97,3</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	27.114	271	3.008	41
Toneladas de ácido incremental (t/a)			79.498		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

En la sección de ajustes de la tabla 11.6 para el escenario de 95% y 96% S se incluye adicionalmente un ajuste por circuito de flotación de escorias debido a que existe una menor recirculación de azufre y arsénico en el proceso. En la flotación de escorias una parte del azufre y en mayor proporción de arsénico son descartados en los relaves.



Se destaca al respecto que el cumplimiento del escenario de 95% fijación de S no se evalúa como totalmente asegurado, ya que se obtiene 94,7% de fijación S, estando dentro del rango bajo de dispersión  $\pm 1,2\%$  S esperable de la estimación, que considera el mejoramiento total de procesamiento de los gases primarios y el aporte menor del reemplazo de hornos por flotación de escoria. El escenario de 96% de fijación, se lograría con el tratamiento de gases secundarios del CT, que implica generación de residuos sólidos a disposición como yeso impuro.

#### 11.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Con las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As, Hg y MP, y poder dar cumplimiento a los escenarios definidos, ellos se cumplirían según el siguiente cronograma:

Tabla 11.6.1 Cronograma de cumplimiento de escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION POTRERILLOS					
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO				
	2012	2013	2014	2015	2016
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 82,3%			92,6%	94,7%	96,1%
Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxx		
Planta Flotación de escorias	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx			
Potenciamiento y Cambio a doble abсорción PLG	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx			
Reemplazo campanas CT- CPS			xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	
Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT				xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx

Fuente: Elaboración propia.

#### 11.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Largo Plazo

Para el consultor es importante relevar la importancia de la validación de la Ingeniería del sistema general de manejo de gases primarios de la Fundición Potrerillos y su contrastación con las soluciones de otras instalaciones de mejor desempeño. Potrerillos tiene el desafío de incrementar los niveles de fijación de S por sobre los de su actual estatus, mejorar competitividad ya que se encuentra en una zona eminentemente industrial, que facilita el procesamiento de concentrados de mayor As, impureza que presenta un buen nivel de abatimiento.

La realización de los proyectos requiere también revisar las prácticas y procedimientos operativos para que el conjunto de operaciones unitarias con las que debe operar y especialmente gestionar el entrenamiento del personal para migrar hacia una cultura operacional que conlleve el tratamiento de gases como algo prioritario. Lo anterior junto a los factores de diseño, las prácticas de mantención, determinan el rendimiento de los equipos de fijación, su estatus y la vida útil de éstos, bajo las condiciones de eficiencia requeridas.

En la práctica, lo normal es que de tiempo en tiempo, cualquier equipo del conjunto descrito anteriormente baje su eficiencia o falle y consecuentemente como conjunto no se cumpla el nivel de captura y emisión de contaminante, circunstancia reflejada en la actual situación de la Planta de Acido y el Maligas. La Fundición Potrerillos queda bajo el análisis realizado y los niveles proyectados de abatimiento, expuesta a mayor riesgo de incumplimiento de las cuotas de emisión.

Una oportunidad adicional de mejoramiento del desempeño ambiental es avanzar paralelamente en la implementación de la Conversión Continua, sobre la cual la Fundición Potrerillos ha desarrollado estudios previos ya que cuenta con un reactor adaptable al proceso, pudiendo así mejorar la continuidad y calidad de los gases de conversión hacia la planta de ácido.

### 11.6.3 Comentarios sobre infraestructura, espacios disponibles e interferencias

No se prevén interferencias mayores en la implementación de medidas de control de emisiones planteadas, a excepción del potenciamiento de la Planta de Acido, las que se prevén factibles de implementar durante detenciones programadas de la instalación.

Detenciones mayores pueden impactar esta instalación maquiladora, con un costo económico no relevante y contrastable con posibles detenciones obligadas de la fundición para cumplir cuotas de emisión (hoy limitadas por normativa vigente a 50.000 t/a de S).

De acuerdo evaluación del año 2010 y en base antecedentes de Potrerillos, se valorizaba el costo de lucro cesante, en un costo diario cercano a 60 kUS\$/día de detención, considerando 1.500 t/d de fusión y 1.200 t/d de ácido producido, en esta instalación, bajo una condición de cargo de tratamiento conservador de aproximadamente 47 US\$/t y la consideración de un costo fijo fundición de 60US\$/t.

## 11.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 11.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión +/- 30%, las inversiones requeridas por escenario para la Fundición Potrerillos alcanzan a 238,4 MUS\$ para el escenario 95% y 275,3 MUS\$ para el escenario de 96%. La estimación de las inversiones de capital considera adicionalmente un monto pre-inversional de 7% de la inversión total, considerando ya realizados parte de la Ingeniería conceptual.

Tabla 11.7.1.a Costos de Capital por escenario Fundición Potrerillos.

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub Total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	75.000	5.250	80.250	20 años
1.2	Planta Flotación de escorias	80.800	5.656	86.456	20 años
1.3	Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	52.000	3.640	55.640	18 años
1.4	Reemplazo campanas CT- CPS	15.000	1.050	16.050	15 años
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>		<b>222.800</b>	<b>15.596</b>	<b>238.396</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>				
2.1	Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	34.500	2.415	36.915	20 años
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>		<b>257.300</b>	<b>18.011</b>	<b>275.311</b>	

Fuente: Elaboración propia, por el Consultor

La Tabla 11.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 11.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Potrerillos.

COSTOS DE INVERSIÓN								
ITEM	DESCRIPCIÓN	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>								
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>							
1.1	Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	0	30.250	25.000	25.000	0	0	0
1.2	Planta Flotación de escorias	0	46.056	40.400	0	0	0	0
1.3	Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	0	29.640	26.000	0	0	0	0
1.4	Reemplazo campanas CT- CPS	0	0	1.050	7.500	7.500	0	0
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>		<b>0</b>	<b>105.946</b>	<b>92.450</b>	<b>32.500</b>	<b>7.500</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>							
2.1	Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	0	0	1.208	1.208	17.250	17.250	0
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>		<b>0</b>	<b>105.946</b>	<b>93.658</b>	<b>33.708</b>	<b>24.750</b>	<b>17.250</b>	<b>0</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 11.7.2 Costo Incrementales de Operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en -1,7 MUS\$/año para el escenario 95% y 6,15 MUS\$/año para el escenario de 96%, muestran la conveniencia técnico-económica de la Recuperación Integral del sistema de Manejo y tratamiento de gases primarios, ya que permitirá aumentar producción de ácido y reducir los costos de mantención. Los últimos años estos costos registran valores cercanos a los 6.800 kUS\$/año, asumiendo por efectos del proyecto una reducción mínima del 20% de éstos.

Las medidas de control propuestas para el escenario de 95%, permiten proyectar una mayor producción de ácido sulfúrico de alrededor a de 79.500 t/a, producción incremental de ácido como un crédito al costo ya que genera un ingreso marginal neto de 25 US\$/t.

No se consideran costos de operación de la planta de flotación de escorias por considerarse compensables con los mayores ingresos por recuperación de esta inversión de reemplazo de los hornos de tratamiento de escorias, con beneficio ambiental.

Tabla 11.7.2 Costos de Operación incrementales por escenario Fundición  
Potrerillos

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS INCREMENTALES					
		COSTO INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>						
1.1	Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	-1.359	-	-	-1.359	-	23.514
1.2	Planta Flotación de escorias	No considera	-	-	-	-	3.348
1.3	Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	1.659	1.142	0	517	-	18.186
1.4	Reemplazo campanas CT- CPS	2	0	2	0	-	9.179
-	Producción de ácido sulfúrico	-1.987	-	-1.987	-	-	-
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>-1.686</b>	<b>1.142</b>	<b>-1.986</b>	<b>-842</b>	<b>0</b>	<b>54.227</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>7.841</b>	<b>1.011</b>	<b>1.019</b>	<b>1.019</b>	<b>4.792</b>	<b>6.015</b>
2.1	Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	7.841	1.011	1.019	1.019	4.792	6.015
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>6.155</b>	<b>2.153</b>	<b>-967</b>	<b>177</b>	<b>4.792</b>	<b>60.243</b>

Fuente: Elaboración propia, por el Consultor

El tratamiento de gases secundarios del CT y sangría de MB, requerido para lograr el escenario de 96% de fijación de S, conlleva mayores costos de energía, materiales y especialmente gastos en gastos de transporte y disposición del residuo sólido considerado a 295 US\$/t (Disposición con Ecometals, riles no incluidos). También la determinación de costos ha incorporado los gastos de mantención, asociados a la nueva planta como un porcentaje de la inversión.

### 11.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

El consumo de energía eléctrica se ha evaluado considerando que se verá incrementado fundamentalmente por la incorporación de la Planta de Molienda y Flotación de Escorias y en menor medida, por el potenciamiento de la planta de ácido a doble absorción. Esta última situación es revisable en base la reducción factible por la recuperación del sistema de manejo de gases, con disminución de pérdidas de tiraje y menor exigencia al soplador. El nuevo sistema de captura y

tratamiento de gases fugitivos CT, sangría de metal conllevará aumento del requerimiento energético

Lo anterior lleva a determinar un consumo anual de 39,3 GWH/a para lograr una fijación de 95% cercano a la meta de emisiones y 51,2 GWH/a para el escenario de 96%.

En relación a la Energía Eléctrica no se incluye requerimiento de reforzamiento de instalaciones de distribución y subestaciones eléctricas.

Tabla 11.7.3 Consumo Incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía	Consumo incremental de agua
Fundición Potrerillos	Año	MW/h/a	m3/a
<b>Escenario 95% S</b>			
Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	2014	-	-
Planta Flotación de escorias	2014	25.773	339.009
Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	2014	13.520	14.602
Reemplazo campanas CT- CPS	2016-2015	-	10.000
Consumo MWh/a		39.293	
<b>Escenario 96% S</b>			
Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	2017	11.960	3.450
Consumo MWh/a		51.253	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11.7.3 a Incremento consumo Energía Eléctrica

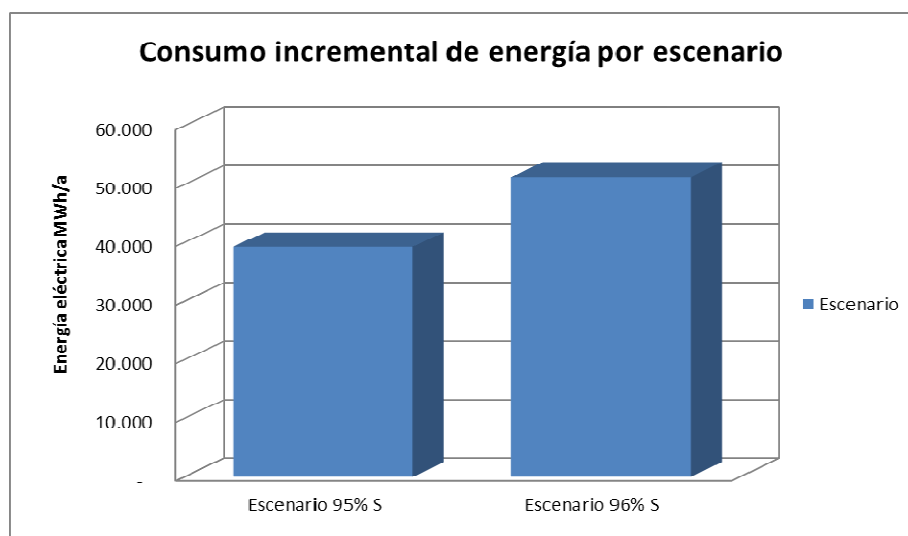
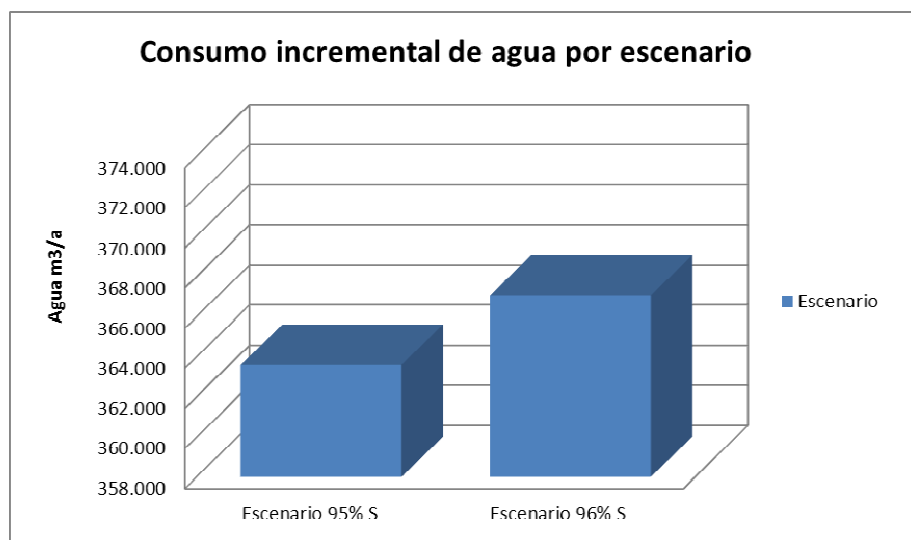


Figura 11.7.3 b Incremento consumo Agua Industrial



Fuente Gráficos 11.7.3 a y b: Elaboración propia.



El consumo de agua está fundamentalmente afectado por los requerimientos de molienda y flotación, considerando el agua de reposición necesaria para un sistema operando con descarga de relaves con 50% sólidos y 9% de humedad en el concentrado de escoria.

#### 11.8 Resultados Técnico/Económicos de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición Potrerillos, para que dicha instalación pueda enfrentar nuevos escenarios regulatorios en el mediano plazo. Se considera mantener su capacidad nominal de fusión de 680 kt/a y reducir emisiones de azufre y Arsénico, con niveles de captura y fijación de 95% y 96% en azufre y superiores en arsénico.

Lo anterior, junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales, permiten evaluar el valor presente de costos de inversión y operación (VAC) de dichas medidas, la determinación del costo anual equivalente (CAE) y como una medida comparativa la razón costo efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE).

##### 11.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por Escenarios

Se ha incluido, como base fija el diferencial de emisiones entre el valor declarado y el modelado equivalente a 1,2 % de fijación de S, considerado como fuente no identificada. Sobre esto la reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenario y la inclusión de límites se muestra en figuras 11.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes, ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor, y ajuste por circuito de flotación de escorias.

Figura 11.8.1.a Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> por escenarios

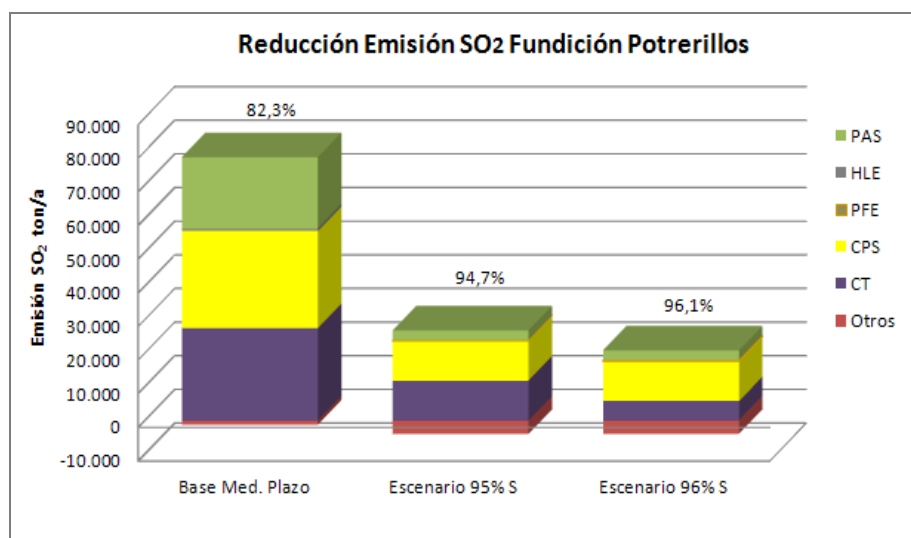
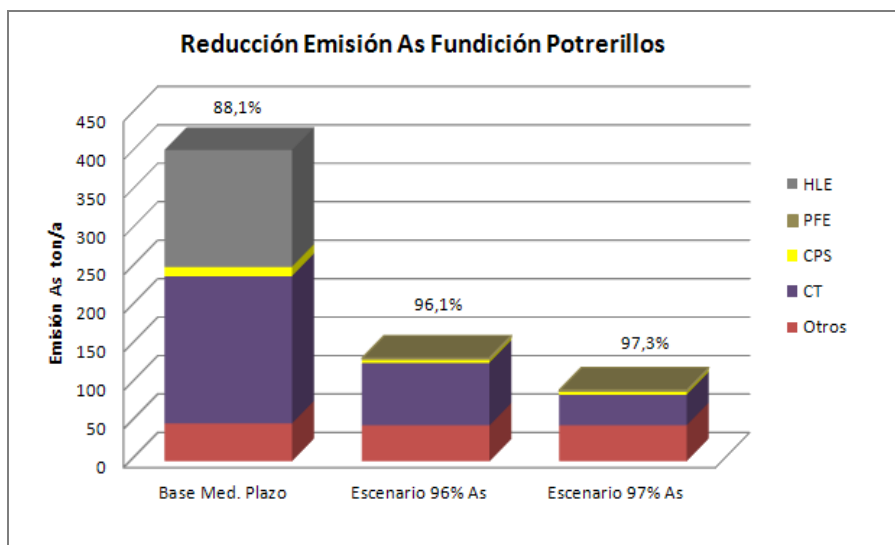


Figura 11.8.1.b Reducción de Emisiones de As por escenarios



Fuente Gráficos 11.8.1 a y b: Elaboración propia.

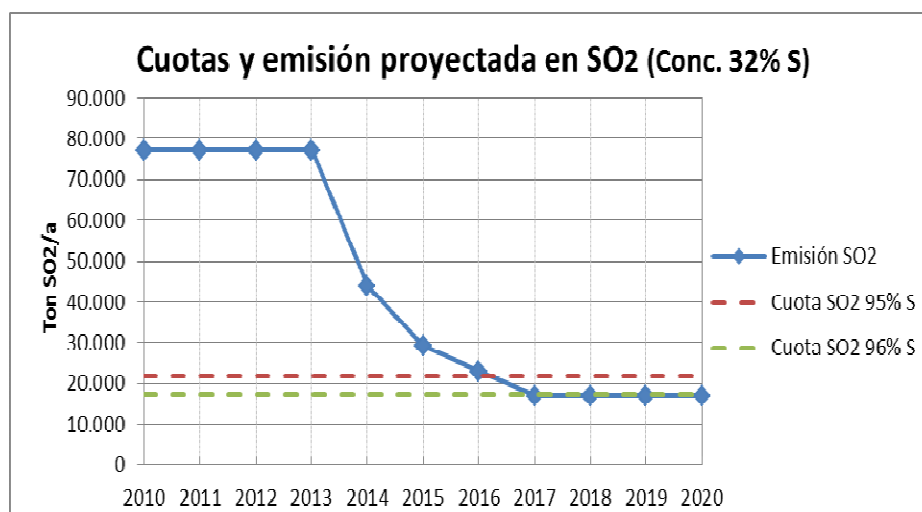
Ambos gráficos poseen una disminución de emisiones en lo referido a otros (color rojo), debido a que en esta sección está incorporado también la reducción de emisión que produce el circuito de flotación de escorias, ya que disminuye la recirculación de azufre y arsénico a la fundición.

#### 11.8.2 Cumplimiento de cuotas con la proyección de emisiones proyectadas SO<sub>2</sub> y As

La figura siguiente muestra que a partir del año 2017 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> proyectados por la autoridad para la Fundición Potrerillos con un nivel de fusión de 680 kta y concentrados de 32,0% S, así como las proyectadas para As.

En el intertanto al establecimiento de la nueva normativa, la Fundición Potrerillos tiene el compromiso del Plan de Descontaminación de no sobrepasar 50.000 t/a de emisión de S, alcanzando la emisión durante el año 2011 a 48.703 t de S, según antecedentes del Balance de Azufre a la Autoridad Ambiental (Diciembre 2011) año 2011 .

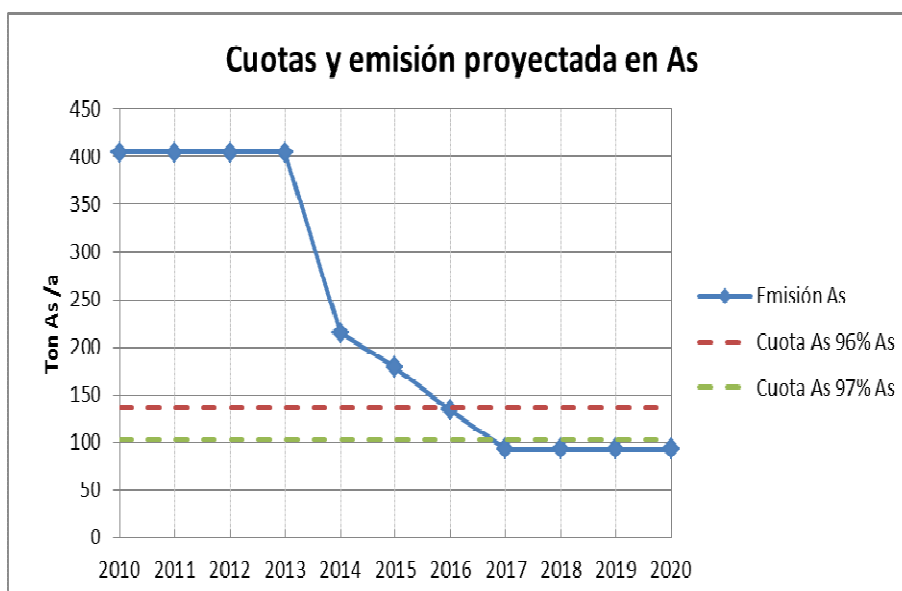
Figura 11.8.2.a Cumplimiento de cuotas proyectadas de SO<sub>2</sub> fundición Potrerillos



Fuente: Elaboración propia.

En relación al cumplimiento de emisiones inferiores a las cuotas de As establecidos por escenario, estas presentan niveles de holguras, al haber sido establecidas sobre un límite superior (0,5% en concentrado) al medio proyectado de 0,4%.As.

Figura 11.8.2.b Cumplimiento de cuotas proyectadas de As fundición Potrerillos



Fuente: Elaboración propia.

En razón a que el plan de Negocios de la Fundición Potrerillos ha cambiado su contenido medio de S en concentrados incrementándolo de 32% a 33,6%, dicha situación genera un incremento neto de un 5% en el nivel de emisión por tal causa, situación que dentro la fijación de cuotas de emisión y su rango de dispersión debería considerar, para no implicar una exigencia adicional de difícil control en una instalación principalmente maquiladora. Con respecto al arsénico el contenido medio de As en los concentrados decrece de 0,5% a 0,28%, dicha situación generaría una disminución en el nivel de emisión de As de 45% para el escenario de 95%.

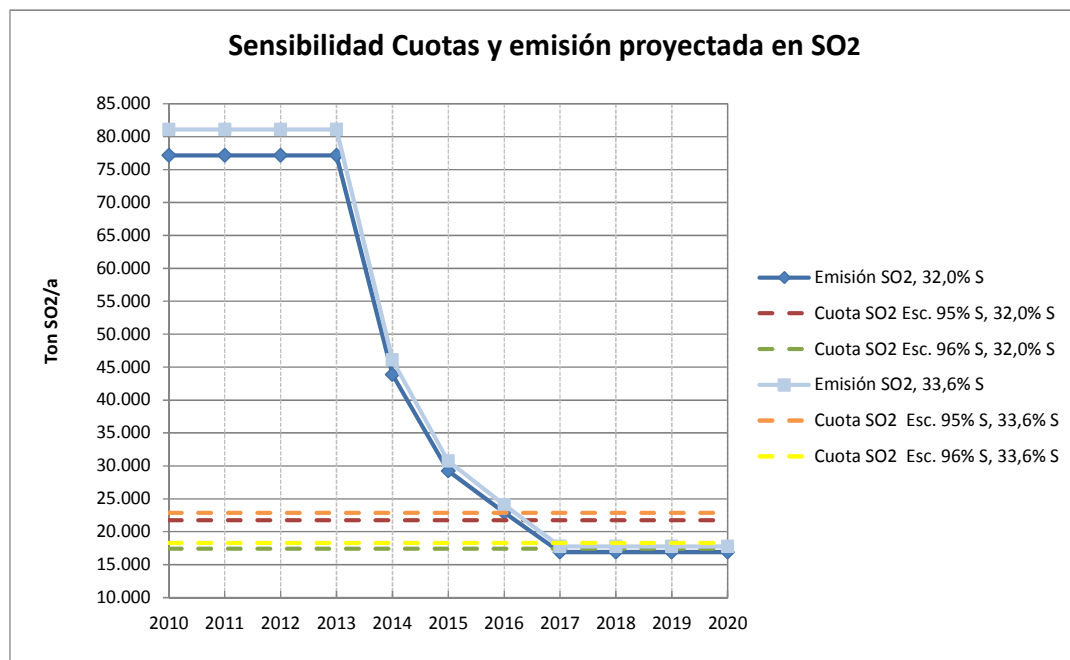
Tabla 11.8.2 Cuotas SO<sub>2</sub> 32 - 33,6% S y As 0,5% - 0,28% en Concentrado

<b>Variabilidad para Cuotas Emisión (t/a)</b>	<b>Cuota límite SO<sub>2</sub> conc.32,0%S (t/a)</b>	<b>Cuota límite SO<sub>2</sub> conc.33,6%S (t/a)</b>	<b>Cuota límite As conc.0,5%As (t/a)</b>	<b>Cuota límite As conc.0,28%As (t/a)</b>
Escenario 95% S	21.760	22.865	136	75
Escenario 96% S	17.408	18.292	102	56

Fuente: Elaboración propia.

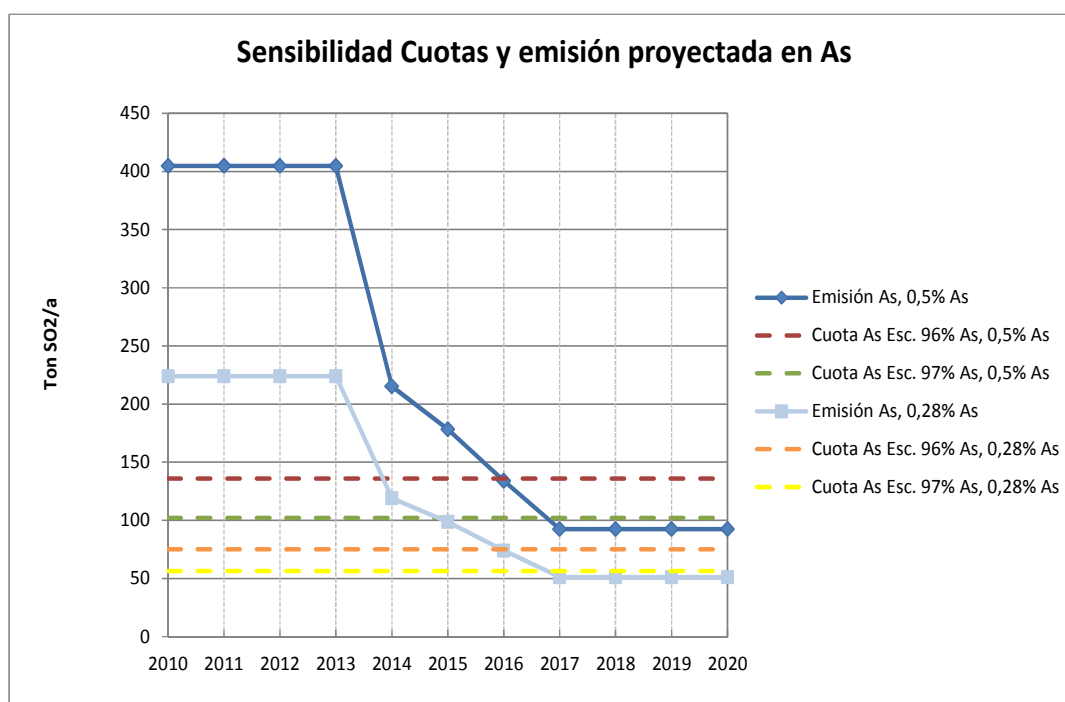
La dispersión proyectada se refleja en gráfico siguiente:

Figura 11.8.2.c Sensibilidad Cumplimiento de cuotas emisión de SO<sub>2</sub> fundición Potrerillos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11.8.2.d Sensibilidad Cumplimiento de cuotas emisión de As fundición Potrerillos



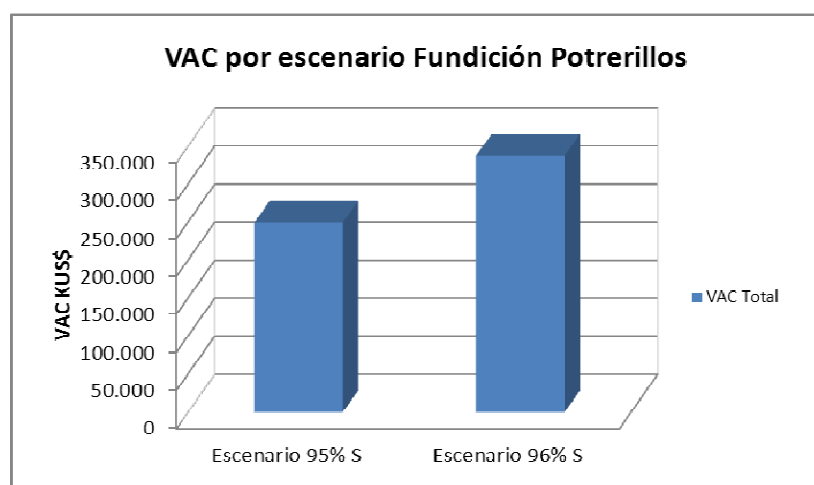
Fuente: Elaboración propia.

### 11.8.3 Determinación del VAC y CAE

La determinación en un periodo de 25 años del Valor actualizado de costos de las Medidas de Control de Emisiones para la Fundición Potrerillos, considerando costos de inversión y operación privados, con actualización a una tasa social de descuento de 6% indica que para lograr un cumplimiento de 95% y 96% de abatimiento de S, implica un VAC de 250 y 337 MUS\$ respectivamente, cifra última que afecta significativamente la rentabilidad de esta instalación maquiladora de concentrados, ubicada en una zona industrial, sin población cercano.

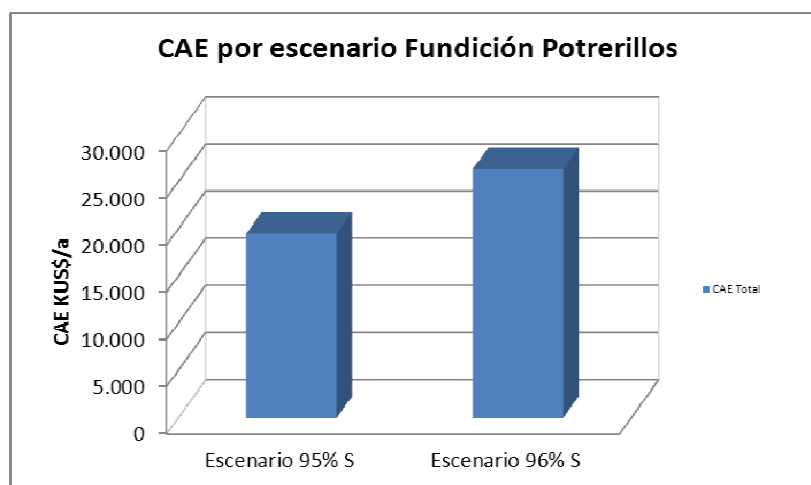
Del VAC indicado para el escenario de 95%, cerca de 265 MUS\$ provienen de costos de Inversión, dado que los costos operacionales en este caso representan un ahorro de costos neto de -15,7 MUS\$, asociado a los resultados de mayor producción de ácido y ahorros en mantención. En tanto para el escenario de 96% fijación de S, el 88% del VAC corresponde a costos de Inversión 296,3 MUS\$, correspondiendo el restante a costos de operación (40,7MUS\$).

Gráfico 11.8.3.a Valor actualizado de Costos soluciones medio-ambientales Potrerillos por escenario



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medio-ambientales  
Potrerillos por escenario



Fuente: Elaboración propia.

El detalle de cálculo de estos costos ha sido realizado considerando similares criterios que para el resto de las fundiciones. El costo anual equivalente se incrementa en un 35%, al pasar del escenario de 95% a 96% (19.523 kUS\$/a a 26.638 kUS\$/a).

#### 11.8.4 Relación Costo – Efectividad en el control de Emisiones de S

Con los antecedentes mostrados, el cálculo de costo efectividad para el cumplimiento de escenarios de captura de azufre lleva a un costo unitario de 420 US\$/t abatida de SO<sub>2</sub>, para el escenario de 95% y 515 US\$/t abatida de SO<sub>2</sub>, para el escenario acumulado de 96% fijación. Este valor es inferior al del resto de las fundiciones para el escenario de 95%, por el mayor potencial de abatimiento de S y fijación en ácido derivado de su actual nivel de captura.



Sin embargo cabe destacar que la implementación del proyecto captación y tratamiento gases secundarios CT y sangría MB, para pasar de 95% a 96% de fijación, tiene por sí mismo un alto costo y baja efectividad, con un costo unitario de 1.500 US\$/t de SO<sub>2</sub> abatida, fijando anualmente sólo 4.572 t/a promedio (en 25 años) de SO<sub>2</sub>.

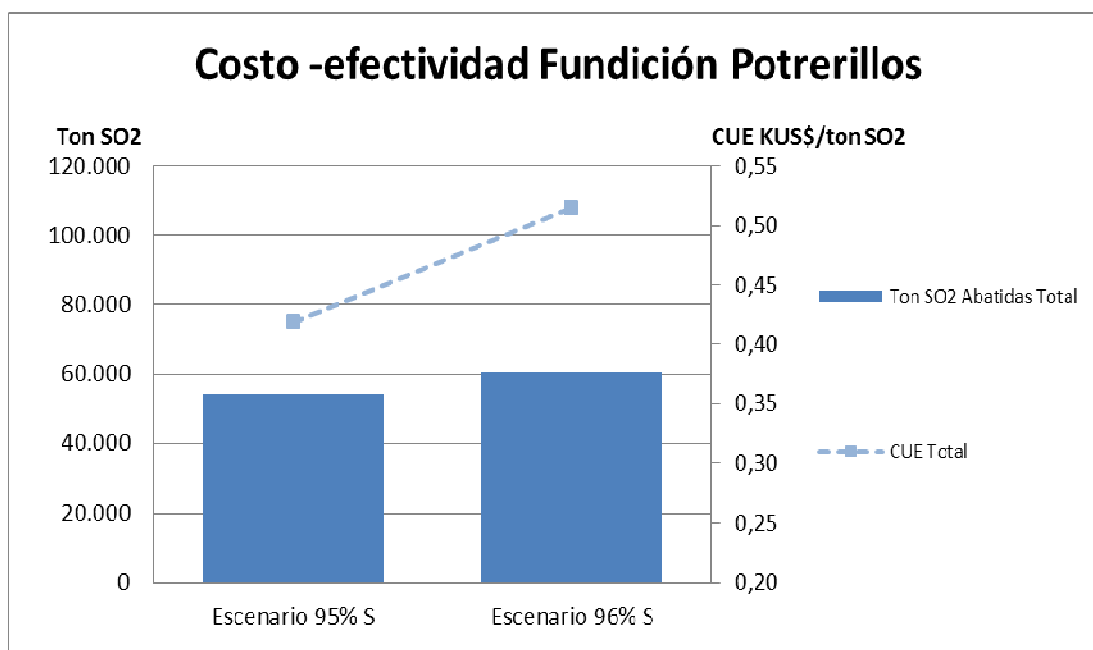
En resumen los indicadores económicos atribuidos a los escenarios descritos de reducción de emisiones para una fijación de 95 y 96% se indican a continuación en tabla siguiente:

Tabla 11.8.4 Indicadores económicos por escenarios Fundición Potrerillos

ITEM	DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
		INVA	VAC	CAE	CUE
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Recuperación sistema manejo de gases CT-CPS	87.372	74.168	5.802	
1.2	Planta Flotación de escorias	96.698	96.698	7.564	
1.3	Potenciamiento y Cambio a doble absorción PLG	63.965	80.741	6.316	
1.4	Reemplazo campanas CT- CPS	17.244	17.258	1.350	
-	Producción de ácido sulfúrico	-	-19.302	-1.510	
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>265.279</b>	<b>249.563</b>	<b>19.523</b>	<b>0,4</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>31.040</b>	<b>87.502</b>	<b>6.845</b>	<b>1,5</b>
2.1	Captura y tratamiento gases de campana secundaria y sangría MB CT	31.040	87.502	6.845	
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>296.319</b>	<b>337.065</b>	<b>26.368</b>	<b>0,5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11.8.4 Costo unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida Potrerillos



Fuente: Elaboración propia.

#### 11.8.5 Proyección de futuro para la instalación

La situación de arquitectura tecnológica asociada a la mantención del proceso de conversión con giros CPS y emisiones secundarias derivadas, tiene como ventaja la simplicidad operacional y relativos bajos costos de operación, por lo que el Consultor sugiere avanzar en paralelo en el desarrollo de mejoras en conversión, tales como el carguío de carga fría por campana o culata, sistema de control de aire asociado al giro o el cambio tecnológico a conversión continua, para lo cual Potrerillos dispone de instalaciones, así como capacidad de refinación electrolítica

El área de preparación carga, debe controlar la regularidad de la ley de azufre, informada como de alta variación, condición que favorece la estabilidad de los procesos.

La realización de inversiones y consolidación de equipos de trabajo de mayor expertizaje y permanencia laboral, es otro de los desafíos de la Fundición Potrerillos, para la obtención de un mejor desempeño ambiental.

Se releva también el requerimiento de un cambio en la cultura operacional, que considere el tema del manejo y tratamiento de gases, como parte integrante del proceso metalúrgico.

## **12. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICIÓN CHAGRES**

### **12.1 General**

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y/o estimar costos de inversión y operación incrementales de la fundición Chagres, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento y/o fiscalización, producto de estas inversiones. Evaluar cumplimiento de límites en chimenea dado que la fundición Chagres se encuentra cercana a un asentamiento poblacional.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento social de 6%) y un horizonte de 25 años.

- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad nominal de procesamiento de concentrados para cada fundición registrada el año 2010, esto es, que la cantidad de concentrados que cada faena puede procesar se mantiene inalterada respecto del año base seleccionado.

El escenario base para fundición Chagres considera una capacidad nominal de fusión anual de 660 kt/año de concentrados de cobre.

## 12.2 Descripción General de la Fundición

La fundición de Chagres inició sus actividades a comienzos del siglo pasado y fue cerrada en los años 30. Posteriormente re-inició sus operaciones en los años 60 con un reverbero y tres convertidores Peirce Smith para producir cobre blister bajo la propiedad de la compañía francesa M.Du Zaita; luego de sucesivos traspasos el año 1978 pasa a ser propiedad de la compañía Exxon como parte de la Compañía Minera Disputada Las Condes.

El año 1991 inició un plan de expansión que finalizó el año 1995. Se instaló un horno Flash Outokumpu en reemplazo del horno reverbero, una planta de oxígeno Air Liquide, un horno de ánodos y una rueda de moldeo Outokumpu. Con Ello aumentó la capacidad de 45 kt/a de cobre a 118 kt/a. El proyecto también incluyó una planta de ácido de contacto simple, que dio como resultado una mayor fijación de azufre de alrededor de 90%.

En el año 1997 se convirtió la planta de ácido de simple a doble contacto, al mismo tiempo de reducir las emisiones aumentó la capacidad de producción a 130 kt/a de cobre. El año 2000 se convirtió un horno de retención en un segundo horno de ánodos, por un aumento en la producción de cobre a 147 kt/a.

El año 2002 la Compañía Minera Disputa Las Condes pasó a propiedad de Anglo American.

Posteriormente, el año 2004 la fundición se expandió a 160 kt/a de ánodos de cobre con modificaciones de la caldera recuperadora de calor, el sistema de limpieza de gases y modificaciones en la planta de ácido.

La fundición cuenta con dos precipitadores electrostáticos en el horno flash y un precipitador Fuller en los convertidores Peirce Smith.

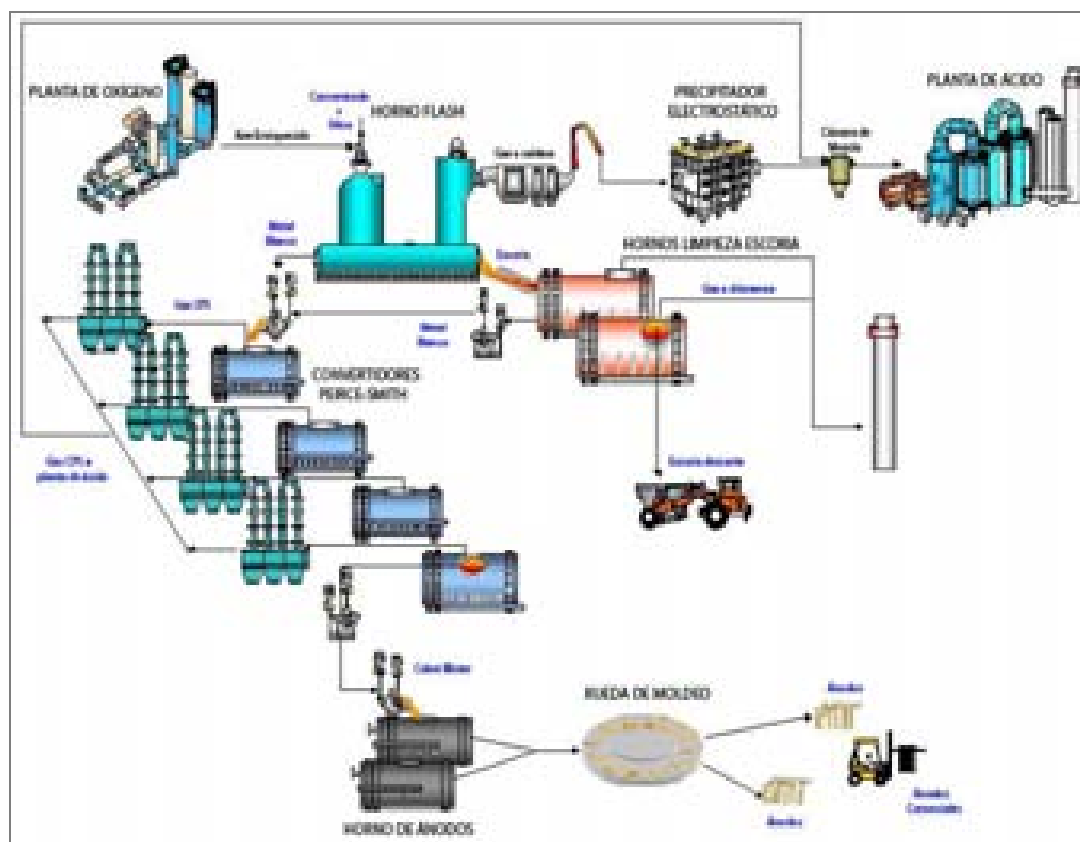
El paso siguiente a 184 kt/a de cobre se efectuó el 2005 con la instalación de un cuarto convertidor, por sobre los tres en operación de los años 60, con campanas primarias de diseño convencional.

### 12.2.1 Descripción de la Planta

La fundición está compuesta por los siguientes equipos principales:

Secado	: 4 silos de almacenamiento 1.700 t 2 secadores rotatorios a vapor (65 t/h cada uno)
Hornos de fusión	: 1 horno Flash OK (5,7 x 19,0 m x 3,3 m) con torre de reacción (4,2/4,6 m x 5,5 m)
Limpieza de escoria	: 2 hornos basculantes HLE (4,0 m x 7,9 m)
Convertidores	: 4 Peirce-Smith (3,0 m x 6,6 m)
Hornos de Ánodos	: 2 rotatorios (4,0 m x 7,0 m)
Planta de Moldeo	: 1 rueda de moldeo OK de 16 moldes (40 t/h)- ánodos 280 kg
Plantas de oxígeno	: 1 Air Liquide (380 t/d)
Plantas de Ácido	: 1 Lurgi/Fenco doble contacto (1.200 t/d)
Planta Vapor	: Recuperación de vapor del Horno Flash (caldera)

Figura 12.2.1 Diagrama de flujo de la Fundición Chagres



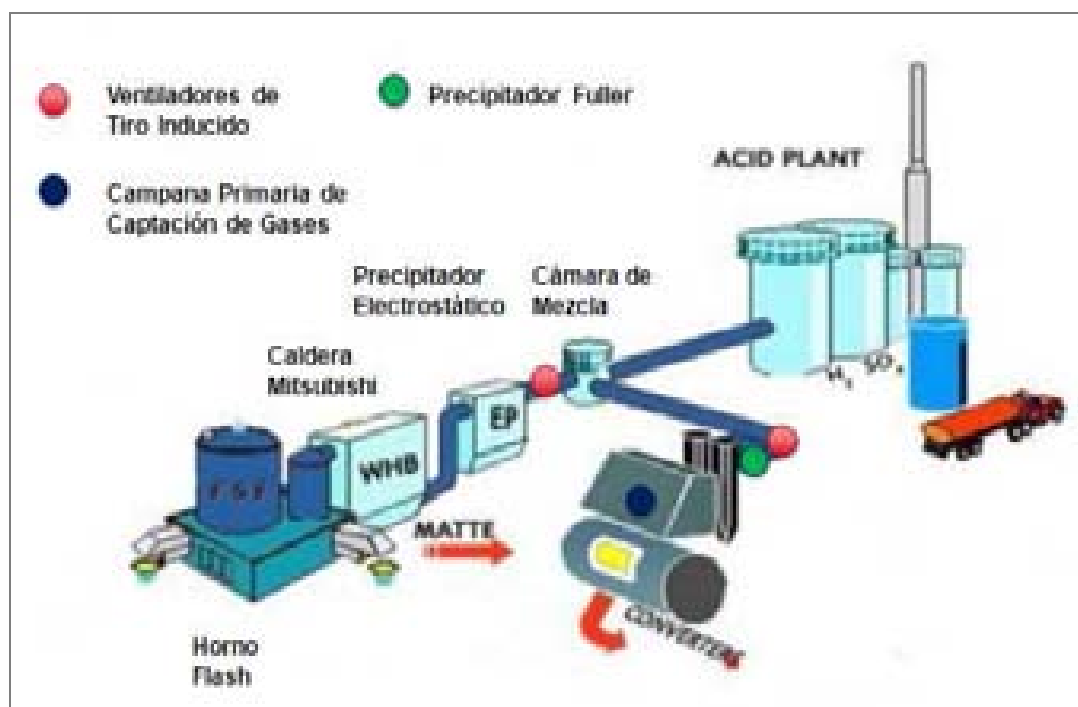
Fuente: Informe Final "Antecedentes Técnicos y económicos para elaborar una norma de emisión para Fundiciones de Cobre". Departamento de Ingeniería de Minas Universidad de Chile.

## 12.2.2 Descripción Sistema de Manejo y Limpieza de Gases

El sistema de manejo de gases considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas hasta el ingreso de los gases en la planta de ácido sulfúrico.

En la figura siguiente, se muestra el esquema operativo del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición Chagres.

Figura 12.2.2 Manejo y limpieza de gases Fundición Chagres



Fuente: Antecedentes entregados por el MMA-Chagres.

La instalación cuenta de un sistema de manejo de gases con líneas independientes dedicadas, para atender a las operaciones unitarias de fusión y conversión.

Los gases metalúrgicos provenientes de la fusión en horno flash son captados mediante la acción de los VTI. Estos gases son enfriados en una caldera recuperadora de calor y limpiados de sus polvos en precipitadores electrostáticos. Posteriormente son conducidos hacia la cámara de mezcla, antes de su ingreso a la planta de ácido.



Los gases de conversión en CPS, son también captados desde las campanas primarias mediante la acción de VTI independientes, enfriados en cámaras radiativas, limpiados en un precipitador y luego conducidos hasta la cámara de mezcla, donde son mezclados con los del horno flash y llevados hacia la planta de ácido sulfúrico.

## 12.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

### 12.3.1 Distribución de Emisión de Azufre y Arsénico

Considerando el criterio de distribución de emisiones por fuente, bajo el valor medio de fijación Azufre y Arsénico declarado versus el detallado en capítulo 4, la distribución estimada de emisiones y contenidos proyectados de azufre para el mediano plazo, permite visualizar las siguientes emisiones por fuentes.

Tabla 12.3.1 Emisiones de Azufre y Arsénico Fundición Chagres

Chagres	Med. Plazo
Alimentación concentrado t/año	Nominal 660.000
Ley Media S en concentrados (%)	29,37
Ley Media As en concentrados (%)	0,098

Emisión por Fuentes t/a	Base Med. Plazo	
Fundición Chagres	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario FSF	0	0
Fugitivo Sangría FSF Eje/Escoria	719	4
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	5.254	1
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Chimenea y sangrías HLE	239	23
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d
Gases de cola PAS	884	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	249	9
Otras fuentes	1.255	0,2
Ajustes	-137	-0,6
<b>Total emisión t/a</b>	<b>8.464</b>	<b>37</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,07\%</math> S</b>	<b>95,6</b>	<b>94,3</b>

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes entregados por el MMA.

La tabla 12.3.1 incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S.

Según lo indicado en la Tabla 12.3.1 la fijación de arsénico alcanza un nivel de 94,3%, inferior al valor obtenido con el azufre, debido a que la configuración de la fundición se concentra principalmente en el abatimiento de SO<sub>2</sub>.

### 12.3.2 Emisión de Mercurio

No se dispone de antecedentes de caracterización de contenidos de mercurio en los concentrados de Chagres.

### 12.3.3 Emisión de material particulado

La fundición Chagres posee un FSF, en donde el material particulado es recuperado en su mayor parte en la caldera recuperadora de calor y en precipitadores electrostáticos. En los CPS el material particulado se recupera en el sistema de enfriamiento radiativo y en menor cantidad en el precipitador.

Las medidas de control del material particulado, usualmente permiten el control de las emisiones de metales y otros sólidos que deben ser abatidos antes de su ingreso a la PAS.

Existen otras fuentes de material particulado, adicionales a las emisiones por chimeneas, o de fuente difusa que deben ser controladas, entre las que destacan las operaciones de chancado, manejo de materiales, erosión de suelos y almacenamientos no confinados.

Chagres utiliza para el manejo de concentrado a fundir camiones encarpados cubiertos por una lona para evitar el arrastre por viento. Los camiones vacían su carga en una instalación techada y cerrada en tres de sus cuatro costados laterales. Luego el concentrado es transportado mediante una correa a un edificio cerrado, desde el actual se despacha los concentrados para consumo. En los puntos de cambio de dirección de las correas, existen sistemas de encapsulamiento (cubiertas o encierro) para evitar la generación y pérdida de partículas.

#### 12.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica

La arquitectura tecnológica de fundición Chagres, tiene la característica de poseer una de las mejores tecnologías de fusión continua, como es el horno de fusión flash, totalmente cerrado y exento de emisiones secundarias. Los gases metalúrgicos del FSF altamente concentrados en  $\text{SO}_2$ , pasan por una caldera recuperadora de calor y precipitadores electrostáticos para continuar mediante la impulsión de un VTI hasta una cámara de mezcla y luego son succionados por la planta de ácido (PAS).

La conversión del eje generado en el FSF se realiza en los CPS, que es un proceso discontinuo (proceso batch) con carguíos discretos y vaciados del material, que implican giros de los reactores. Además la boca de estos equipos con su campana de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto se generan emisiones de gases secundarios contaminantes en  $\text{SO}_2$ , As y otros. Para contrarrestar esta situación, se dispone en los ductos de gases, de ventiladores de tiro inducido (VTI), que por la succión producen una presión negativa dentro de la campana, generando una infiltración de aire externo hacia el interior de ésta (se opera idealmente con infiltraciones del orden de 100% a 120%).

Pese a lo anterior, las mayores emisiones son generadas cuando los CPS están recibiendo materiales por boca, girando desde su posición de soplado, y por lo tanto, emitiendo los gases de proceso a la atmósfera. Por esta razón, operacionalmente debería reducirse el giro del CPS a lo estrictamente necesario, incorporar en lo posible un sistema regulador del flujo de aire en función del giro y realizar el agregado de carga fría, scrap y otros, a través de una compuerta lateral en la campana.

Otra fuente importante de emisión de  $\text{SO}_2$ , es la que se produce en los gases de cola de la planta de ácido sulfúrico (PAS). Chagres posee una planta de doble absorción, la cual produce menor emisión respecto a una planta de simple absorción. Sin embargo por su cercanía a las poblaciones estos gases deberán ser tratados.

La fundición Chagres en el Horno Flash posee campanas colectoras locales en las sangrías de eje. Estos gases son filtrados antes de ser enviados a una chimenea.

Chagres posee dos hornos basculantes para limpieza de escoria, los cuales operan con petróleo 6 (Fuel oil) como reductor. En estos hornos no existe tratamiento de gases, solo existe campana para su captura y conducción a chimenea.

Para la limpieza de escorias, la fundición posee dos hornos basculantes, los cuales producen una fuente emisora de gases con material particulado,  $\text{SO}_2$ , As e hidrocarburos incombustos. Si bien los gases son capturados en campanas, éstos finalmente son conducidos a una chimenea.

## 12.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables en el control de Emisiones de Azufre y Arsénico

De la distribución de emisiones asumida, las fuentes más relevantes son los gases fugitivos de los CPS, provenientes de las campanas primarias y de los giros realizados al recibir la carga fría y el eje. Es por eso que como parte de las soluciones, se tomará en consideración la incorporación de campanas secundarias en los CPS y tratamiento alcalino de los gases capturados.

En segunda instancia, pero igualmente importante, se encuentran las emisiones generadas en los gases de cola de la planta de ácido de doble absorción. La chimenea de la planta de ácido deberá cumplir un límite de  $400 \text{ mg/Nm}^3$ , por estar cerca de centros poblacionales, por lo que se considerará como parte de las soluciones a incorporar, un tratamiento alcalino de gases de cola. El costo de disposición del residuo sólido generado por esta solución se ha considerado en 300 US\$/t.

El consultor recomienda que la fundición estudie el proceso Cansolv, ya que la fundición genera vapor, el cual es requerido para el funcionamiento del proceso. El proceso Cansolv concentra los gases de cola provenientes de plantas de ácido, abatiendo el azufre con recuperación de ácido sulfúrico. El consultor a la fecha no dispone de antecedentes válidos de inversiones, eficiencias y costos de operación para incorporarlo en este análisis normativo, por lo cual ha considerado la solución de lavado alcalino tradicional con cal.

Desde el punto de vista de la emisión de arsénico, y dado que Chagres es una fundición cercana a poblaciones, se considerará cambiar el proceso existente de limpieza de escorias de piro-metalurgia por el de flotación, debido a que en la etapa de limpieza de escorias con HLE se produce una gran emisión de arsénico.

La flotación de escorias como solución de mejora, logrará principalmente un abatimiento de arsénico, y en menor proporción de azufre.

La fundición Chagres actualmente se encuentra estudiando esta solución de mejora, como parte del proyecto de mejoramiento. Las escorias serían tratadas por una empresa externa.

Las soluciones tecnológicas restantes, se priorizarán tomando en consideración los puntos de mayor emisión, que impliquen menores interferencias operativas o modificaciones de infraestructura.

#### 12.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

Los proyectos a implementar para incrementar el nivel de fijación de Azufre y Arsénico previstos por el Consultor, se indican a continuación:

- Adición de carga fría por campana a CPS

Para evitar las emisiones de gases de procesos en la operación de agregado de carga fría por boca a los CPS, se requiere de un sistema de agregado mecánico lateral, mediante una correa transportadora.

Se estima estar operativo el sistema en el 2014. La inversión se proyecta en 2,0 MUS\$ para el año 2013.

- Planta de Tratamiento de Gases de Cola

Para cumplir límites de emisión por chimeneas se hace necesario un tratamiento de los gases residuales de la planta de ácido (gases de cola), con los que se persigue alcanzar una concentración de  $\text{SO}_2$  inferior a  $400 \text{ mg/Nm}^3$ .

Se considera para el tratamiento de gases de cola, lavado alcalino. Los costos de inversión para una planta alcalina de tratamiento de gases residuales se estiman en 19,9 MUS\$ y los plazos requeridos para los estudios de ingeniería, adquisiciones, construcción, instalación y puesta en marcha son de aproximadamente 24 meses, estimándose en operación el 2015.

Para el cumplimiento de límites en chimenea además del tratamiento de gases de cola de PAS, se han incorporado inversiones de 3,0 MUS\$ para sistemas poscombustión en los 2 hornos de ánodos así como opacímetros de control de humos negros, y recursos equivalentes a 0,6 MUS\$ para infraestructura de monitoreo y control de límites, con un gasto operacional de 0,56 MUS\$/año.

- Captación y tratamiento de Gases Fugitivos CPS

Para la captación de los gases fugitivos de la boca se requiere instalar campanas secundarias en cada uno de los CPS, como las descritas en el capítulo 5, Soluciones Tecnológicas Generales para la Captura y Tratamiento de Gases Fugitivos y Secundarios.

Esta solución requiere que la nave posea una cierta altura, que le permita tener holgura, para poder incorporar la campana secundaria. La fundición Chagres actualmente esta estudiando esta solución de mejora y los estudios en desarrollo determinarán los espacios requeridos para esta medida.

Con la implementación de este proyecto, se estima que se obtendrá un mejoramiento en la captación y abatimiento de azufre respecto al alimentado de 0,8% S.

La inversión estimada de este proyecto es de 40,8 MUS\$, con un plazo de ejecución de 2 años, por lo que su operación se esperaría para comienzos del año 2016.

- Reemplazo Hornos de Limpieza de Escoria por Flotación de escorias

En la actualidad en Chagres existen dos Hornos basculantes de tratamiento de escorias, los cuales utilizan petróleo como reductor. En esta etapa se reduce la magnetita de las escorias y transcurrido un tiempo sedimentan fases en los hornos, extrayendo por boca la escoria final y el metal acumulado en el fondo. Luego se recarga el horno con nuevas ollas de escoria en un proceso semi-continuo.

La reducción de escorias es un proceso que requiere de un reductor inyectado por toberas, y el ser endotérmico genera gases de SO<sub>2</sub>, As y material particulado, los cuales son evacuados por chimenea.

Desde la perspectiva ambiental es recomendable la eliminación de esta fuente emisora de difícil control, remplazándola por la flotación de escorias que tiene menor emisión de estos contaminantes en la etapa de enfriamiento.

Bajo el objetivo de aumentar el abatimiento de arsénico y en menor proporción de azufre, el Consultor considerará incorporar para la Fundición Chagres el reemplazo de los Hornos de limpieza de Escoria, por el proceso de Flotación de Escorias, limitado por la disposición de relaves en su actual ubicación. Las escorias tienen que ser tratadas externamente, mejora que la fundición debe estudiar, permitiendo una fijación de arsénico de alrededor de 4% y para azufre de 0,6% según evaluación de esquemas operativos de fundición, desarrollado en el punto 3 de este informe.

Puesto que se considerará que la fundición traté sus escorias por flotación con una empresa externa, o propia en otra localización cercana, se asume solo el costo de inversión de la planta de flotación estimado en 60 MUS\$, más el costo asociado a manejo, enfriamiento de las escorias y pre-chancado



estimado en 4 MUS\$. Se considera un costo pre-inversional para estudios previos del 7% de la inversión.

Por otra parte los costos de operación y disposición del relave que implican llevar a cabo esta mejora, se estiman que deben compensarse con la reducción de costos por los HLE y las ganancias por recuperación de cobre.

Se entrega una sensibilidad de los indicadores al excluir la inversión de la planta de flotación, del plan de reducción de emisiones SO<sub>2</sub>.

El efecto por proyecto de reducción de emisiones, calculado en base a las fuentes detectadas y las eficiencias asignadas indicadas en el capítulo 5 (Ej.: 85% abatimiento de S y As en planta de lavado alcalino), se indican en la siguiente tabla:

Tabla 12.5.1 Proyectos de Reducción Emisiones Fundición Chagres

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Chagres</b>				
<b>Escenario 96% S</b>				
Adición de carga fría por campana CPS	0,3	-	968	-
<b>Límites de chimenea</b>				
Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	-	-	-	-
Infraestructura monitoreo control	-	-	-	-
Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm <sup>3</sup> /h	0,4	-	1.503	-
<b>Escenario 97% S</b>				
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	0,8	0,1	3.032	0,4
Flotación de escorias externa	0,6	3,9	2.365	25

Fuente: Elaboración propia.

## 12.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con los proyectos antes mencionados implementados, la distribución de emisiones en la fundición queda como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 12.6.a Emisiones según Captura-Fijación de Azufre y Arsénico por escenario  
Fundición Chagres

<b>Chagres</b>	<b>Med. Plazo</b>	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	660.000
Ley Media S en concentrados (%)		29,37
Ley Media As en concentrados (%)		0,098

Emisión por Fuentes t/a Fundición Chagres	Base Med. Plazo		Escenario de 96% S		Escenario de 97% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
Fugitivo primario FSF	0	0	0	0	0	0
Fugitivo Sangría FSF Eje/Escoria	719	4	719	4	719	4
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	5.254	1	4.770	1		
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	3.254	1
Chimenea y sangrías HLE	239	23	239	23		
Residual tratamiento PFE	n/d	n/d	n/d	n/d	13	0,1
Gases de cola PAS	884	0	133	0	133	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Refino HA	249	9	249	9	249	9
Otras fuentes	1.255	0,2	1.255	0,2	1.255	0,2
Ajustes	-137	-0,6	-137	-0,6	-1.093	-2,4
<b>Total emisión t/a</b>	<b>8.464</b>	<b>37</b>	<b>7.228</b>	<b>37</b>	<b>4.529</b>	<b>12</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 0,07\%</math> S</b>	<b>95,6</b>	<b>94,3</b>	<b>96,3</b>	<b>94,3</b>	<b>97,7</b>	<b>98,2</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	1.235	0	2.699	25
Toneladas de ácido incremental (t/a)			0		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

En la sección de ajustes de la tabla 12.6.a para el escenario de 97% S se incluye adicionalmente un ajuste por circuito de flotación de escorias debido a que existe una menor recirculación de azufre y arsénico en el proceso. En la flotación de escorias una parte del azufre y en mayor proporción de arsénico son descartados en los relaves.

Por encontrarse la Fundición Chagres, cercana a centros poblados, la autoridad ha proyectado también la exigencia del cumplimiento de límites en chimenea, que en base a las eficiencias de equipos proyectadas se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 12.6.b Tabla cumplimiento límites por chimenea Fundición Chagres

Cumplimiento Límites en Chimenea Fundición Chagres										
Fuente Generadora y Sistema de Tratamiento	Tecnología a Implementar	Volumen	Conc. SO2	Conc As	EFI trat	Concentración proyectada mg/Nm3				Observaciones
		Nm3/hr	mgr/Nm3	mgr/Nm3	%	400 SO2	0,5 As	0,07-0,1 Hg	50 MP	
Tratamiento gases de Cola PAS doble absorción	Lavado scrubber solucion alcalina	123.000	1.713	-	85	257	-	-	-	Requiere disponer 4.060 t/a yeso
Captura y Tratamiento gases Fugitivos CPS	Campanas, VTI, Lavado alcalino 80% capt	210.000	2.020	0,7	85	303	0,1	-	0,1	Requiere disponer 8.200 t/a yeso impuro

Fuente: Elaboración propia.

#### 12.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Para poder dar cumplimiento a los escenarios definidos y desarrollar las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As se considera el siguiente cronograma:

Tabla 12.6.1 Cronograma de cumplimiento de Escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION CHAGRES					
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO				
	2013	2014	2015	2016	2017
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 95,6%		96,3%		97,7%	
Adición de craga fría por campana CPS	xxxxxxxxxxx				
Tratamiento de gases de cola PAS		xxxxxxxxxxx			
Captación y tratamiento Gases Fugitivos CPS		xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx		
Flotación de escorias externa			xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el diagrama, el escenario de 96% se cumpliría a partir del año 2015 y finalmente el escenario de 97% se cumpliría a partir del año 2017.

Aun cuando el nivel de fijación alcanzado en la fundición es de 97,7%, y el bajo rango de dispersión frente al inicial declarado, se sostiene una fijación no superior al 97%, con la implementación de las medidas planteadas, por las razones que se explican en el punto siguiente.

## 12.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Mediano y Largo Plazo

Es importante la realidad de una fundición en términos de que las operaciones unitarias deben operar a su máxima eficiencia en cada una de sus variables: parámetros operacionales de calidad de la carga, capacidad de procesamiento de ella, equipos de captura y manejo de gases metalúrgicos, planta de limpieza de gases y captura/limpieza de gases fugitivos como conjunto, para que la fundición cumpla un determinado nivel de captura y emisión de contaminante.

En la práctica, lo normal es que después de un tiempo, los equipos bajen su eficiencia o fallen. Consecuentemente como conjunto no se cumple el nivel de captura y emisión de contaminante. Lo anterior requiere reevaluar los sistemas de control con eficiencias promedio durante la campaña operacional.

### 12.6.3 Comentarios sobre Infraestructura, Espacios Disponibles e Interferencias

La fundición Chagres es un complejo industrial compacto, donde es difícil encontrar espacios para nuevas instalaciones, afortunadamente la fundición posee un FSF.

En la etapa de conversión, la fundición Chagres debe evaluar si el espacio es suficiente para instalar campanas secundarias.

Algunas interferencias menores podrían surgir con los tendidos de los ductos de gases fugitivos de campanas secundarias hacia la planta de lavado que debería ubicarse en un sector periférico. Su instalación y conexión puede efectuarse durante una mantención anual. Los gases residuales emitidos de la planta de tratamiento pueden ser evacuados en una de las chimeneas existentes.

Chagres tiene la ventaja de poseer una planta de ácido sulfúrico de doble absorción de 150.000 Nm<sup>3</sup>/h, a la cual se le ha considerado la solución de tratar los gases de cola mediante un lavado alcalino tradicional con cal. Pero la fundición puede estudiar el proceso Cansolv, que le permitiría una mayor producción de ácido y abatimiento de azufre. El proceso Cansolv requiere de un compuesto derivado de la amina y generación de vapor en su proceso. La fundición tiene la ventaja de generar vapor proveniente de la caldera, ya que recupera calor de los gases del FSF.

Las plantas de tratamiento para gases de cola de la planta de ácido y fugitivos de CPS, pueden requerir de espacios que deben ser evaluados por la fundición. Del

mismo modo el proyecto de flotación de escorias que requiere de espacios para el enfriamiento de las escorias.

## 12.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 12.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

A continuación se indican los montos de inversión por proyectos de la fundición Chagres, como consecuencia de la implementación de cada uno de los proyectos de mejoramiento ambiental, dirigidos a controlar el SO<sub>2</sub> y As para el cumplimiento de los tres escenarios en estudio.

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/- 30% de dispersión, las inversiones y recursos pre-inversionales (7% de la inversión) requeridos por escenario para la Fundición Chagres, alcanzan por escenario:

- Escenario 96% fijación de S y límites de chimenea con 27,3 MUS\$
- Escenario 97% fijación de S y límites en chimenea con 136 MUS\$

Tabla 12.7.1.a Costos de capital por escenario y proyectos Fundición Chagres

COSTOS DE INVERSIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	Inversión Sub total	Costos PreInversionales	TOTAL	CRITERIO REEMPLAZO EQUIPOS
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>		<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>				
1.1	Adición de carga fría por campana CPS	2.000	140	2.140	15 años
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	3.000	210	3.210	20 años
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	606	42	648	20 años
1.1.3	Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm <sup>3</sup> /h	19.890	1.392	21.283	20 años
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>23.496</b>	<b>1.645</b>	<b>25.141</b>	
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>		<b>25.496</b>	<b>1.785</b>	<b>27.281</b>	
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>				
2.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	37.672	2.637	40.309	20 años
2.2	Flotación de escorias externa	64.000	4.480	68.480	20 años
<b>Total Escenario Captura 97% S</b>		<b>127.168</b>	<b>8.902</b>	<b>136.070</b>	

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de estas inversiones, y su reposición por término de vida útil, en un plazo de 25 años, han permitido al Consultor calcular la inversión actualizada INVA por escenario, utilizando una tasa de descuento de 6% anual y considerando como año cero, el 2011.

La tabla 12.7.1.b muestra la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 12.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Chagres

COSTOS DE INVERSIÓN								
ITEM	DESCRIPCIÓN	AÑO 1 2011	AÑO 2 2012	AÑO 3 2013	AÑO 4 2014	AÑO 5 2015	AÑO 6 2016	AÑO 7 2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>								
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>							
1.1	Adición de carga fría por campana CPS	0	140	2.000	0	0	0	0
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>							
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	0	0	210	3.000	0	0	0
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	0	0	42	606	0	0	0
1.1.3	Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm3/h	0	0	1.392	19.890	0	0	0
<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.645</b>	<b>23.496</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>		<b>0</b>	<b>140</b>	<b>3.645</b>	<b>23.496</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>							
2.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	0	1.319	1.319	18.836	18.836	0	0
2.2	Flotación de escorias externa	0	2.240	2.240	0	32.000	32.000	0
<b>Total Escenario Captura 97% S</b>		<b>0</b>	<b>3.699</b>	<b>7.203</b>	<b>42.332</b>	<b>50.836</b>	<b>32.000</b>	<b>0</b>

Elaboración propia.

## 12.7.2 Costos incrementales de operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en 4,5 MUS\$/año para el escenario 96% y 10,2 MUS\$/año para el escenario de 97%, valor que para la flotación de escorias solo incluye los costos de operación para manejo y pre-chancado de las escorias. Se considera que los riles de la planta de lavado de gases son parcialmente usados para el enfriamiento final de las escorias.

Para la disposición de residuos sólidos, en el caso de la Fundición Chagres, se ha valorizado la disposición de estos materiales a una tarifa de 300 US\$/t.



Tabla 12.7.2 Costos incrementales de operación por escenario Fundición Chagres

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTALES					
		COSTO TOTAL INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>16</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>968</b>
1.1	Adición de carga fría por campana CPS	16	11	5	0	-	968
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>						
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	1.036	-	1.036	0	-	-
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	560	-	560	0	-	-
1.1.3	Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm <sup>3</sup> /h	2.848	540	545	545	1.218	1.503
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>4.444</b>	<b>540</b>	<b>2.141</b>	<b>545</b>	<b>1.218</b>	<b>1.503</b>
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>4.460</b>	<b>552</b>	<b>2.145</b>	<b>545</b>	<b>1.218</b>	<b>2.471</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>						
2.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	5.244	923	930	930	2.460	3.032
2.2	Flotación de escorias (Enfriamiento)	500	-	500	-	-	2.365
	<b>Total Escenario Captura 97% S</b>	<b>10.204</b>	<b>1.475</b>	<b>3.576</b>	<b>1.475</b>	<b>3.678</b>	<b>7.868</b>

Elaboración propia.

### 12.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

La instalación de nuevos equipos generará requerimiento de energía y agua industrial, aunque éstos puedan incorporar mejoras de eficiencia energética. Los sistemas de manejo de gases representan una fracción importante de consumo y costo de las fundiciones.

Sin embargo los nuevos sistemas incorporados para el control de emisiones implicarán un aumento en el consumo energético del orden de 6,5 GWH/a para el escenario de 96% y de 17,4 GWH/a para el escenario 97%. De igual modo habrá un incremento del consumo de agua industrial de reposición, según se indica en tabla siguiente:

Tabla 12.7.3 Consumo incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía MW/h/a	Consumo incremental de agua m3/a
<b>Fundición Chagres</b>	<b>Año</b>		
<b>Escenario 96% S</b>			
Adición de carga fría por campana CPS	2014	100	-
<b>Límites de chimenea</b>			
Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	2015	1.490	-
Infraestructura monitoreo control	2015	-	-
Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm3/h	2015	6.396	1.845
Consumo MWh/a		6.496	
<b>Escenario 97% S</b>			
Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	2016	10.920	3.600
Flotación de escorias	2016	-	-
Consumo MWh/a		17.416	

Nota: El valor en color azul se refiere al consumo incremental de petróleo en t/a

Elaboración propia.

En el proyecto de flotación de escorias no se consideran incrementos de consumo de energía y agua, debido a que esta solución se externalizará.

Los gráficos 12.7.3.a y 12.7.3.b, muestran el consumo incremental de energía y agua industrial para cada escenario, y los correspondientes a proyectos por límites de chimenea.

En el escenario de 96% S, los proyectos de mayor consumo de energía y de agua industrial corresponden a límites por chimenea.

Gráfico 12.7.3a Incremento Energía Eléctrica

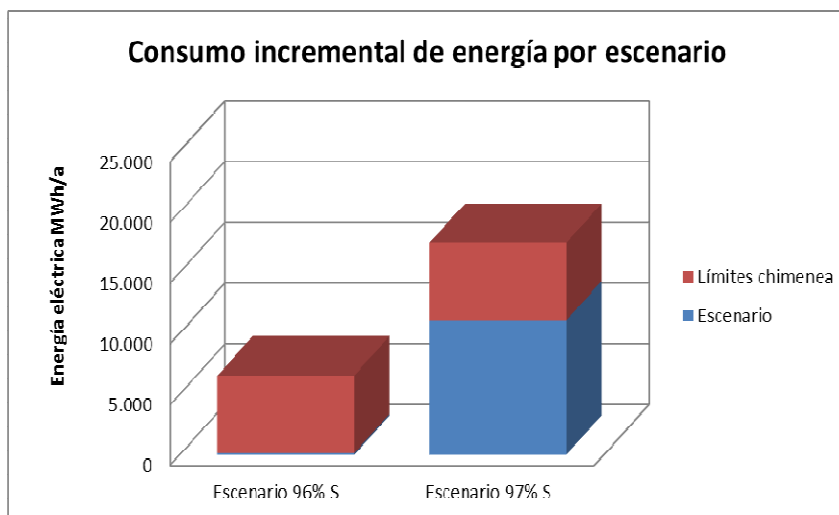
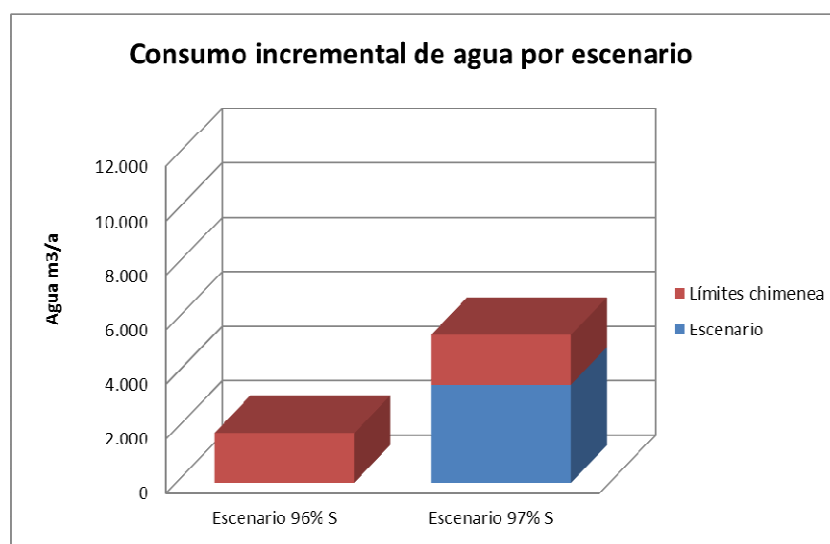


Gráfico 12.7.3 b Incremento Consumo Agua industrial



Fuente Gráficos 12.7.3 a y b: Elaboración propia.

## 12.8 Resultados Técnico/Económicos de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición Chagres en el mediano plazo, que le permitirían reducir emisiones de azufre y arsénico, con niveles de captura y fijación de 96 y 97% en azufre y superiores en arsénico.

Lo anterior, junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales permiten evaluar el valor presente (VAC) de dichas medidas, la determinación del Costo anual equivalente (CAE) como una medida comparativa a la razón costo efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE).

### 12.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

La reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As por fuentes, para la Fundición Chagres se muestra en los gráficos 12.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes, ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor, y ajuste por circuito de flotación de escorias.

Gráfico 12.8.1.a Emisiones Chagres de SO<sub>2</sub> por escenario

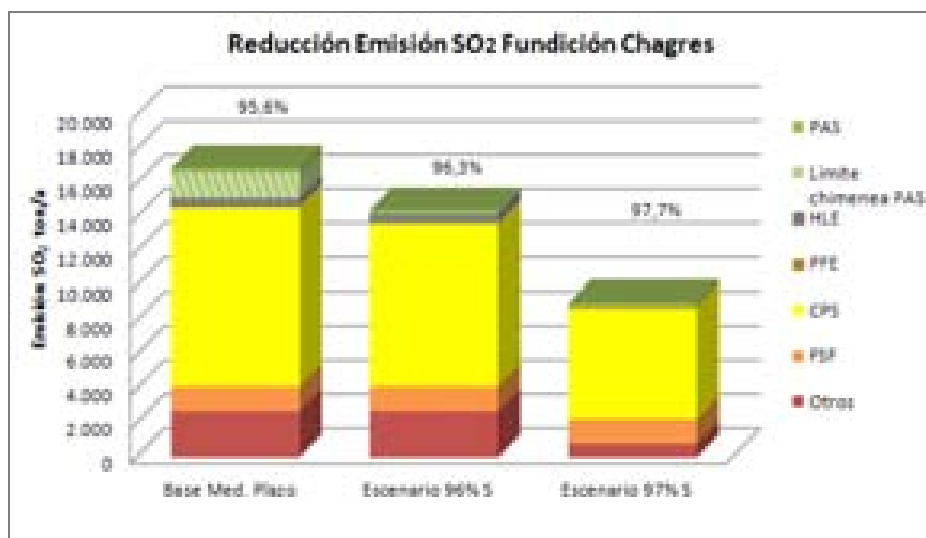
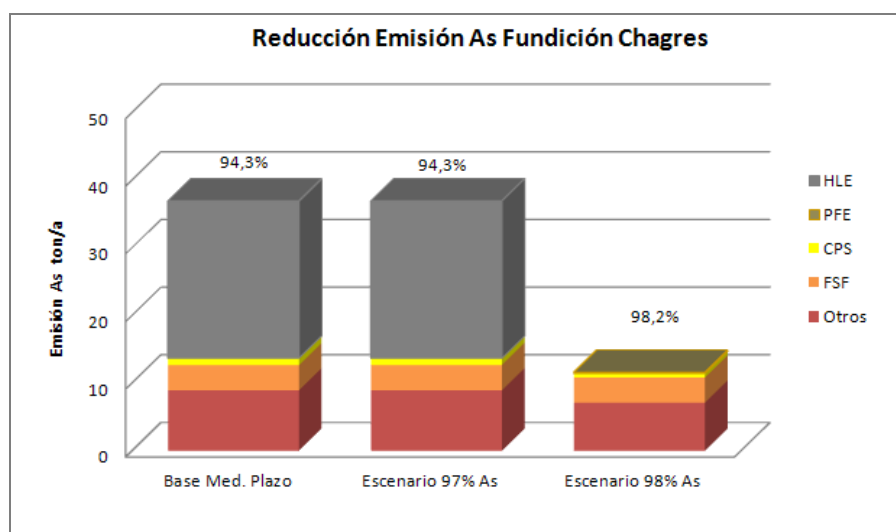


Gráfico 12.8.1.b Emisiones Chagres de Arsénico por escenario

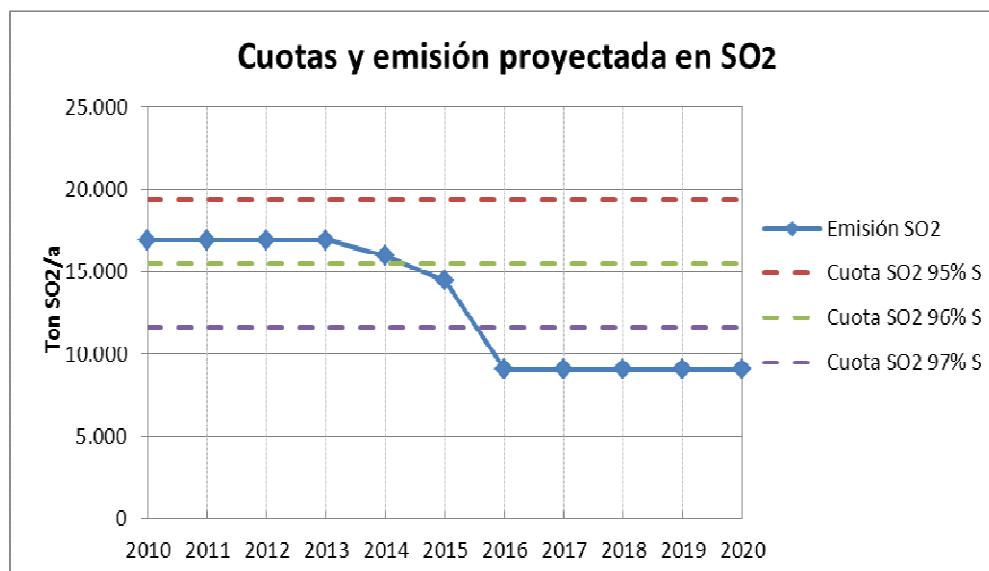


Fuente Gráficos 12.8.1 a y b: Elaboración propia.

## 12.8.2 Cumplimiento de cuotas con emisiones proyectadas S y As

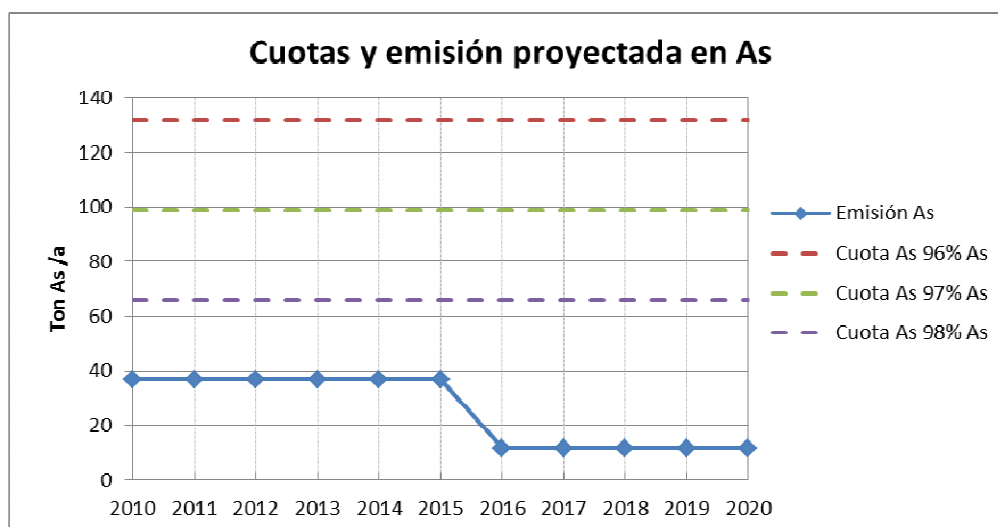
Las figuras siguientes muestran que de acuerdo a la planificación planteada, a partir del año 2016 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> y As proyectadas por la autoridad para la Fundación Chagres.

Gráfico 12.8.2.a Cuotas de Emisiones SO<sub>2</sub> Chagres por escenario



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12.8.2.b Cuotas de Emisiones As Chagres por escenario



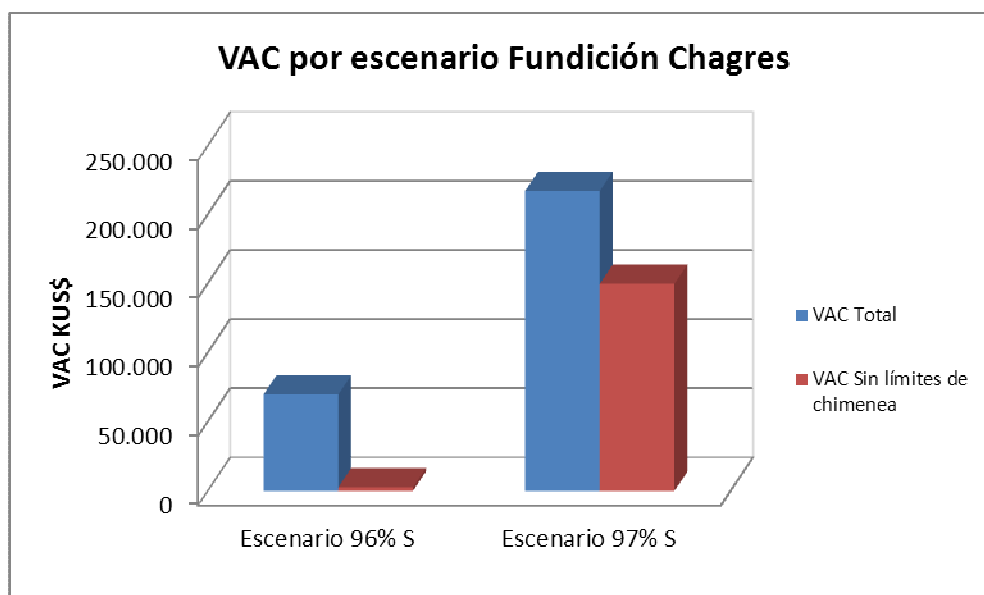
Fuente: Elaboración propia.

### 12.8.3 Determinación de VAC y CAE

La determinación en un período de 25 años del valor actualizado de costos (VAC) para la Fundición Chagres, considera una tasa social de descuento de 6%. Para lograr el cumplimiento de los escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, se obtienen los siguientes VAC, valorizados como escenarios acumulativos:

- Escenario de 96% Fijación  $\text{SO}_2$  VAC total de 69,8 MUS\$, de los cuales 67,2 MUS\$ corresponden a soluciones para el control de límites en chimenea.
- Escenario de 97% Fijación  $\text{SO}_2$  VAC de 217,2 MUS\$ de los cuales 67,2 MUS\$ se mantienen por soluciones para el control de límites en chimenea.

Gráfico 12.8.3.a Valor Actualizado de Costos soluciones medioambientales  
Chagres por escenario



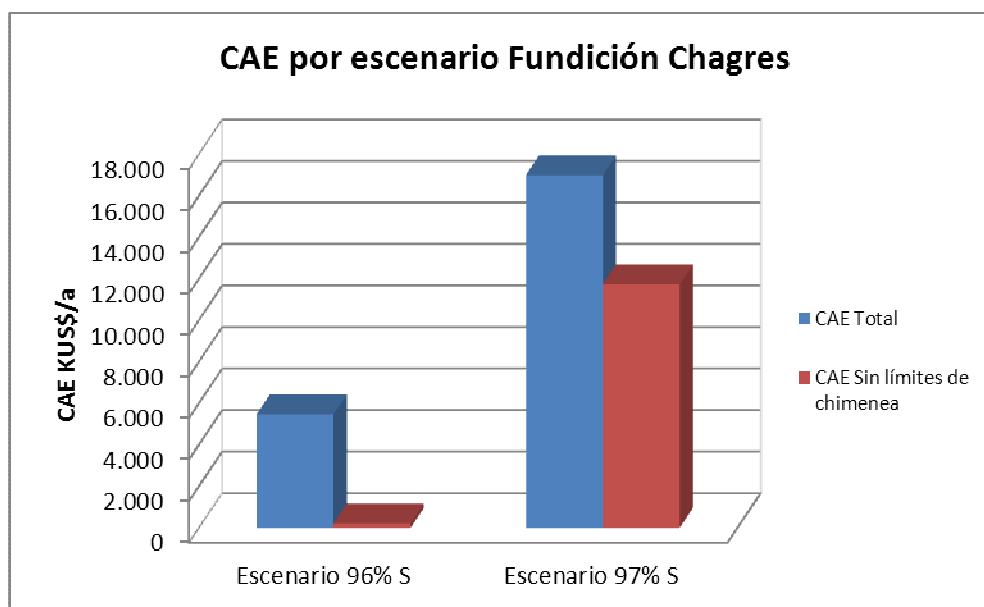
Fuente: Elaboración propia.

De igual modo la determinación del costo anual equivalente o valor en cuotas fijas anuales (CAE) para la Fundición Chagres, considerando una tasa social de descuento de 6% en un período de operación dentro de los 25 años, indica que para lograr el cumplimiento de escenarios solicitados a evaluar por la autoridad, representarán los siguientes CAE:

- Escenario de 96% Fijación  $\text{SO}_2$  de un CAE de 5.466 kUS\$/a
- Escenario de 97% Fijación  $\text{SO}_2$  de un CAE de 16.992 kUS\$/a



Gráfico 12.8.3.b Costo anual equivalente Soluciones medioambientales Chagres por escenario



Fuente: Elaboración propia.

#### 12.8.4 Relación Costo /Efectividad para el control de Emisiones de SO<sub>2</sub>

Con los antecedentes entregados, para el cumplimiento de los escenarios de abatimiento de azufre proyectados, se requieren los siguientes recursos expresados como indicadores económicos y que llevan a los siguientes costos unitarios equivalentes por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida promedio en el periodo:

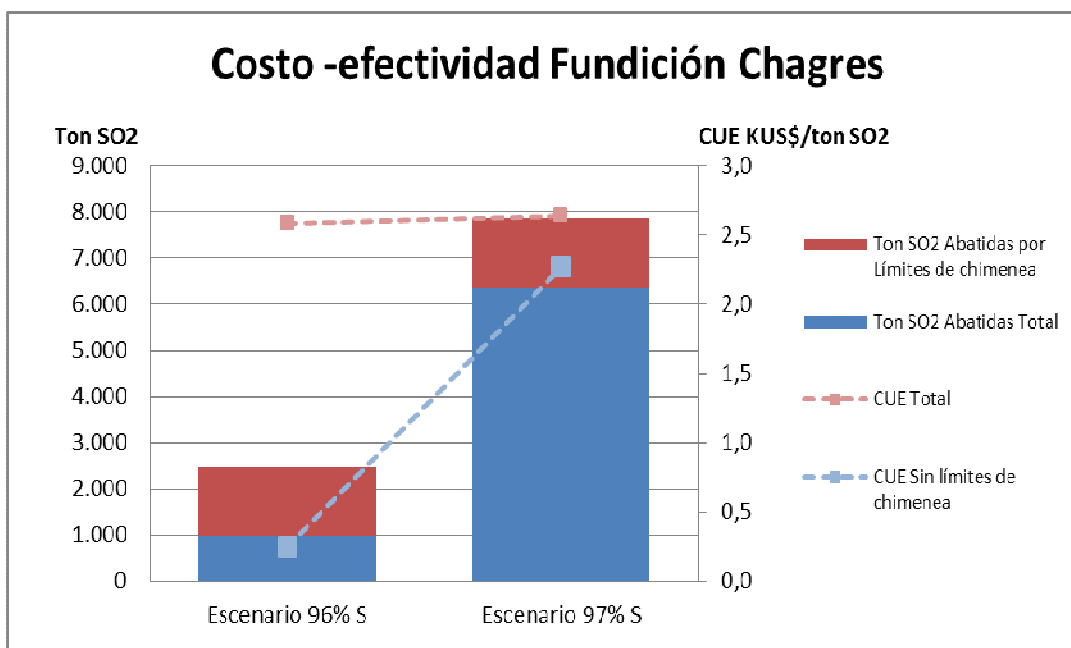
- **Escenario de 96% Fijación SO<sub>2</sub> CUE de 2,6 kUS\$/ t SO<sub>2</sub>**
- **Escenario de 97% Fijación SO<sub>2</sub> CUE de 2,64 kUS\$/t SO<sub>2</sub>**

Tabla 12.8.4 indicadores económicos por escenarios Fundición Chagres

ITEM	DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
		INVA	VAC	CAE	CUE
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>	<b>2.505</b>	<b>2.667</b>	<b>209</b>	<b>0,2</b>
1.1	Adición de carga fría por campana CPS	2.505	2.667	209	
<b>1.1</b>	<b>Cumplimiento Límites en Chimenea</b>				
1.1.1	Eliminación humos negros y opacímetro HA (Dos)	3.294	12.946	1.013	
1.1.2	Infraestructura monitoreo control	665	5.883	460	
1.1.3	Tratamiento gases de cola PAS 123.000 Nm3/h	21.837	48.378	3.784	
	<b>Total Cumplimiento Límites en Chimeneas</b>	<b>25.795</b>	<b>67.207</b>	<b>5.257</b>	<b>4,2</b>
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>28.300</b>	<b>69.874</b>	<b>5.466</b>	<b>2,6</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 97% S</b>				
2.1	Captación y tratamiento gases campana secundaria CPS	40.317	85.259	6.670	
2.2	Flotación de escorias externa	57.801	62.087	4.857	
	<b>Total Escenario Captura 97% S</b>	<b>126.418</b>	<b>217.220</b>	<b>16.992</b>	<b>2,6</b>

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12.8.4 Costo Unitario Equivalente por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida Chagres



Fuente: Elaboración propia.

El escenario 96%, considera solo algunos proyectos para el cumplimiento de límites en chimeneas, sin abatimiento significativo de  $\text{SO}_2$ , incorporando soluciones para el control de humos negros en los hornos de ánodos, e infraestructura para monitoreo y control de emisiones por chimeneas, (estimación del 1% de la inversión relativa a medidas de control de límites y de nuevas plantas de abatimiento con descarga final de gases por chimeneas).

#### 12.8.5 Proyección de futuro para la Fundición Chagres

Los gases fugitivos provenientes de giros y de boca de los CPS es la fuente de emisión más significativa en esta instalación, ya que Chagres es una fundición cercana a centros poblados, el consultor recomienda revisar y optimizar los equipos de conversión, campanas de gases primarios y control de tiraje para maximizar el tratamiento hasta ácido sulfúrico.

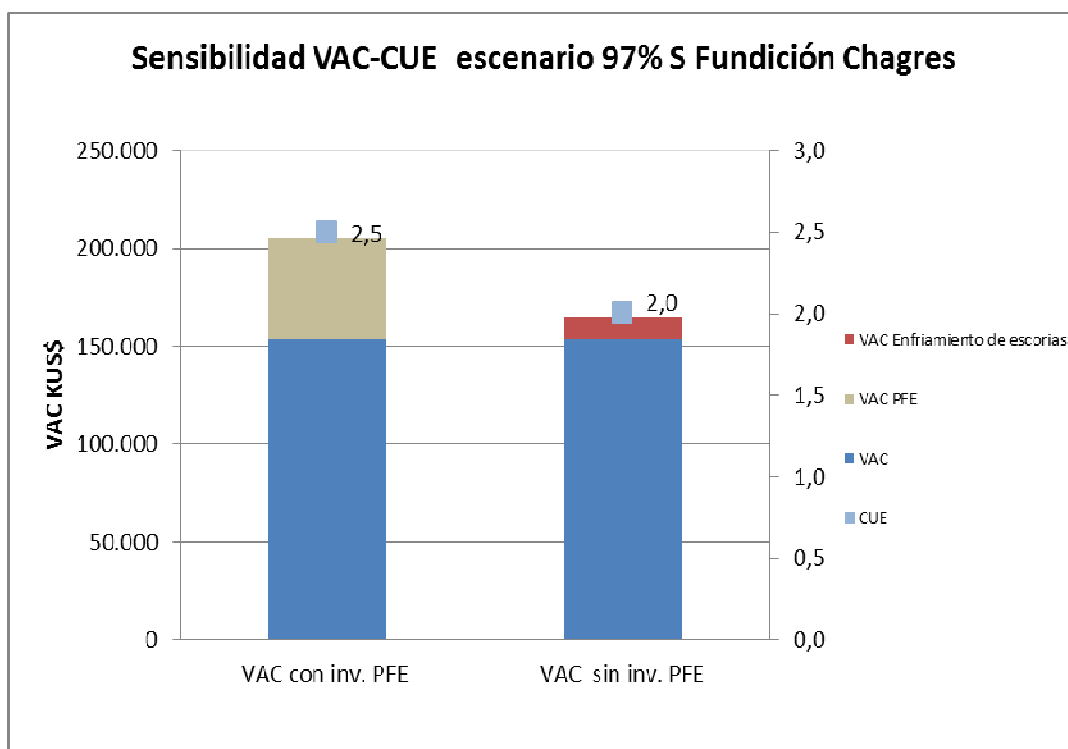
Respecto a los gases de cola provenientes de la planta de ácido, se debe estudiar el proceso Cansolv, que de ser factible permitiría un mayor abatimiento de azufre y producción de ácido.

#### 12.8.6 Sensibilidad de situación Fundición Chagres en relación a la inversión de la planta de flotación

Se entrega una sensibilidad para valorizar los indicadores al excluir la inversión de la planta de flotación de escorias del plan de reducción de emisiones  $\text{SO}_2$ , considerando solo los costos de inversión que implican el manejo, enfriamiento y pre-chancado de las escorias.

Bajo tal condición el valor actualizado de costos total alcanzaría a 164,9 MUS\$, frente al valor actualizado que incluye la planta de flotación de escorias de 205,2 MUS\$.

Gráfico 12.8.6.a Costo para alcanzar escenario 97% S Fundición Chagres



Fuente: Elaboración propia.

### **13. SOLUCIONES Y COSTOS MEDIOAMBIENTALES PARA FUNDICION ALTONORTE**

#### **13.1 General**

- Alcance

El alcance del análisis considera los siguientes objetivos específicos:

- Estimar costos de inversión y operación incrementales de fundición Altonorte, para enfrentar cada escenario regulatorio, indicando la factibilidad de cumplimiento y/o fiscalización, producto de estas inversiones.
- Realizar la evaluación con enfoque costo-eficiencia (US\$/ t abatida).
- Evaluación de VAC y CAE diferencial por escenario (tasa de descuento 6%).

- Caso Base

Para los fines del presente estudio, el Ministerio de Medio Ambiente ha definido dejar invariante la capacidad de procesamiento de concentrados indicada como nominal por cada fundición el año 2010, o esto es, que la cantidad de concentrados que cada faena puede procesar se mantiene inalterada respecto del año base indicado.

Lo anterior, con el fin de establecer el impacto de cada medida de reducción de emisiones en el costo marginal de procesamiento de concentrado, mediante la implementación de sistemas de control y seguimiento.

Se ha seleccionado el año 2010, debido a que este es el año del cual se ha recabado información de mayor detalle y calidad, año en que Altonorte tuvo

una alimentación de concentrados de 983 kt/año y expresó una nominal de 1.160 kt/a.

Por lo tanto la condición base para la fundición Altonorte, considera una capacidad de fusión anual de 1.160 kt/año de concentrados de cobre, a lograr al año 2015.

### 13.2 Descripción General de la Fundición

La fundición Altonorte, como unidad maquiladora, inició operaciones como empresa Refimet equipada con tostadores y una planta de lixiviación, instalando el año 1993 un horno de reverbero como unidad de fusión y equipos de segunda mano para el tratamiento de 203 kta de concentrados. (Fase 1) El año 1997 ya con parcial propiedad de Noranda (25%) inició una expansión para alcanzar 380 kt/a, durante el año 1998 Noranda adquiere el 100% de la empresa, a partir de eso denominada Altonorte.

Entre los años 1999 y 2003 se inició una nueva fase de expansión para alcanzar 816 kta de concentrados, instalando un secador, un reactor Noranda, convertidores, planta de ácido, hornos de refinación, ruedas de moldeo, planta de flotación de escoria.

El año 2005 reinicia la tostación de molibdeno, y el año 2006 la Fase IV para procesar 1.160 kta de concentrados, transfiriendo el 100% de la propiedad a la empresa Xstrata, que durante los últimos 4 años incorpora mejoras en la planta de lixiviación de polvos, una nueva planta de ácido y captura de gases fugitivos con campanas secundarias.

La Fundición Altonorte, se encuentra situada a 20 kilómetros al Sur de Antofagasta, tiene una dotación de 530 empleados propios y 400 contratistas. Ya

que no es una fundición integrada a una minera, procesa concentrados provenientes de distintos proveedores, principalmente de Escondida, Collahuasi, Mantos Blancos y Antamina. Tiene capacidad de producción de ánodos, ácido sulfúrico, ácido débil y óxido de molibdeno, esto último a través de una planta de tostación actualmente fuera de operación.

### 13.2.1 Descripción Sistema Manejo de Gases

El sistema de manejo de gases primarios considera el conjunto de equipos y ductos desde las campanas de los reactores, hasta el ingreso de los gases en la planta de limpieza y producción ácido sulfúrico.

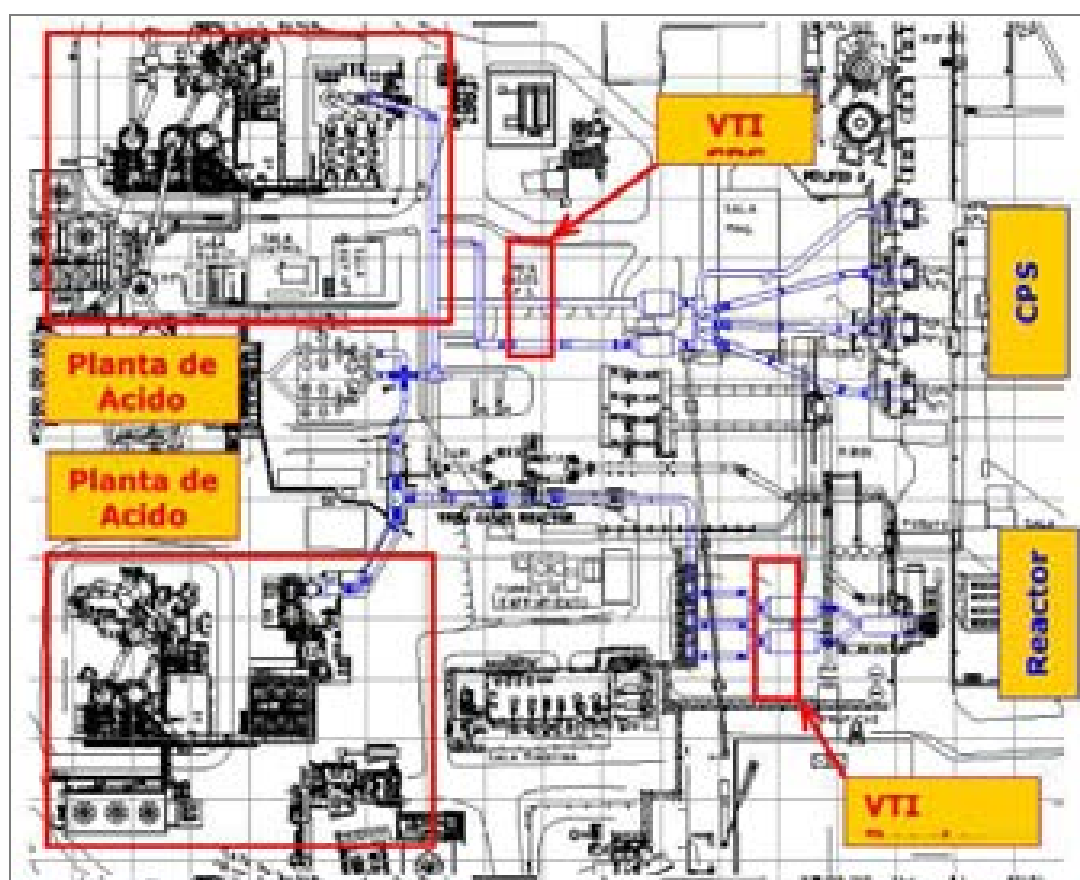
Esta instalación cuenta con un sistema de captura de gases fugitivos sobre la campana primaria del Reactor, él o los CPS en operación y las sangrías de metal y escoria del reactor. Los gases capturados, actualmente se evacuan por chimenea medidos, con un flujo medio de 522.000 Nm<sup>3</sup>/h y 0,00435 % SO<sub>2</sub> <sup>37</sup>. La fase 2 del proyecto, consideraba el tratamiento por lavado y neutralizado de estos gases, que no se implementó y es hoy una situación altamente recomendable frente a nuevas normativas.

En la figura 13.2.1, se muestra el esquema del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición Altonorte.

---

<sup>37</sup> Según DIA Altonorte Memoria de Cálculo, Inventario de Emisiones de SO<sub>2</sub>, p.9 Rev. 26 Enero 2011.

Figura 13.2.1.a Disposición del sistema de manejo de gases primarios Fundición Altonorte.



Fuente: Antecedentes DIA Altonorte.

El sistema de manejo de gases (MAGA) es un sistema compuesto por dos circuitos similares e interconectables, para el reactor continuo y los cuatro Convertidores Peirce Smith, donde cada circuito está compuesto por subsistemas de captura, enfriamiento y limpieza de partículas solidas. Los subsistemas del manejo de gases son:

Captura Primaria de Gases: Los convertidores y el reactor, están dotados de campanas primarias capaces de recoger los gases desde la boca de estos hornos.



El gas de proceso generado a 1200 -1250°C es conducido a través de un red de ductos hasta las Plantas de ácido, pudiendo transportar hasta un total de 386.000 Nm<sup>3</sup>/ h (+/-10%), incluyendo como criterio de diseño una eficiencia de captura en las campanas primarias de 99,5% de los gases generados, con aceptables tasas de infiltración de aire, situación necesaria de corroborar.

Enfriamiento Primario: Los gases provenientes del reactor (CN) se direccionan a un sistema consistente en una serie de ductos dispuestos a modo de serpentín a la salida de la campana del reactor, que enfrían los gases vía radiación y convección, (ductos radiantes). Los gases provenientes de los CPS, son enfriados con agua (cámaras evaporativas).

Limpieza primaria de gases: El gas enfriado es conducido a través de dos Precipitadores Electroestáticos secos (PE con eficiencias mayores a 95%), ubicado en cada circuito de manejo de gases, para el reactor y el de CPS, con el objetivo de recuperar el polvo fino arrastrado en los gases que no decantó en la cámaras de enfriamiento, el cual es tratado en la planta de Polvos. Los gases así limpios alimentan 2 plantas de ácido, por medio de VTI que proveen la succión necesaria.

La Fundición Altonorte posee dos plantas de ácido sulfúrico, para una capacidad total de gases de 190.000 Nm<sup>3</sup>/h +/- 10% y hasta 11% SO<sub>2</sub> cada una, aunque informan tratamiento de gases entre 5,4% y 7,8 %SO<sub>2</sub><sup>38</sup>. Las plantas cuentan con limpieza húmeda y acondicionamiento del gas, liberándolo de As, Hg, y halógenos. La solución obtenida de la limpieza de gases o efluente ácido es usada en la planta de polvos como agente de lixiviación. Posterior a la limpieza húmeda del

---

<sup>38</sup> DIA Cambio tecnológico para la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub>, Anexo B Inventario de emisiones de SO<sub>2</sub>, p. 12.

gas primario se realiza el secado, contacto y absorción del  $\text{SO}_3$  generando ácido sulfúrico.

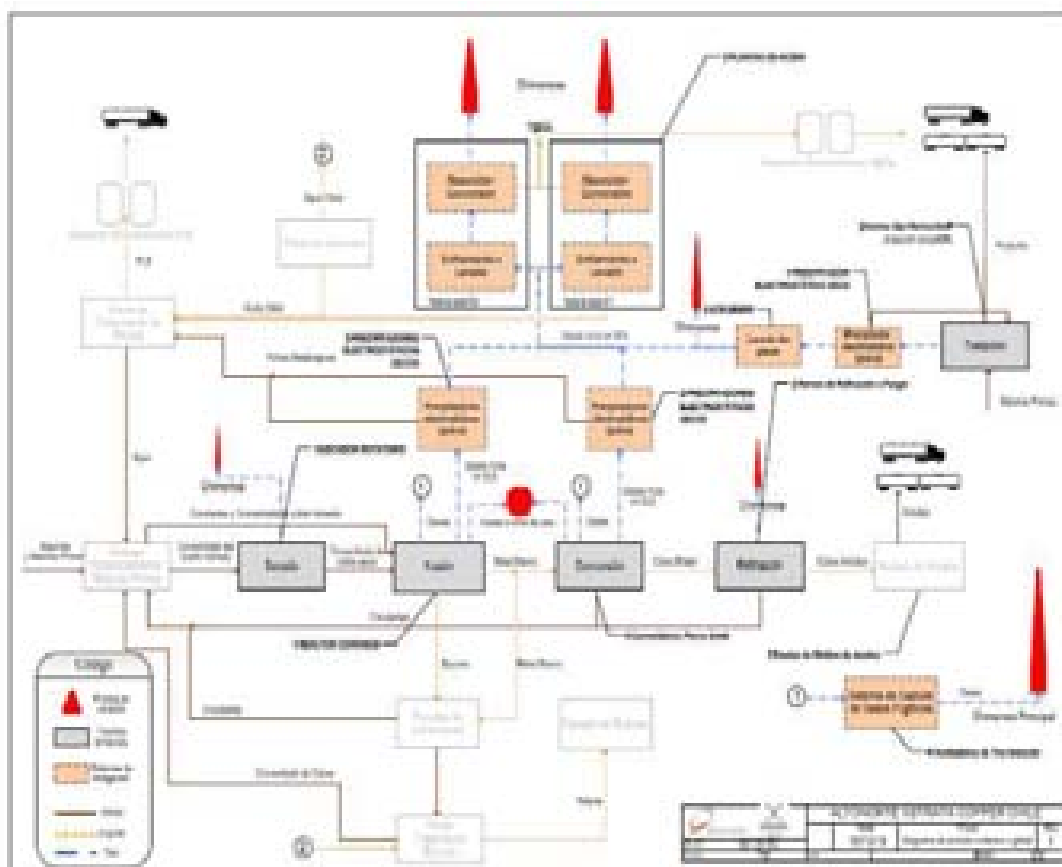
En la actualidad la planta de ácido N°3, tiene contacto simple y la planta de ácido N°1 doble absorción y contacto, lo que le permite una mayor eficiencia de conversión y por ende menores niveles de  $\text{SO}_2$  residuales en los gases de cola. El ácido sulfúrico de 96% pureza, desde estanques dedicados es despachado vía camión o tren a mineras del área norte donde es comercializado, aunque registra contenidos inusualmente altos de Hg (5 ppm).

En el sistema secundario de gases, Altonorte cuenta con sistemas de campanas secundarias en la campana primaria del reactor, sangrías de metal y escoria del reactor, y en las campanas primarias de los CPS, que le permiten capturar y sacar del ambiente laboral los gases fugitivos emanados durante los giros y los procesos de sangrado, siendo conducidos por el sistema de gases fugitivos a la chimenea principal de la fundición.

Originalmente el proyecto concibió el tratamiento por lavado alcalino de los gases capturados, que a la fecha presentan alta dilución, con una concentración inferior a 0,04%  $\text{SO}_{2,}$  razón que ha postergado el tratamiento.

En la figura 13.2.1.b, se muestra el esquema del sistema de captación, manejo y limpieza de gases de fundición Altonorte, así como las fuentes principales de emisiones por ellos determinadas.

Figura 13.2.1.b Esquema del sistema de tratamiento de gases primarios y captura secundarios Fundición Altonorte.



Fuente: DIA Altonorte.

Recientemente en Diciembre del año 2011 Fundición Altonorte presentó una DIA por el proyecto “Cambios tecnológicos para la disminución de emisiones”, en cumplimiento de la Resolución exenta N° 174/2011 de l 4 de Octubre del 2011 de la Comisión y como parte integrante del Plan de trabajo de Reducción de Emisiones desarrollado para introducir cambios tecnológicos para la disminución de emisiones en el secado de concentrados y en la producción de ácido, que les han permitido estimar emisiones para un nuevo plan de reducción de emisiones entre

el año 2011 con 37.000+/- 500 t/a de SO<sub>2</sub> y el año 2015 de 24.000+/-1000 t/a de SO<sub>2</sub>, equivalente a un nivel de 96,7% de fijación, para una fusión de 1.160 kt/a

La fundición Altonorte con la configuración de equipos existentes al año 2010, declaró una fijación de azufre de 93,6% y una emisión 19.979 t/a de S y 83,1 t/a de As.

La producción obtenida de ácido sulfúrico, equivalente a una fijación de 91% del Azufre alimentado a la Fundición, no es suficientemente consecuente con el alto nivel de fijación global de la Fundición, bajo la condición que no tiene tratamiento de los gases fugitivos capturados o secundarios como normalmente se denominan.

### 13.3 Distribución de Emisiones Situación Base Mediano Plazo

La información entregada por la Fundición Altonorte en la encuesta realizada el año 2011 por el MMA, indica una fijación de 93,6% del S y 96,4% para Arsénico, con una fijación en ácido equivalente al 91,5% del azufre alimentado, y un nivel de fusión de 982 kt/año de concentrados de 31,5% S.

Similares niveles de abatimiento fueron planteados en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) presentada en Enero del año 2011, para niveles crecientes de fusión de concentrados, una vez implementados parte de los proyectos del Mejoramiento Operacional de la instalación, que como condición anómala incluyó la no construcción hasta la fecha de la planta de abatimiento o lavado de gases fugitivos capturados (campana secundaria de boca del Reactor, campanas en sangrías de metal y escoria, campanas en bocas de CPS) construidas para tal fin, que opera en la actualidad con descarga de gases por la chimenea principal.

También la DIA acoge emisiones significativas de  $\text{SO}_2$  cuantificadas en el secador rotatorio, equipo de alta capacidad que estaría generando la tostación parcial de concentrados en el secado previo a la fusión. Lo anterior ha llevado a la Fundición Altonorte a generar acciones para en el corto plazo poder cumplir el cronograma comprometido y a generar el proyecto “Cambio Tecnológico para Reducción de Emisiones”, con cambios en el secador y plantas de ácido, presentando una DIA en Diciembre del año 2011, y un nuevo cronograma para alcanzar al año 2015 un nivel de 1.160 kt/a de fusión con un nivel de captura de 96,7% de Azufre.

Los antecedentes de las fuentes emisoras de  $\text{SO}_2$ , proyectados por Altonorte en estos documentos públicos, se indican en tabla 13.3 siguiente, con emisiones base y niveles de fijación que difieren significativamente, de la condición genérica modelada por el consultor para este esquema productivo, como se indica en el capítulo 4. Contrastación de Emisiones Situación base.

Tabla 13.3 Emisiones y niveles de fijación de S planteados por Fundición Altonorte

Fuente Emisora según Fundición Altonorte	DIA ORIGINAL		DIA II Cambio Tecnológico	
	Con proyecto 2010	C/Proy Mejoram-Operacional 2012	Pre proyecto 2010	Con proyecto 2015
Fusión anual concentrados t/a	1.080.000	1.160.000	979.572	1.160.000
% S alimentacion	32,5	32,5	31,5	32,5
S fino alimentado t/a	351.000	377.000	308.761	377.198
	% SO <sub>2</sub>	% SO <sub>2</sub>	% SO <sub>2</sub>	% SO <sub>2</sub>
Gases por Secado	14.742	15.834	12.712	182
Gases en Sangria/transp mata CN			ND	Inc en capt
Gases en Sangria/trans escoria CN			ND	Inc en capt
Gases por boca CN fugitivos o <b>No capturados</b>	<b>10.321</b>	<b>11.085</b>	<b>9.104</b>	<b>14.318</b>
- Gases CN campa VTI (99% EFI) <b>Total capturados</b>	4.070	4.215	<b>3.659</b>	<b>4.561</b>
- Gases giro CN			ND	ND
Gases por boca CPS fugitivos / total capturados			ND	<b>2.669</b>
- Gases CPS campana y VTI			ND	ND
- Gases giro CPS			ND	ND
Gases en vac., transporte Esc CPS			ND	ND
Gases en vac., transporte Cu CPS			ND	ND
Gases Transp /enfr/chancescoria			ND	ND
Gases Refino evacuados HA	414	445	315	561
Colas PAS 3 Cont. /Abs Simple 97%--->DC, cat Cs	11.991	12.880	10.357	535
Colas PAS 1 Cont./abs. doble 99%----> Cat Cs	4.237	4.551	3.828	2.175
<b>Emisión distribuida SO<sub>2</sub></b>	<b>45.775</b>	<b>49.010</b>	<b>39.975</b>	<b>25.001</b>
Emisión informada SO <sub>2</sub>	45.630	49.010	39954/39958	25.000
Captura y Fijación distribuida calculada	93,5	93,5	93,5	<b>96,7</b>

Fuente: Elaboración propia con antecedentes públicos.

De hecho, últimamente la empresa Xstrata Copper Chile S.A, titular del complejo metalúrgico Altonorte presentó, un Plan de Trabajo de Reducción de Emisión de SO<sub>2</sub>,<sup>39</sup> para conocimiento y aprobación de la Comisión Regional de Medio Ambiente de Región Antofagasta, con las acciones y metas para tener una reducción efectiva de la emisión de SO<sub>2</sub> de Altonorte y lograr mediante acciones de corto plazo e inversiones en mejoras tecnológicas, concluir al año 2015 con niveles sustancialmente mejores (25000 t/a año de SO<sub>2</sub>) a los obtenidos durante el año 2010 (con 39.954 t/a de SO<sub>2</sub>).

<sup>39</sup> Documento público del 14 de diciembre 2011 Xstrata a Comisión de Evaluación Ambiental región de Antofagasta p. 3-4-5.

### 13.3.1 Emisión de Azufre y Arsénico

Considerando el criterio definido de distribución de emisiones por fuentes, bajo el valor medio de fijación de S y Arsénico, declarado versus el calculado por el consultor, que en el caso de la Fundición Altonorte, presenta altas diferencias, la distribución estimada base de emisiones y contenido proyectado de azufre para el mediano plazo bajo la condición nominal planteada ha considerado:

- Incluir la capacidad de fusión de 1160 kta de concentrados con 32,52 %S promedio, aún no lograda.
- Incluir a criterio del consultor el 50% de la reducción esperada por Altonorte de emisiones de S por medidas de corto plazo postuladas por Altonorte, bajo las siguientes 3 acciones:
  - Instalación de una sala centralizada de operación del reactor, los CPS y las Plantas de ácido (2011).
  - Incorporación de un sistema de control automático del quemador del secador de concentrados (2011).
  - Trabajos de sustitución del catalizador de la Planta de Acido N° 3 de simple contacto, para obtener un reducción de alrededor de 1.000 t/a de SO<sub>2</sub>.

Bajo la consideración indicada la fijación base de S o SO<sub>2</sub> alcanza a 92,7%+/- 1,3% y la fijación calculada de 96,0% en As, con una emisión de 52.506 t/a de SO<sub>2</sub>, como se muestra en tabla 13.3.1 siguiente. Se destacan también las diferencias de emisión frente la situación base 2010 con una emisión declarada de 39.954 t/a SO<sub>2</sub> y la de la meta considerada para el 2015 de 25.000 t/a de SO<sub>2</sub>, con una fusión de 1.160 kta de 32,5 %S promedio, condición a cautelar en la preparación de carga de esta instalación maquiladora.

Tabla 13.3.1: Distribución de emisión de azufre y arsénico Fundición Altonorte

Altonorte	Med. Plazo	
Alimentación concentrado t/año	Nominal	1.160.000
Ley Media S en concentrados secados Fu (%)		32,5
Ley Media S en concentrados a Fu (%)		31,0
Ley Media As en concentrados (%)		0,4

Emisión por Fuentes t/a Fundición Altonorte	Base Med. Plazo	
	Azufre	Arsénico
Secado	6.557	83
Fugitivo primario CN (giro+campana)	4.100	50
Residual tratamiento fugitivo primario CN	n/d	n/d
Fugitivo Sangría CN MB/Escoria	3.396	39
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	7.276	5
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d
Planta de Flotación de Escorias	24	1
Gases de cola PAS	7.706	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d
Refino HA	188	53
Otras fuentes	1.679	1
Ajustes	-4.674	-37
<b>Total emisión t/a</b>	<b>26.253</b>	<b>195</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 1,3\%</math> S</b>	<b>92,7</b>	<b>96,0</b>

Nota: Tostación parcial de S en secador disminuye contenido de Azufre a Fundición, con cambio de base del S ingresado a Fundición.

Nota(n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla incluye una sección de ajustes correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a lo declarado por la fundición, debido a que en todas las fundiciones se ha utilizado el valor medio de fijación de S, entre el calculado en base a modelación y el declarado por cada fundición. El nivel de fijación de arsénico esta asociado a la fijación de S.

### 13.3.2 Emisión de mercurio

La generación del mercurio está fuertemente relacionada con el tratamiento de concentrados de cobre con contenido de oro, el que normalmente se encuentra



acompañado con mercurio, situación frecuente en las fundiciones maquiladoras. Esto generará emisiones en su estado gaseoso, mayoritariamente en la etapa de fusión de los concentrados, que constituirá emisión en la medida que la captura de gases no sea suficientemente estanca.

Se estima que sobre el 98% de mercurio contenido en los concentrados (sin antecedentes informados para la Fundición Altonorte) pasa a la fase gaseosa y se distribuye en forma similar al As, vale decir preferentemente hacia los gases. Por lo tanto, la mayor proporción del mercurio ingresado a la fundición es capturado en los Precipitadores electrostáticos secos como contenido de los polvos, y una proporción llega a la PAS, donde es captado en la etapa de limpieza húmeda.

La presencia de Hg en los concentrados procesados por la Fundición Altonorte se evidencia por el alto contenido de mercurio en el ácido comercial producido (5 ppm el año 2010), por lo que como primera medida estos deberán ser caracterizados en los concentrados para su posible segregación hacia una planta externa con sistema dedicado de control (torre desmercurizadora en PLG) o eventualmente considerar su instalación. Similar seguimiento del metal deberá realizarse en los polvos y el retorno de ripios.

Como referencia se indica que comparativamente la Fundición Ventanas tiene una alimentación promedio de 9 ppm en concentrados llegando a producir un ácido de calidad comercial, con un contenido no superior a 1 ppm de Hg, contando adicionalmente con una torre desmercurizadora en su PLG, que opera según requerimientos, con un eficiencia inferida de aproximadamente 55%.

Aunque la mayoría de los sistemas de descarga, que contienen metales se controlan eficazmente con los mismos controles de depuración que para el material particulado, el mercurio seguirá en estado de vapor a temperatura ambiente y puede atravesar algunos equipos de control.

Consecuentemente, el remanente de mercurio fugitivo puede ser capturado desde los gases fugitivos capturados, principalmente del área de fusión. En el tratamiento de estos gases, debe cuidarse que la temperatura de la solución en el proceso venturi/scrubber debe mantenerse por debajo de la temperatura ambiente (5 a 10 °C). Una alternativa para soslayar el tema de la temperatura, es usar carbono activado para capturar el mercurio.

### 13.3.3 Emisión de material particulado

Las emisiones de material particulado de los procesos de secado, fusión y conversión de cobre, pueden contener metales pesados volátiles. Las emisiones fugitivas pueden ser mayores que las recuperadas y por lo tanto, el control de las emisiones fugitivas es especialmente importante.

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

En el caso específico de Altonorte, la operación de secado, dispone de un sistema de control de material particulado constituido por dos filtros de mangas en la descarga del secador y transporte neumático del concentrado seco, por lo que deberá implementar mejoras para el control de temperaturas que eviten la tostación parcial de concentrados, la generación de volátiles y el arrastre de particulado.

### 13.4 Limitaciones Medioambientales de la Arquitectura Tecnológica y Disposición de Equipos.

La arquitectura tecnológica Reactor, Convertidores Peirce Smith, Planta Flotación de Escorias (CN/CPS/PFE) es similar a la del esquema CT/CPS/PFE que tiene la

característica de poseer dos operaciones unitarias con equipos que basculan, uno con proceso continuo y otro discontinuo (proceso batch), como son el Reactor (CN) y los CPS, respectivamente, lo que significa que la boca de estos equipos con su campana primaria de gases no tiene un sello perfecto y por lo tanto se puede generar emisión de contaminantes como SO<sub>2</sub>, As, Hg, MP y otros.

Para contrarrestar esta situación, en los ductos de gases se dispone de ventiladores de tiro inducido (VTI), que por la succión producen una presión negativa dentro de las campanas primarias, generando una infiltración de aire externo hacia el interior de la campana, que en el caso de Altonorte se evalúa entre 120 a 150%, con una eficiencia de captura informada de 99,5%, la que en opinión del consultor es alta considerando la fijación en ácido, y como valor está por sobre la exigida a sistemas de manejo gases eficaces, con campanas de alta eficiencia

Sin embargo, las emisiones más importantes, son generadas cuando estos equipos están recibiendo materiales por boca, girando desde su normal posición de soplado y por lo tanto emitiendo todos los gases de proceso a la atmósfera, situación válida para el CN y los CPS. Por esta razón, operacionalmente se trata de reducir el giro del CN a lo estrictamente necesario (cambio de tobera de inyección, cambio de pasaje de sangría y apertura de toberas), realizando los agregados de material granulado por garr gun o inyección. Para el caso de los CPS, aunque el carguío de metal caliente es por boca, la adición de carga fría, puede ser agregada a través de una compuerta lateral en la campana.

Para la captura de gases fugitivos durante los giros Fundición Altonorte ha instalado campanas secundarias envolventes en los CPS y una campana secundaria sobre la campana primaria en el reactor, así como mejoras en campanas existentes en las sangría de metal y escoria, que mediante aspiración generada por ventiladores de tiro inducido (4 unidades), mejoran el ambiente

laboral evacuando los gases por chimenea, reportando flujos medidos ente 520 a 540 kNm<sup>3</sup>/hr con concentraciones medias de SO<sub>2</sub> entre 0,03 y 0,04%, vale decir altísima dilución.

La fracción de gases fugitivos así capturados alcanza cerca del 25% del total de emisiones fugitivas reportadas, según se indica en tabla siguiente obtenida de documento citado<sup>40</sup>.

Tabla 13.4 Estimación Altonorte de Emisiones SO<sub>2</sub> año 2010

Distribución Emisiones gases Año 2010 Fundición Altonorte	SO <sub>2</sub> (t/a)
Gases del secador rotatorio	12.712
Gases Cola PAS 3, simple contacto	10.357
Gases cola PAS1	3.828
Chimenea Hornos ánodos (HA)	315
Gases fugitivos capturados (chimenea principal)	3.659
Gases fugitivos no capturados	9.104
Emisión reportada	39.954

Fuente: Elaboración propia con fuente de datos citada.

En operación normal, las dos plantas de ácido existentes, a través de sus circuitos de conexión, procesan los gases del reactor CT y 2 CPS disponiendo de capacidad volumétrica y de concentración para tratar la totalidad de gases primarios. La planta N°1 es de doble absorción y la planta de ácido N°3 de simple absorción y actualmente de baja eficiencia, por lo que se considera próxima su modificación a doble absorción y contacto.

El problema mas evidente de emisión se genera sin embargo en el secador rotatorio de alta capacidad, cuyo reemplazo Altonorte ha postulado como

<sup>40</sup> DIA Cambio Tecnológico, Anexo B Inventario de emisiones de SO<sub>2</sub>, p.13.

prioritario, por una unidad de secado a vapor, insumo que deberá generar a través de una caldera a petróleo.

Además de los diseños, mantenibilidad, disponibilidad de los equipos existentes y las prácticas operacionales de cada instalación constituyen un factor relevante en el control de emisiones.

### 13.5 Selección de Soluciones Tecnológicas Viables de control de Emisiones de Azufre y Arsénico

De los antecedentes de la Distribución Base de Azufre y Arsénico indicada en el punto 13.3, para la condición nominal de la Fundición Altonorte se puede concluir que las emisiones relevantes se encuentran en:

- La etapa de secado de concentrados que representa la situación de la fundición Altonorte, donde se generan altas emisiones de azufre, por las dificultades de control de temperaturas en esta unidad de alta capacidad, que como único equipo abastece la unidad de fusión de concentrados, con la mezcla concentrado fresco mas concentrado de escoria.
- Emisiones residuales en los gases de cola de la PAS N°3 actualmente de simple contacto.
- Emisiones de SO<sub>2</sub> y probablemente As, Hg y MP por chimenea principal correspondientes a gases fugitivos que son capturados mediante campanas secundarias en el reactor, sangrías de metal y escoria del reactor y campanas secundarias en los CPS, asociadas principalmente a los giros realizados en el reactor y en los CPS para recibir las cargas de MB y la carga fría, para el control de temperatura. Estas emisiones estarían disminuidas al asumir alta eficiencia de las campanas primarias y baja

eficiencia, en las secundarias, agravada por la alta dilución de los gases, que incorporarían las distintas fuentes en el ducto común.

Los proyectos y soluciones tecnológicas para alcanzar los escenarios de fijación en estudio se han priorizado tomando en consideración las fuentes de mayores emisiones y también la información de los planes de trabajo informados por Altonorte considerados en la DIA Cambio tecnológico para la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub>.

En este sentido, el tratamiento integral de los gases secundarios del CN, sangrías y CPS, que requeriría de una gran planta de lavado de gases, no ha sido considerado conveniente o efectivo por el alto volumen y baja concentración del gas informado, por lo que se propone realizar un Overhaul y rediseño del sistema de captura de gases del Reactor Noranda (campana secundaria y sangría de metal blanco) y el tratamiento por lavado alcalino de estos gases, de mayor SO<sub>2</sub>, As, y Hg.

Esta solución, que mantendría la evacuación de gases de CPS y sangría de escoria del RN por chimenea, ha sido considerada como solución más tardía, en razón a cumplir escenarios de mayor exigencia de fijación y a que la Ingeniería deberá revisar los diseños incorporados por el anterior proyecto de Mejoramiento Operacional, que a la fecha generan una alta dilución de los gases y gran volumen de gases, elementos ambos de baja relación beneficio/costo.

Para la racionalización del sistema, se postula revisar el diseño de la campana secundaria del reactor e independizar líneas considerando el sistema de captura de gases de CN y sangría de metal del reactor en forma independiente para llevarlos a tratamiento en una nueva planta, de los capturados en los CPS y sangría escoria del CN.

### 13.5.1 Proyectos y Medidas de Control de Emisiones

En resumen se indican las medidas que Altonorte señala en etapa de materialización y que apuntan a un mejoramiento medioambiental de la fundición.

- Implementación de sala de control centralizada y sistema de control automático del quemador del secador.

Durante el año 2011 se instaló una sala de control centralizado de la operación del reactor, los CPS y las plantas de ácido sulfúrico, con el objetivo de mejorar la coordinación de operaciones en la captura de gases y mejorar la toma de decisiones y eficiencia operacional del complejo.

Como mejora operativa, también se implementó el sistema de control automático del quemador del secador rotatorio, para reducir la variabilidad de la temperatura y en forma consecuente emisiones de SO<sub>2</sub> en el secador existente.

Con ambas medidas Altonorte pretende reducir en 0,8% las emisiones de SO<sub>2</sub> (93,6 % a 96,4% de fijación). El consultor asume alto este compromiso, por los beneficios asociados al sistema coordinador que redundaría en mayor estabilidad del sistema de captura de gases fugitivos, por lo que sólo considera una mejora del 0,4%.

- Sustitución del catalizador de la PAS N°3.

Esta medida se encuentra programada para el año 2012, y considera el reemplazo del actual catalizador de vanadio, por un nuevo catalizador con cesio, (que funciona a menor temperatura y que normalmente es usado en la primera capa del reactor de conversión, para más altas concentraciones de SO<sub>2</sub>). Con esta medida la fundición Altonorte espera reducir 1.250 t/a de SO<sub>2</sub>, equivalente a una mejora en eficiencia y reducción de la emisión declarada en esa fuente, valor también

considerado alto, por lo que se ha asumido solo la mitad, equivalente a 0,1% de la emisión global.

- Sustitución del secador de concentrados por secado a vapor

Para la fundición de actual secador Altonorte ha considerado la opción del reemplazo del secador rotatorio por un secador a vapor, proyecto a realizar durante el año 2013, con lo que obtendría una mejora sustantiva de emisiones de S, evaluada en 1,7% del azufre nuevo alimentado a la fundición. La inversión estimada para este cambio se estima en 70.000 KUS\$.

El secado de concentrados debería tener disponibilidad y capacidad asegurada, para no frenar el proceso fundición, por lo que holguras en esta etapa son normalmente requeridas.

- Incorporación de sistema de doble absorción en la planta de Acido N°3 del complejo

Este proyecto a implementar en el año 2014 en la Fundición Altonorte, es una solución común para las actuales fundiciones con plantas de simple contacto, que tiene la ventaja de recuperar ácido sulfúrico. Transformar la planta a doble absorción y contacto, implica incrementar el azufre fijado en ácido, equivalente a 0,94% del Azufre alimentado a la Fundición. La inversión, en base al caudal de la planta se estima en 30.000 kUS\$ y se realiza durante una detención general de la planta.

- Overhaul y rediseño captación y limpieza de gases fugitivos CN y sangrías MB

Mejoramiento de la captación y limpieza de azufre y arsénico en la fundición, mediante el rediseño de la campana secundaria y circuito de manejo de gases fugitivos, independizando líneas, para conectar la línea del CN y sangría MB a



una nueva planta de lavado de gases para estimativamente 200.000 Nm<sup>3</sup>/h (scrubber u otro con solución alcalina), que fije el S, As, y otros, como sólido a disponer en deposito autorizado. La concentración de SO<sub>2</sub> esperada alcanza a 0,23% en lugar del obtenido en la chimenea con un flujo de 530.000 Nm<sup>3</sup>/h, declarado en 0,033 %.

Se estima que los plazos requeridos para los estudios de factibilidad, autorización de recursos, adquisiciones e instalación, permitirían tener operativo el sistema el primer semestre de 2016, en atención a que Altonorte ya ha iniciado los estudios preliminares según se muestra en su tabla de Proyección de escenario futuro<sup>41</sup>, donde también acredita un aumento del nivel de captura de gases fugitivos.

Tabla 13.5 Estimación Altonorte de Emisiones SO<sub>2</sub> futuro, 754.395 t/a SO<sub>2</sub> ingresado a Fundición

Distribución gases Año 2016 Fundición Altonorte	SO <sub>2</sub> (t/a)
Gases del secador , secador a vapor	182
Gases Cola PAS 3, doble contacto, catalizador de Cesio	535
Gases cola PAS1	2.175
Chimenea Hornos ánodos (HA)	561
Gases fugitivos capturados (chimenea principal)	<b>14.318</b>
Gases fugitivos no capturados del reactor	4561
Gases fugitivos no capturados de CPS.	2.669
Emisión reportada	25.000

Fuente: Elaboración propia en base fuente citada.

La inversión requerida estimada por Coprim para el rediseño y la planta de tratamiento por lavado alcalino, se estima de aproximadamente 34,6 MUS\$, y de

<sup>41</sup> DIA Cambio tecnológico para reducción de Emisiones, Diciembre 2011 Anexo B .p. 17.

acuerdo al potencial de reducción de emisiones de esta medida de control, se tendría una disminución de azufre de 1,2% y principalmente de As.

Los costos de operación incrementales asociados a esta tecnología, consideran el mayor requerimiento energético (KWH/Nm<sup>3</sup>/h) y los gastos en reactivos, mantención, así como disposición de residuos de la nueva planta.

Tabla 13.5.1 Proyectos de reducción Emisiones Fundición Altonorte

Medidas de mejoramiento ambiental	Reducción emisión S %	Reducción emisión As %	Ton abatida SO <sub>2</sub> t/a	Ton abatida As t/a
<b>Fundición Altonorte</b>				
<b>Escenario 95% S</b>				
Secador a vapor	1,7	1,7	12.925	83
Planta de ácido a doble absorción	0,8	-	6.350	-
<b>Escenario 96% S</b>				
Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	-	-	-	-
Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm <sup>3</sup> /h	1,2	1,1	9.395	54

Fuente: Elaboración Propia

### 13.6 Niveles de Mejoramiento Ambiental y Cumplimiento de Normativas

Con las mejoras indicadas en los puntos anteriores, la distribución de emisiones por fuentes expresadas en toneladas se modifica y queda como sigue:

Tabla 13.6 Emisiones según Captura/ Fijación de Azufre y Arsénico por escenario  
Fundición Altonorte

Altonorte	Med. Plazo
Alimentación concentrado t/año	Nominal 1.160.000
Ley Media S en concentrados secados Fu (%)	32,5
Ley Media S en concentrados a Fu (%)	31,0
Ley Media As en concentrados (%)	0,4

Emisión por Fuentes t/a Fundición Altonorte	Base Med. Plazo		Escenario de 95% S		Escenario de 96% S	
	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico	Azufre	Arsénico
Secado	6.557	83	94	0	94	0
Fugitivo primario CN (giro+campana)	4.100	50	4.295	50		
Residual tratamiento fugitivo primario CN	n/d	n/d	n/d	n/d	936	11
Fugitivo Sangría CN MB/Escoria	3.396	39	3.558	39	2.219	25
Fugitivo primario CPS (giro+ campanas)	7.276	5	7.623	5	7.623	5
Residual tratamiento fugitivo primario CPS	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Planta de Flotación de Escorias	24	1	26	1	26	1
Gases de cola PAS	7.706	0	4.531	0	4.531	0
Residual tratamiento gases de cola	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Refino HA	188	53	197	53	197	53
Otras fuentes	1.679	1	1.759	1	1.759	1
Ajustes	-4.674	-37	-4.889	-37	-4.889	-37
<b>Total emisión t/a</b>	<b>26.253</b>	<b>195</b>	<b>17.194</b>	<b>112</b>	<b>12.497</b>	<b>58</b>
<b>Captura y Fijación ajustada con desviación <math>\pm 1,3\%</math> S</b>	<b>92,7</b>	<b>96,0</b>	<b>95,4</b>	<b>97,7</b>	<b>96,7</b>	<b>98,8</b>
Toneladas abatidas (t/a)	-	-	9.058	83	4.698	54
Toneladas de ácido incremental (t/a)			9.724		0	

Nota (n/d): No dispone.

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 13.6 se puede apreciar un cambio en los valores de las secciones Otras fuentes y Ajustes, debido a que en base mediano plazo se considera un cambio de base del azufre ingresado a Fundición, producto de que la tostación parcial de azufre en el secador disminuye el contenido de Azufre a la Fundición.

### 13.6.1 Cronograma de cumplimiento de los escenarios establecidos

Con las soluciones tecnológicas establecidas para disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub>, As, Hg y MP y poder dar cumplimiento a los escenarios definidos, ellos se cumplirían según el siguiente cronograma:

Tabla 13.6.1 Cronograma de cumplimiento de escenarios

CRONOGRAMA DE CUMPLIMIENTO ESCENARIOS DE CAPTURA DE AZUFRE Y ARSENICO, FUNDICION ALTONORTE					
MEDIDA DE DESCONTAMINACION	AÑO				
	2013	2014	2015	2016	2017
Nivel de fijación de SO <sub>2</sub> 92.8%+/-1,3%		95,4%	96,7%		
Reemplazo sel Secador Rotatorio po secador (es) a vapor	xxxxxxxxxxxx				
Cambio PAS 3 de simple a doble absorción y contacto		xxxxxxxxxxxx			
Rediseño Captura, manejo y nuevo tratamiento Gases Fugitivos CN Sangría MB		xxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx		

Fuente: Elaboración Propia

### 13.6.2 Consideraciones para la sustentabilidad de resultados en el Largo Plazo

Para el consultor es importante relevar la importancia de la revisión del sistema general de manejo de gases de la Fundición Altonorte, en términos de que la instalación tiene dos desafíos complementarios y simultáneos de aumento de capacidad y reducción de emisiones.

Lo anterior requiere revisar las practicas operativas para el conjunto de operaciones unitarias, con las que debe opera, así como diseño y estado de equipos, dado que se plantea operar a la máxima eficiencia de: parámetros operacionales de calidad de la carga, capacidad de procesamiento de ella, equipos de captura, manejo y tratamiento de gases metalúrgicos, planta de limpieza de gases y captura/limpieza de gases fugitivos para que como conjunto, la fundición cumpla el nivel determinado nivel de captura, fijación y emisión de contaminante inferior a las 25.000 t/a de SO<sub>2</sub> comprometidas, bajo su concepción operativa de una detención anual de planta cada 18 meses.

En la práctica, lo normal es que de tiempo en tiempo, cualquier equipo del conjunto descrito anteriormente baje su eficiencia o falle y consecuentemente como conjunto no se cumpla el nivel de captura y emisión de contaminante.

### 13.6.3 Comentarios sobre infraestructura, espacios disponibles e interferencias

Para enfrentar el procesamiento de los gases fugitivos que se captarían desde las sangrías de MB y campana secundaria del CN, se dispone de espacio en el lugar, ya que el proyecto Mejoramiento Operacional, inicialmente incluyó una planta de tal tipo.

El reemplazo del secador operará en un lugar adyacente al equipo existente. El espacio requerido varía entre 200 a 300 m<sup>2</sup>.

El mejoramiento de planta de ácido N<sup>3</sup>, que básicamente apunta a aumentar su eficiencia de conversión, requiere de una nueva torre de absorción adyacente. Las interferencias se circunscriben a la instalación y conexión de estos equipos, que son fabricados externamente y llegan a la planta previos a la mantención anual de la fundición, para su instalación y conexiones necesarias.

El tratamiento de gases fugitivos requerirá espacios para el nuevo scrubber, sector de preparación de reactivos y para el equipo de sedimentación y separación sólido líquido del sólido a disponer. Los gases deberán ser evacuados por chimenea, (disponible chimenea 8, adyacente a un scrubber de ex tostador de molibdenita).

## 13.7 Costos de Inversión y Operación Escenarios Fijación Azufre y Arsénico

### 13.7.1 Inversiones por escenarios y gastos pre-inversionales

De acuerdo a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor y rango de precisión +/- 30%, las inversiones privadas requeridas por escenario para la Fundición Altonorte alcanzan a 100 MUS\$ para el escenario 95% y 135 MUS\$ para el escenario de 96%. La estimación de las inversiones de capital considera adicionalmente como inversión pre inversiones un 7% de la inversión total, considerando ya realizados parte de la Ingeniería conceptual.

Tabla 13.7.1.a Costos de Capital por escenario Fundición Altonorte.

DESCRIPCIÓN	Inversión Sub total	Costos PreInversionales	TOTAL
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>
<b>Escenario Captura 95% S</b>			
Secador a vapor	70.000	4.900	74.900
Planta de ácido a doble absorción	30.000	2.100	32.100
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>100.000</b>	<b>7.000</b>	<b>107.000</b>
<b>Escenario Captura 96% S</b>			
Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	7.990	559	8.549
Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm3/h	26.630	1.864	28.494
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>134.619</b>	<b>9.423</b>	<b>144.043</b>

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra en la tabla la distribución de las inversiones y costos pre-inversionales.

Tabla 13.7.1.b Distribución costos de capital por escenario y proyectos Fundición Altonorte

DESCRIPCIÓN	AÑO 1 2011	AÑO 2 2012	AÑO 3 2013	AÑO 4 2014	AÑO 5 2015	AÑO 6 2016	AÑO 7 2017
<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>							
<b>Escenario Captura 95% S</b>							
Secador a vapor	0	39.900	35.000	0	0	0	0
Planta de ácido a doble absorción	0	17.100	15.000	0	0	0	0
<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>0</b>	<b>57.000</b>	<b>50.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Escenario Captura 96% S</b>							
Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	0	0	559	3.995	3.995	0	0
Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm <sup>3</sup> /h	0	0	1.864	13.315	13.315	0	0
<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>0</b>	<b>57.000</b>	<b>52.423</b>	<b>17.310</b>	<b>17.310</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 13.7.2 Costo Incrementales de Operación

Los costos anuales incrementales de operación, determinados en 2,2 MUS\$/año para el escenario de 95% y 11,9 MUS\$/año para el escenario de 96% fijación de azufre, incorporan en el caso del paso a doble absorción de la PAS 3 la producción incremental de ácido como un crédito al costo (en el ítem disposición de producto), la venta del ácido adicional generado a un ingreso marginal neto de 60 US\$/t.

Tabla 13.7.2 Costos de Operación incrementales por escenario Fundición Altonorte.

		COSTOS DE OPERACIÓN INCREMENTALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL INCREMENTAL ANUAL DE OPERACIÓN	Costo Energía	Costo Insumos y otros	Costo Mantenición	Costo disposición	Tonelada Abatida (Ton/a)
	COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	KUS \$/a	SO2
1	Escenario Captura 95% S						
1.1	Secador a vapor	1.193	-	1.193	-	-	12.925
1.2	Planta de ácido a doble absorción	1.576	1.085	-863	491	863	6.350
	Producción de ácido	-583	-	-583	-	-	-
	Total Escenario Captura 95% S	2.186	1.085	-253	491	863	19.276
2	Escenario Captura 96% S						
2.1	Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	186	186	0	-	-	-
2.2	Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm3/h	9.501	879	886	886	6.850	9.395
	Total Escenario Captura 96% S	11.873	2.150	633	1.377	7.713	28.671

Fuente: Elaboración Propia

Los costos determinados en su mayor cuantía corresponden a Gastos de disposición de residuos solidos (riles no incluidos), reactivos e incrementales de Energía Eléctrica, aunque en este caso el requerimiento de reforzamiento de instalaciones de distribución y subestaciones eléctricas, debería haber sido considerado en el proyecto Mejoramiento Operacional, al igual que el agua tratada para generación de vapor.

Otros criterios relevantes usados en la determinación de costos, son los gastos de mantención asociados a las plantas como un porcentaje de la inversión.

### 13.7.3 Energía Eléctrica Incremental y agua adicional requerida

Se ha estimado un incremento en el requerimiento de combustible para secado (20% adicional al actual índice de 7,4 Kg/t secada) para la generación en una caldera del vapor requerido para el secado, caldera que operaría con petróleo pesado Enap 6 y agua tratada.

El consumo adicional de energía eléctrica se verá incrementado por la variación de presión requerida por el volumen de gases a tratar, estimado considerando un



estándar de 5.200 MWH /año por cada 100.000 Nm<sup>3</sup>/h al estar enclavados a una torre lavadora, en reemplazo de los 3300 MWH/año del sistema normal de VTI hacia chimenea. El costo promedio usado para el MP de Energía alcanza a 84,5 US\$/MWH

Lo anterior lleva a determinar un consumo anual de 25,4 GWH/a para lograr una fijación de 96% cercano a la meta de emisiones y 12,8 GWH/ a para el escenario de 95%.

Tabla 13.7.3 Consumo Incremental de energía y agua industrial

Medidas de mejoramiento ambiental	Puesta en operación	Consumo incremental Energía	Consumo incremental de agua
Fundición Altonorte	Año	MW/h/a	m3/a
<b>Escenario 95% S</b>			
Secador a vapor	2014	1.717	
Planta de ácido a doble absorción	2014	12.844	1.786
Consumo MWh/a		12.844	
<b>Escenario 96% S</b>			
Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	2016	2.200	-
Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm3/h	2016	10.400	3.000
Consumo MWh/a		25.444	

Nota: El valor en color azul se refiere al consumo incremental de petróleo en t/a

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 13.7.3.a Incremento consumo Energía Eléctrica

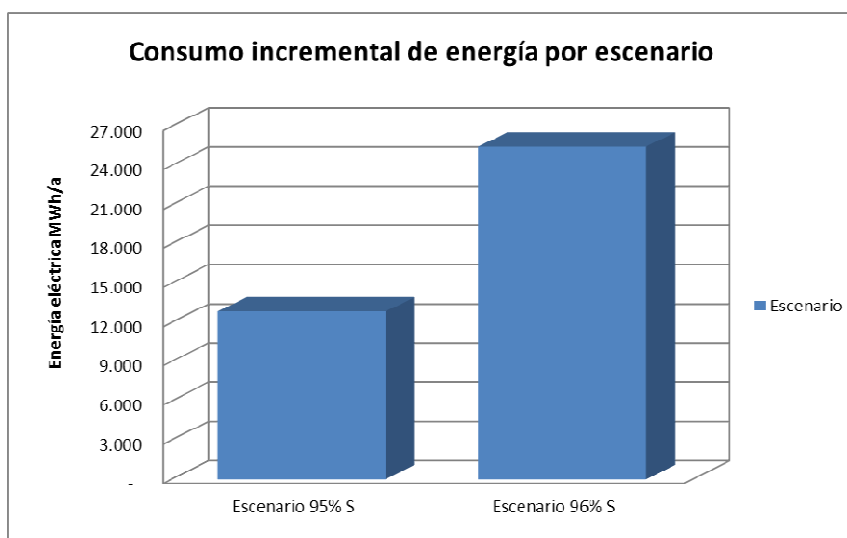
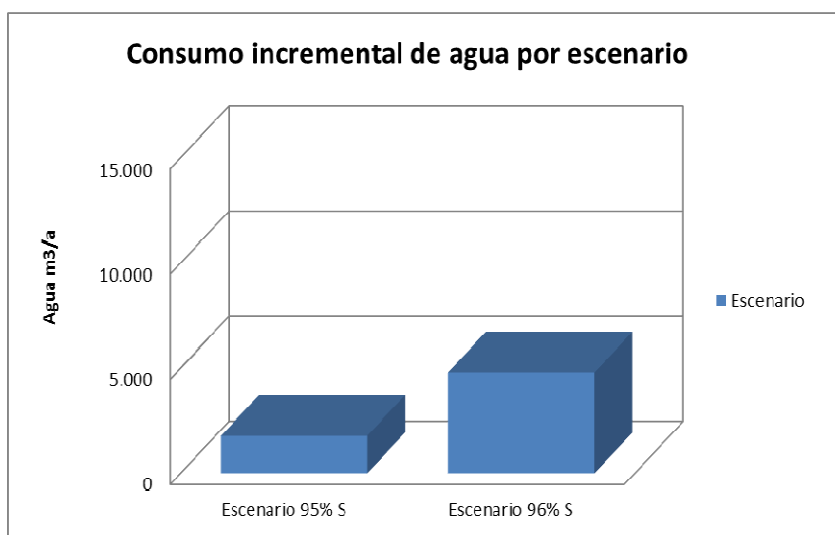


Figura 13.7.3.b Incremento consumo Agua Industrial



Fuente Gráficos 13.7.3 a y b: Elaboración Propia

### 13.8 Resultados Técnico/Económicos de Cumplimiento de Escenarios Regulatorios

En cumplimiento a los objetivos de este estudio, se han indicado las soluciones medio ambientales posibles de incorporar en la Fundición Altonorte, para que dicha instalación pueda enfrentar nuevos escenarios regulatorios en el mediano plazo, que le permitirían alcanzar su capacidad nominal de fusión de 1.160 kt/a y reducir emisiones de azufre y Arsénico, con niveles de captura y fijación de 95% y 96% en azufre y superiores en arsénico.

Lo anterior junto a las estimaciones de costos de inversión y operación incrementales permiten evaluar el valor presente (VAC) de dichas medidas, la determinación del Costo anual equivalente (CAE) como una medida comparativa, la razón costo efectividad, determinando el costo unitario por tonelada de SO<sub>2</sub> abatida (CUE).

#### 13.8.1 Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenarios

Se ha incluido, como base fija el diferencial de emisiones entre el valor declarado y el modelado equivalente a 1,3% de fijación de S, considerado como fuente no identificada. Sobre esto la reducción proyectada de emisiones de SO<sub>2</sub> y As por escenario y la inclusión de límites se muestra en figuras 13.8.1 a y b. Incluye una sección otros en color rojo, la cual contiene emisiones provenientes de otras fuentes y ajustes para llegar al valor medio entre lo declarado y modelado por el consultor.

Figura 13.8.1.a Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub> por escenarios

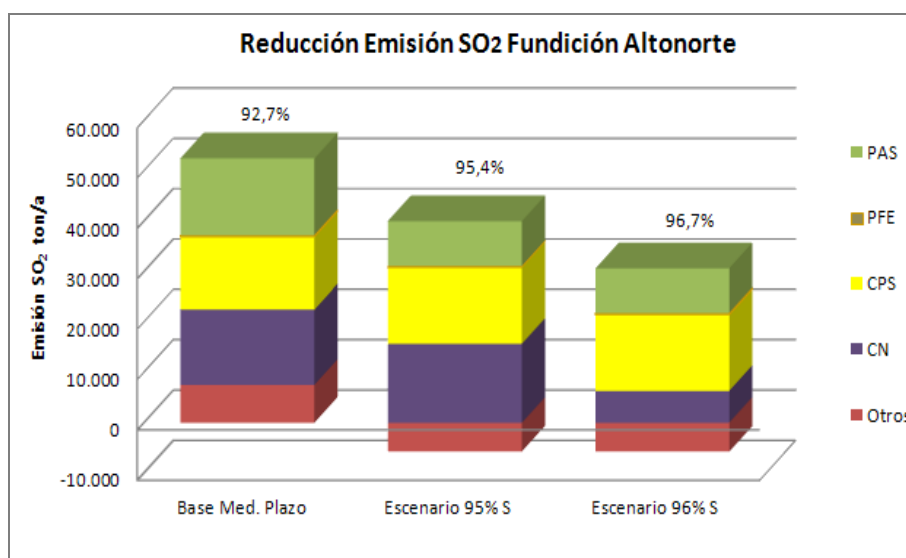
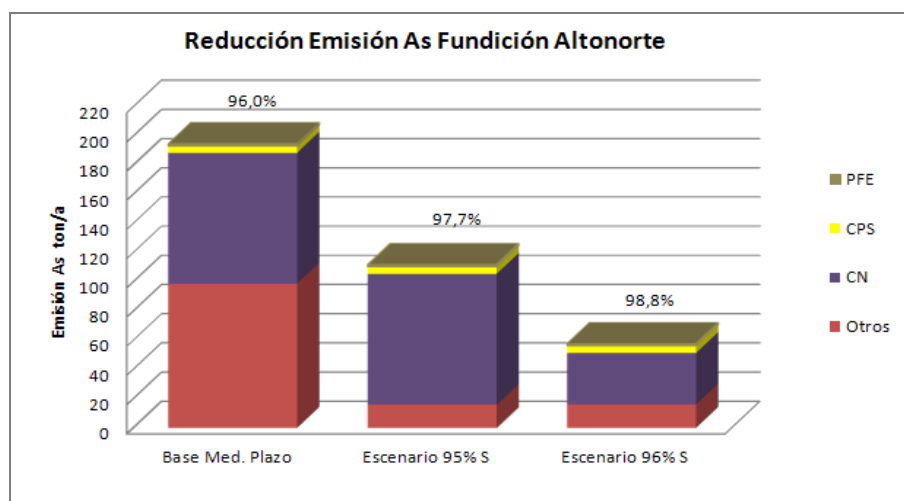


Figura 13.8.1.b Reducción de Emisiones de As por escenarios

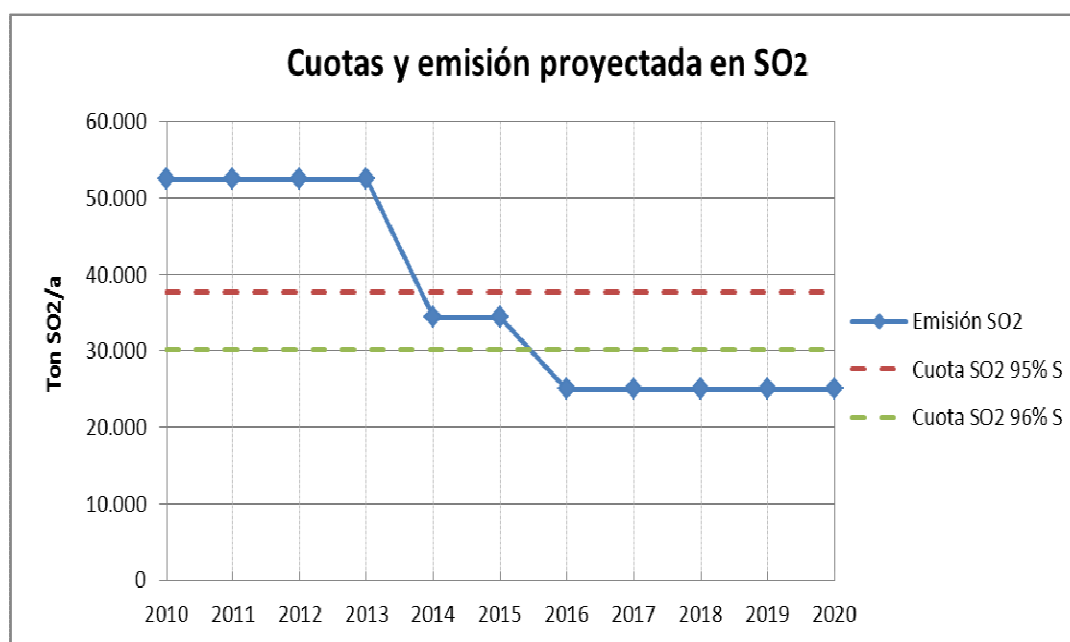


Fuente Gráficos 13.8.1 a y b: Elaboración Propia.

### 13.8.2 Cumplimiento de cuotas con la proyección de emisiones proyectadas S y As

La figura siguiente muestra que a partir del año 2016 es factible el cumplimiento de cuotas de emisión de SO<sub>2</sub> proyectado por la autoridad para la Fundición para Altonorte con un nivel de fusión de 1.160 kta y con holgura para el As. Sin embargo la instalación tiene un compromiso específico con la Autoridad Regional de no sobrepasar 25.000 t/a de emisión de SO<sub>2</sub> a partir del 2015.

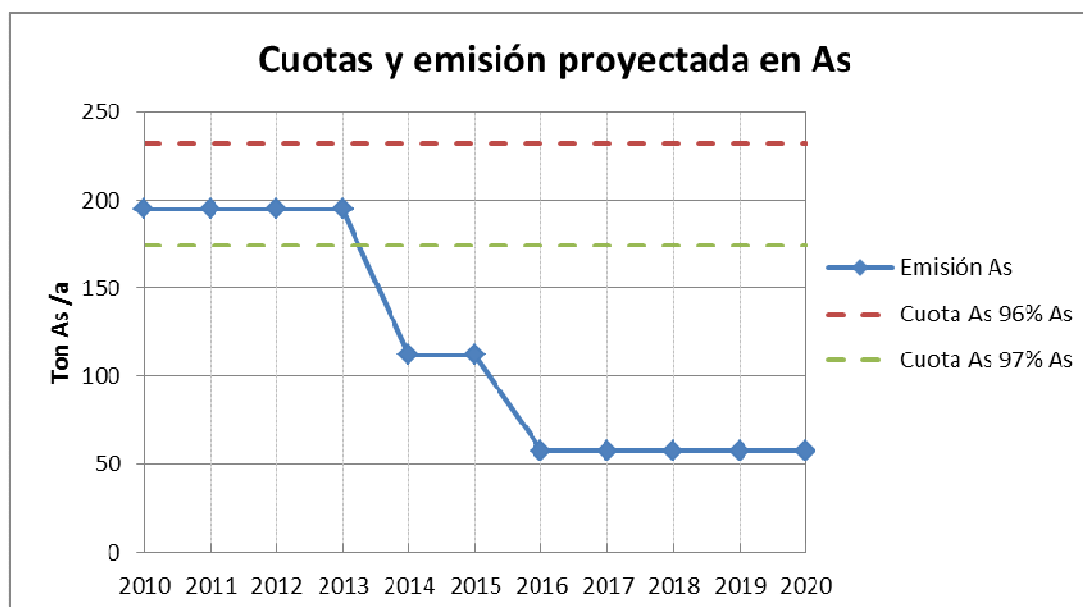
Figura 13.8.2.a Cumplimiento de cuotas proyectadas de SO<sub>2</sub> fundición Altonorte.



Fuente: Elaboración Propia

En relación al cumplimiento de emisiones inferiores a las cuotas de As establecidos por escenario, estas presentan niveles de holguras, al haber sido establecidas sobre un límite superior (0,5% en concentrado) al medio proyectado de 0,4%.As.

Figura 13.8.2.b Cumplimiento de cuotas proyectadas de As fundición Altonorte.



Fuente: Elaboración Propia

### 13.8.3 Determinación del VAC y CAE

La determinación en un periodo de 25 años del Valor actualizado de costos para la Fundición Altonorte, considerando para actualización una tasa social de descuento de 6% indica que lograr un cumplimiento de 95% y 96% de abatimiento de S, implica un VAC de 143 y 263 MUS\$ respectivamente.

Gráfico 13.8.3.a Valor actualizado de Costos soluciones medio-ambientales  
Altonorte

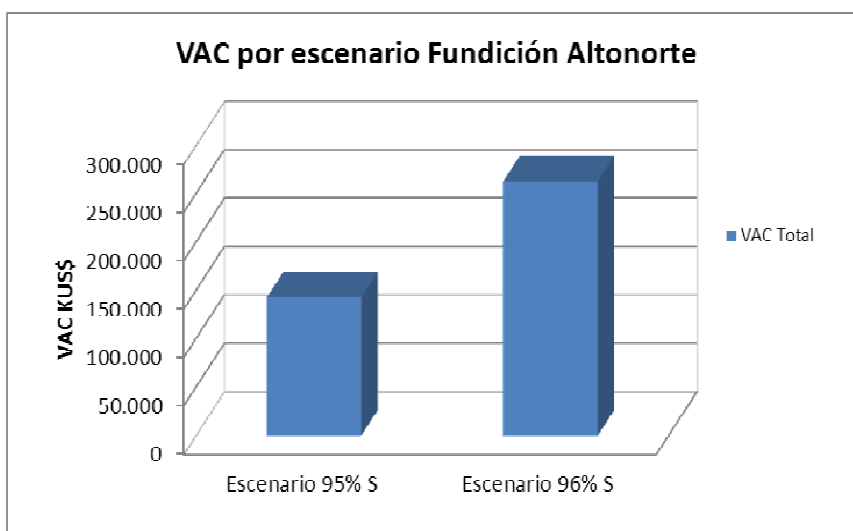
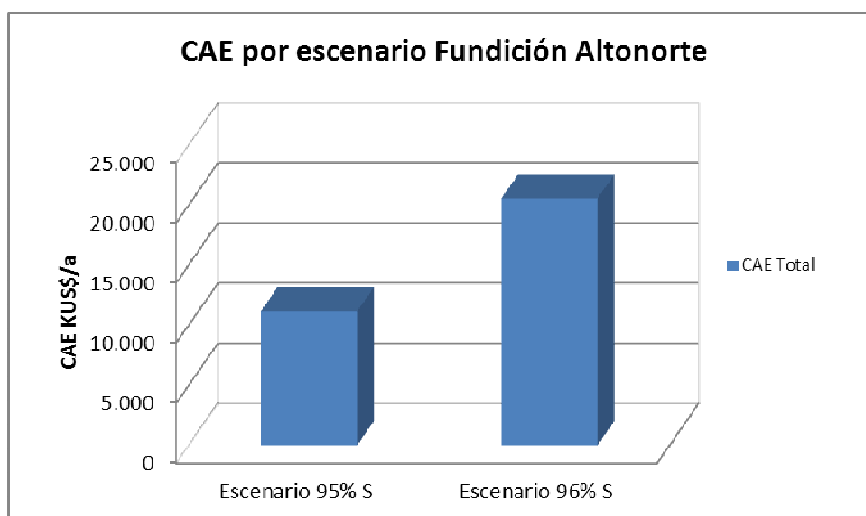


Gráfico 13.8.3.b Costo Anual equivalente Soluciones medio-ambientales Altonorte



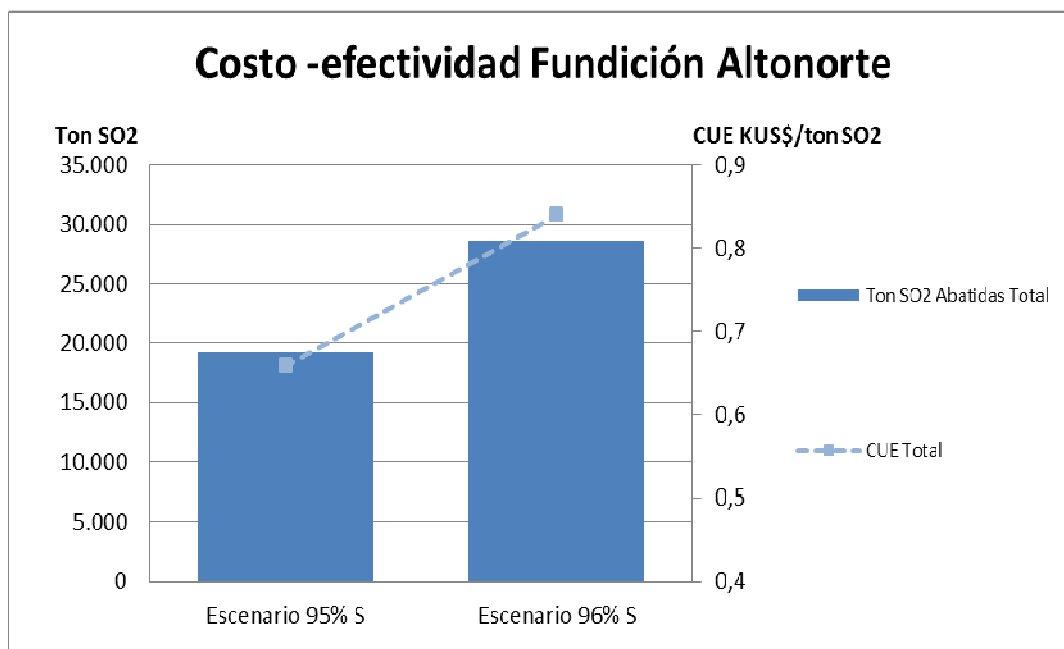
Fuente Gráficos 13.8.3 a y b: Elaboración Propia

El detalle de cálculo de estos costos ha sido realizado considerando similares criterios que para el resto de las fundiciones. El costo anual equivalente, casi se duplica al pasar del escenario de 95% a 96% (11.1169 kUS\$/a a 20.557 kUS\$/a).

#### 13.8.4 Relación Costo – Efectividad. En el control de Emisiones de S

Con los antecedentes mostrados el cálculo de costo efectividad para el cumplimiento de escenarios de captura de azufre lleva a un costo unitario de 700 US\$/t abatida de SO<sub>2</sub>, para el escenario de 95% y 800 US\$/t abatida de SO<sub>2</sub>, para el escenario de 96%, inferiores al del resto de las fundiciones, por el mejor nivel de captura inicial, e incorporar inversiones ya existentes en captura de gases fugitivos.

Gráfico 13.8.4 Costo Unitario equivalente por tonelada SO<sub>2</sub> abatida Altonorte



Fuente: Elaboración Propia



En resumen los indicadores económicos atribuidos a los escenarios descritos de reducción de emisiones para una fijación de 95 y 96% se indican a continuación en tabla siguiente.

Tabla 13.8.4 Indicadores económicos por escenarios Fundición Altonorte.

ITEM	DESCRIPCIÓN	INDICADORES ECONÓMICOS A TASA 6%			
		INVA	VAC	CAE	CUE
	<b>COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$</b>	<b>KUS \$/a</b>	<b>KUS \$/Ton</b>
<b>1</b>	<b>Escenario Captura 95% S</b>				
1.1	Secador a vapor	83.773	95.837	7.497	
1.2	Planta de ácido a doble absorción	36.903	52.840	4.134	
	Producción de ácido	-	-5.899	-461	
	<b>Total Escenario Captura 95% S</b>	<b>120.676</b>	<b>142.778</b>	<b>11.169</b>	<b>0,7</b>
<b>2</b>	<b>Escenario Captura 96% S</b>				
2.1	Mejora Sistema manejo de gases fugitivos de boca y sangría MB CN	8.537	10.130	792	
2.2	Tratamiento gases fugitivos de boca y sangría MB CN 200 kNm3/h	28.452	109.884	8.596	
	<b>Total Escenario Captura 96% S</b>	<b>157.664</b>	<b>262.792</b>	<b>20.557</b>	<b>0,8</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 13.8.5 Proyección de futuro para la instalación

La situación de arquitectura tecnológica asociada a la mantención del proceso de conversión con giros CPS y emisiones secundarias, que en el proceso de fusión en el reactor, tiene como ventaja de alta capacidad y bajos costos de operación, recomiendan esfuerzos para el mejoramiento del proceso conversión, por lo que el Consultor propone analizar un cambio tecnológico estructural, para eliminar el proceso tradicional de conversión, generando el granallado del metal blanco y carguío como solido o incorporando nuevas tecnologías de conversión continua, integrados con otra instalación del área norte, (maquila de metal blanco).

El área preparación carga, debe controlar también la regularidad de la ley de azufre, informada como de alta variación, condición que favorece la estabilidad de los procesos.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. “ALSTOM Seawater FGD Technology”, The Carlos Díaz Symposium on pyrometallurgy, p 535, 2007.
2. “Antecedentes fundiciones de cobre Chile”, Antecedentes entregados por MMA, 2010-2012.
3. “Antecedentes y precisiones respecto a información de Chagres”, Antecedentes entregados por MMA, 2011.
4. Antecedentes proveedores Topsoe, Outotec, Petersen Cansolv, Antecedentes entregados por MMA, 2011-2012.
5. “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, 40. 2000.
6. “Cambio tecnológico para la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub>”, Anexo B inventario de emisiones de SO<sub>2</sub>, DIA Altonorte, p. 12, 13, 17. 2011.
7. Carmen Gloria Contreras y Priscilla Ulloa, “Minuta criterios y supuestos para elaborar la norma de emisión al aire para las fundiciones de cobre”, Asuntos atmosféricos Ministerio de Medio Ambiente.
8. Catalogo NICICO “National Iranian Copper Industries Co.”, Khatoonabad copper smelter, 2005.
9. Documento público Xstrata a comisión de evaluación Ambiental región de Antofagasta p. 3, 4, 5. 2011.

10. “Elemental mercury removal using a wet scrubber”, Argonne national laboratory, 1999.
11. “Encuesta a Fundiciones de cobre en Chile”, Antecedentes entregados por MMA, 2010.
12. “Escenarios de reducción de emisiones de fundiciones Codelco”, Cochilco, 2012.
13. Estudio de perfil “Aumento captación SO<sub>2</sub> Fundición HVL”, Informe Jacob, 2011.
14. “Evaluación de escenarios regulatorios para una norma de emisión de las fundiciones de cobre en Chile”, Informe de avance Smeltec, 2011.
15. Hylander L.D., Herbert R.D., “Global emission and production of mercury during the pyrometallurgical extraction of nonferrous sulphide ores”, Environmental Science and Technology 42, 2008.
16. Informe final “Antecedentes técnicos y económicos para elaborar una norma de emisión para fundiciones de cobre”, Departamento de Ingeniería de Minas Universidad de Chile, 2009.
17. “Informe Resumen Fundición Hernán Videla Lira”, Visita delegación Ministerio de Medio Ambiente, 2011.
18. “Ingeniería conceptual proyecto desarrollo de negocio Fundición y Manejo de gases fugitivos”, Hatch Ingeniería, 2007.
19. “International Peirce Smith Converting Centennial, Publication of TMS, p.158, 58. 2009.

- 
20. Knowledge for the sulphuric acid, Sulphuric Acid on the web [http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl\\_hq.htm](http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hq.htm)
  21. “Memoria de cálculo inventario de emisiones de SO<sub>2</sub>”, DIA Altonorte, p. 9 Rev. 26 Enero 2011.
  22. “Pilo-Scale Evaluation for Codelco Continuos Converting Process”, The Carlos Díaz Symposium on pyrometallurgy, p 49, 2007.
  23. “Presentación fundición Potrerillos: Proyecto integral de mejoramiento de captación y procesamiento de gases”, Información entregada por MMA Reunión con fundición Potrerillos 2011.
  24. “Prevención y Control Integrado de la Contaminación” (IPPC) documento BREF, Ministerio de Medio Ambiente - Comisión Europea, 2005.
  25. “Technical assessment of environmental performance and reduction options for the base metals smelter”, p. internet [www.ec.gc.ca](http://www.ec.gc.ca), Canada 2004.
  26. W.G. Davenport, A.K. Biswas, Extractive Metallurgy of copper, cuarta edición.

---

## ANEXO A: CRITERIOS INCLUIDOS EN LA EVALUACIÓN DE COSTOS DE ESCENARIOS REGULATORIOS

### Costo de inversión por Medida de Control

Las inversiones fueron establecidas por Medida de control de Emisiones para cada escenario, con un monto global en Dólares americanos (Diciembre 2011). La inversión fue definida en base a los antecedentes disponibles, experiencia del Consultor para el rango de precisión requerido para este estudio de costos de +/-30%, incluyendo Ingeniería, Adquisiciones/Fabricación, Construcción, así como Administración y Costos del Dueño.

Dado que la mayor parte de los estudios cuentan a la fecha con un análisis de pre-factibilidad, adicionalmente a la inversión se consideraron recursos pre-inversionales para las Ingenierías previas, como un 7% de la inversión.

Para aquellas fundiciones cercanas a centros poblados que deberían cumplir límites de chimenea, se ha incluido una inversión de infraestructura para monitoreo de control, estimada en un 1% de las inversiones para límites de chimenea.

Las inversiones de modificaciones en plantas de ácido, equipos o plantas de tratamiento, se realizaron en base al dimensionamiento de gases a tratar, considerando volúmenes estándares tipo ( $\text{kNm}^3/\text{h}$ ) dependientes del tipo de reactor o fuente y escalamiento, con la razón a la potencia 0,6 sobre datos base conocidos<sup>42</sup> para una planta de 50.000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  que genera 500 t/d de ácido.

Para el cálculo de los índices económicos, se incorporaron las inversiones de reposición de equipos de control, al término de su vida útil esperada, proyectada en bases estándares.

Se realizó la actualización de moneda a Diciembre 2011, en base Euro e IPM (USA) referentes.

---

<sup>42</sup> Production of Sulphuric Acid 2000: European Sulphuric Acid Association, European Fertilizer Manufactures Asociation.

---

### Costo incremental de operación

Los costos de operación anuales para todas las instalaciones, fueron determinados por proyecto, considerando la variación incremental o decreciente por las siguientes naturalezas de gastos gravitantes:

- **Energía eléctrica:** Derivada del mayor requerimiento de equipos para manejo y tratamiento de gases, estimado en base a estándares función de variación de presión de sopladores o ventiladores para 100.000 Nm<sup>3</sup>/h: Bajo 3.300 MWH/a, Medio 5.500 MWH/a, Alto o de PAS 33.000 MWH/a, todos valorizados a una tarifa fija de 84,5 US\$/MWH.
- **Insumos, servicios y otros gastos:** Consideran entre otros; nuevos reactivos como lechada de cal o hidróxido de sodio para el lavado de gases, servicios externos de mediciones en chimeneas, petróleo para quemadores de poscombustión, agua adicional, etc. Sólido a disponer calculado en base a tratamiento con cal, 85% de eficiencia y estequiometría
- **Gastos de Mantenimiento:** Para las nuevas instalaciones en base a datos referentes o criterio de 6% sobre la inversión. En el caso de Recuperación de Manejo de Gases (Potrerillos), la reducción fue evaluada como un porcentaje de los gastos disponibles de los dos últimos años.
- **Gastos de disposición de residuos sólidos:** Yeso impuro dispuesto, transporte y disposición como material peligroso a una tarifa entre 150 a 300 US\$/t, según condiciones de contratos locales, detalle en tabla.

Para el caso de proyectos que generen una producción incremental de ácido, se considera este beneficio como un crédito al costo. Para tal efecto aquellas fundiciones que incrementaron su producción de ácido, se les consideró un ingreso marginal neto por venta de ácido adicional, según la siguiente tabla:

Tabla A1 Costo transporte y Disposición e Ingreso neto por venta de ácido Sulfúrico

Fundición	Costo Transporte y Disposición US\$/t	Ingreso Neto Acido US\$/t ácido
Hernán Videla Lira	270	45
Chuquicamata	150	60
Caletones	300	20
Ventanas	300	40
Potrerrillos	295	25
Altonorte	270	60

Fuente: Elaboración propia.

En este análisis, no se consideraron costos asociados a días extra de paro por fundición, para la implementación de las medidas de control, por representar un diferencial de costo variable, local y en la actualidad de bajo impacto económico, en un escenario de bajos Cargos de Tratamiento (TC), cercano a los 60 US\$/t, sin embargo, el consultor entrega un referente para Potrerillos de 60.000 US\$/d, como costo diario de detención de la fundición.



---

### Índices económicos

Los criterios usados para el cálculo de los índices económicos VAC-CAE y el costo-efectividad (CUE) en todas las instalaciones se indican a continuación:

- **VAC:** Valor actualizado de Costo de Inversión y costo incremental de operación anual de las medidas de control. Valorizado al año 2011, a una tasa social de descuento de 6% y en un horizonte de 25 años (hasta año 2035). Ítem valorizado con formula Excel VNA, equivalente a la sumatoria de los flujos de gastos de inversión, gastos de reposición de equipos y de operación anuales, actualizada al año cero a una tasa dada, durante el período asignado de evaluación (25 años en este caso).
- **CAE:** Costo anual equivalente del VAC que representa los gastos de inversión y operación anuales como cuotas iguales durante 25 años, Se calculó en base a la formula PAGO de Excel.
- **CUE:** Costo unitario por tonelada SO<sub>2</sub> abatida, o razón costo-efectividad, calculada en base al CAE y el tonelaje medio anual abatido.

### Eficiencias de equipos de Control

En base datos de proveedores y expertizaje del Consultor, se consideraron las siguientes eficiencias, como soluciones de reemplazo de equipos o nuevas instalaciones tales como campanas secundarias, de sangría o primarias de alto rendimiento, y tratamiento alcalino.

Tabla A2 Eficiencias de captura campanas y tratamiento de gases

Eficiencia captura %	Base	Nuevo Diseño
<b>CT/CN</b>		
Camp. Primaria	97	98,5
Camp. Secundaria sopl		98,5
Camp. Secundaria giro		25
Camp. Sangría		70
<b>CPS</b>		
Camp. Primaria	95	98
Camp. Secundaria sopl		80
Camp. Secundaria giro		20
<b>HE</b>		
Camp. Sangría		70
Eficiencia Tratamiento % Lavador scrubber alcalino	85	

Nota: Considera eficiencias medias durante campaña del equipo base.

Fuente: Elaboración propia.

---

## ANEXO B: GLOSARIO

**As:** Arsénico.

**Abatimiento:** Fijación de un componente de los gases en un sólido o líquido.

**Base mediano plazo:** Corresponde a la situación base de las fundiciones, asumiendo que estas operan a su capacidad máxima o nominal, con una ley de S y As promedio por ellas proyectada para el mediano plazo (2011-2016), informada al MMA para efectos de fijación de la normativa. Permitió establecer la situación original de emisiones y fijación calculada, como promedio entre lo declarado y modelado por el Consultor.

La situación base en el mediano plazo también considera cualquier cambio estructural a implementarse en el corto plazo, como es el caso de la Fundición Chuquicamata.

**CAE:** Costo anual equivalente.

**Captura:** Capacidad de apresar un elemento o compuesto en un determinado flujo de gas indicado asumido como gas ideal (Gas Normal), expresado normalmente en porcentaje másico.

**Captura y tratamiento:** Capacidad de atrapar o retener un contaminante de interés (As, S, MP u otro) o un determinado flujo de gas, en una corriente de interés, se expresa en porcentaje. Posteriormente el flujo de gas sucio, puede ser sometido a procesos de limpieza, reacción o absorción, a través de la incorporación de un equipo de control.

**Carga fría:** Material frío de recirculación, requerido por el proceso de conversión para controlar temperatura del baño. Incluye cáscaras de las ollas de trasvasije, salpicaduras de metal fundido del horno, derrames de productos fundidos y otros.

**Campaña:** Período de operación de un reactor, equipo o planta comprendido entre una reparación general y la siguiente, usualmente con detención prolongada.

**CN/RN:** Convertidor Noranda/Reactor Noranda.

**CO:** Monóxido de carbono.

**Cobre primario:** Se refiere al cobre proveniente de concentrados de minas.

**Cobre secundario:** Se refiere al cobre reciclado de chatarra de productos en desuso.

**CPS:** Convertidor Peirce Smith. Horno cilíndrico horizontal inventado a fines del s. XIX, en el cual se realiza la conversión de una mata o eje de cobre (o Metal Blanco), de ley entre 40 y 75%Cu. Se obtiene de la conversión, cobre blíster con una ley de 98% Cu o superior. Insufla aire a presión por toberas bajo el baño metálico y tiene una boca para recibir la carga y evacuar los gases. Este horno recibe la carga y vacía sus productos (escoria y cobre blíster), mediante el giro del horno, utilizando para transferir dichos productos, ollas movidas por grúas puente.

**CT:** Convertidor Teniente. Es un horno cilíndrico horizontal similar al CPS pero más “alargado”, que mejora el aprovechamiento de excedentes de calor de las reacciones de conversión, a través de la fusión de concentrados frescos en el baño fundido. Este horno usa el mismo concepto metalúrgico y de diseño de los CPS, realizando junto a la fusión, la primera etapa de soplado de la conversión (eliminación del FeS de la mata por oxidación con el oxígeno del aire, generación de escoria que eliminan el Fe y gases que llevan el azufre como SO<sub>2</sub>). En forma diferente a los CPS, la boca de gases del CT se ubica en un extremo alejado de las toberas, evitando problemas de salpicaduras. Posee orificios para sacar los líquidos producidos (a diferencia del Peirce Smith que debe girar y dejar de soplar) y agrega el concentrado a fundir sin dejar de soplar a través de la misma línea de

toberas, por toberas especiales que lo inyectan en el seno del baño metálico. Los porcentajes de tiempo de soplado o sobre campana varían entre 90 a 95%.

**CUE:** Costo unitario equivalente, utilizado para obtener la razón costo-efectividad.

**Equipo/Medidas de control:** Equipo que tiene por función abatir uno o más contaminantes, extrayéndolos del medio en el que viene. Equipos de control típicos son los precipitadores electrostáticos, las plantas de procesamiento de gases como las plantas de ácido, los lavadores de gases, etc.).

**Fijación:** Capacidad de capturar y abatir un contaminante de interés (As, S, MP u otro) en un determinado flujo de gas, mediante un equipo de control. Se expresa en porcentaje.

**FSF u HF:** Flash Smelter Furnace u Horno Flash.

**Gases de cola:** Gases evacuados por la chimenea de la planta de ácido sulfúrico, provenientes desde la torre de absorción de la esta planta.

**Gases diluidos:** Se dice que un gas es diluido cuando un elemento o compuesto posee concentraciones inferiores al 1%, por lo que por  $\text{SO}_2$  no son suficientes para tratamiento en planta de ácido con concentración habitual ente 4% - 12%  $\text{SO}_2$ .

**Gases fugitivos:** Son aquellos gases de CT/CN/CPS que no son captados por la campana primaria, incluyendo aquellos gases emitidos por giros (carguío y vaciado en tazas u ollas). También se les llama gases fugitivos a los gases provenientes de las sangrías de CT/CN/HE y a todos los gases del transporte de materiales en caliente (fuente móvil).

**Gases primarios:** Son los gases metalúrgicos generados en los reactores de alta concentración en  $\text{SO}_2$ . Los reactores lo descargan por un Up-Take (horno flash) y por boca en el caso de los hornos cilíndricos (CT y CPS), sobre la cual son capturados por una campana primaria, para ser limpiados y conducidos hacia la fabricación de ácido, a planta de ácido.

**Gases residuales:** Son aquellos gases que no se abatieron en un tratamiento.

**Gases secundarios:** Son los gases metalúrgicos que no corresponden al sistema primario, por ejemplo gases de Horno Eléctrico, Hornos de tratamiento de Escoria y Hornos Anódicos. A veces se usa como acepción abreviada de los gases capturados por campanas secundarias (ex Fugitivos).

**HE:** Horno eléctrico.

**Hg:** Mercurio.

**HLE:** Horno de limpieza de escorias.

**$\text{H}_2\text{SO}_4$ :** Ácido sulfúrico.

**MAGA:** Sistema Manejo de gases.

**MALIGA:** Sistema Manejo y limpieza de gases.

**MB:** Metal blanco o sulfuro de cobre. Posee una ley de Cobre entre 70 - 75%.

**MP:** Material particulado. Material de bajo tamaño (nivel de micrones,  $\mu\text{m}$ ), el que se genera en las distintas etapas productivas, ya sea por arrastre por los gases o por

condensación de componentes al enfriarse los gases, como es usual en el caso de As. Su tamaño contamina el ambiente al demorar considerablemente el tiempo de su decantación. Desde el punto de vista medioambiental se distingue el “PM10”, que son todas las partículas bajo 10  $\mu$  y el PM5 y el “PM2,5” que corresponde a todas las partículas de tamaño 2,5  $\mu$  o inferior. De acuerdo a su tamaño constituyen partículas respirables que afectan la salud de las personas.

**PAS:** Planta de ácido sulfúrico.

**PE/PPEE:** Precipitador electrostático. Equipo que se utiliza para extraer el polvo arrastrado de un flujo gaseoso. Se expone a las partículas a un campo magnético, aprovechando las propiedades de éstas de cargarse eléctricamente, separándose por atracción electromagnética.

**PFE:** Planta de flotación de escorias.

**PLG:** Planta de limpieza de gases, que integra la Planta de Limpieza con la Planta de Acido Sulfúrico.

**RAM:** Recepción, Almacenamiento y Mezcla de materias primas e insumos minerales (concentrados, fundentes y productos sólidos intermedios de reciclaje tales como polvos de fundición y carga fría, principalmente).

**S:** Azufre.

**Scrubber:** Equipo de lavado de gases, mediante la aplicación de una lluvia finamente diseminada aplicada en contra corriente de los gases. El compuesto formado depende del contaminante que se desea fijar y de la composición de la solución utilizada. Por ejemplo,

para fijar SO<sub>2</sub>, se utiliza una lechada de cal produciendo yeso, en el cual se fija el azufre en forma de CaSO<sub>4</sub> \* 2 H<sub>2</sub>O.

**Situación existente:** Se refiere a la situación declarada por las fundiciones en el 2010.

**SO<sub>2</sub>:** Anhídrido sulfuroso (Dióxido de azufre).

**TC/RC:** Cargos de Tratamiento – Cargos de Refinación (Treatment Charge – Refining Charge). Es el precio que se cobra por el servicio de procesamiento de concentrados de cobre, llevados a cobre blíster (TC) y el precio del servicio de procesamiento de cobre blíster a cátodo de cobre (RC).

**Tratamiento:** Incorporación de un equipo de control de las emisiones de algún contaminante, tal que su abatimiento logre una reducción de su cantidad respecto al flujo ingresado al equipo de control.

**VAC:** Valor actual.

**Venturi scrubber:** Equipo lavador de gases contra corriente en el que se pone en contacto al gas, con una solución a través de una garganta que se estrecha, aumentando la velocidad del gas, lo que facilita la atomización del líquido, el lavado del gas y la deposición del sólido arrastrado por el gas en el fondo del equipo.



## Unidades frecuentes

Medida Atribuida	Unidad	Símbolo
Largo	metro	m
Largo	milímetro	mm
Masa	gramo	g
Masa	kilogramo	kg
Masa	tonelada	t
Tiempo	segundo	s
Tiempo	minuto	min
Tiempo	hora	h
Tiempo	día	d
Tiempo	año (calendario)	a
Temperatura	grados Celsius	°C
Volumen (liquido)	metro cubico	m <sup>3</sup>
Flujo (liquido)	metro cubico por hora	m <sup>3</sup> /h
Flujo (gas)	normal metro cubico por hora	Nm <sup>3</sup> /h
Presión	kilopascal (manométrica)	kPa(g)
Energía	kilojoule / megajoule	kJ / MJ
Potencia	kilowatt / megawatt	kW / MW
Valor Monetario	dólar	US\$
Valor Monetario	kilo dólar	KUS\$