

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL EN METALURGIA EXTRACTIVA

**“PRE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA  
PARA EL ABATIMIENTO DE GASES  
FUGITIVOS EN UNA FUNDICIÓN DE COBRE”**

**Víctor Hugo Osega Parra**

Profesores Guías:  
José Torres Titus  
Luis Vega Alarcón

**2012**

## ***Agradecimientos.***

Principalmente mis logros obtenidos se los debo a mis padres. Gracias a ellos y su constante apoyo estoy hoy en día cumpliendo una nueva meta.

Madre, muchas gracias por todo lo que me diste y como siempre te lo he dicho, por preferirnos a tus hijos antes del trabajo. Yo creo que sin tu constante consejo y paciencia no sería la clase de persona que soy hoy en día.

Padre, realmente muchas gracias por el sacrificio enorme que hiciste por cada uno de nosotros. Al fin, tu último hijo cumplió que de seguro era tu sueño. Me da un poco de pena, saber que no estarás físicamente conmigo en el momento de Titularme, pero sé que me estarás mirando desde el cielo. Quizás nos faltó tiempo para estar más juntos, pero como aprendí con el tiempo, tu ciclo ya se había completado. Solo espero, aplicar tus enseñanzas y ser un buen Padre cuando sea mi momento.

Hermanas, muchas gracias por apoyarme a su manera. Una más tierna que la otra, pero sé que cada una lo hizo para mi propio bien y espero que en el futuro me sigan aconsejando.

Y por último, pero no menos importante te quiero agradecer a ti mi amor, ya que por cosas de la vida apareciste en un momento crítico de ésta, en donde me devolviste la alegría y las ganas de disfrutar la vida. Junto a ti volví a renacer y desde ese momento te convertiste en mi amiga, confidente, mi principal apoyo, estando conmigo en todos los momentos y sufriendo por igual. Espero que el tiempo nos permita seguir construyendo nuestra hermosa relación.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## **Resumen**

En la memoria a desarrollar, aborda un tema cuya problemática hasta el momento no se ha visto del todo solucionada, afectando directa o indirectamente a todo el ambiente que lo rodea. Estamos hablando de los Gases Fugitivos provenientes de una Fundición de Cobre.

La Memoria describe brevemente los orígenes de los minerales de cobre, sus métodos de extracción, equipos involucrados en su concentración y los gases producidos por el proceso, los cuales en contacto con el medio ambiente y a través de los vientos son dispersados en la región.

Posteriormente se realiza un análisis a cada equipo involucrado en el proceso de fundición, para así poder estimar los gases fugitivos de cada uno de ellos. Junto con plantear un sistema de tratamiento de gases desde el proceso de su captura y limpieza hasta llegar a una tecnología limpiadora. A través de un criterio de selección, aplicando a distintas tecnologías competitivas entre ellas, se logra elegir la mejor para nuestro país, logrando a través de un programa computacional y diseño de planta obtener resultados concretos en los cuales queda demostrada una solución viable, reduciendo de manera importante los gases fugitivos. El trabajo termina con un análisis económico sobre el costo de la planta y sus respectivas conclusiones, creando una conciencia ecológica a toda la gente que está involucrada en el ámbito de la minería, demostrando que existen alternativas para operar las plantas sin generar problemas en el entorno.

Como resultados se obtuvieron una capacidad de planta para abatir el 95% de  $SO_2$  liberado y un costo de planta cercano a los US\$3.100.000.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>3</b>
2.1	Origen del Cobre.....	3
2.2	Proceso Minero. ....	4
•	Extracción de cobre a partir de menas sulfuradas. ....	6
•	Extracción de cobre a partir de las menas de óxido: hidrometalurgia .....	9
2.3	Descripción general del Proceso Fundición. ....	10
2.4	Equipos. ....	12
•	Secador Rotatorio. ....	12
•	Convertidor Teniente. ....	13
•	Horno Flash. ....	14
•	Horno Eléctrico. ....	16
•	Convertidor Pierce-Smith (CPS).....	17
•	Refinación a Fuego. ....	20
2.5	Diagrama Patio de Fundición. ....	21
2.6	Sistema de Manejo de Gases. ....	22
2.7	Dispersión del SO <sub>2</sub> .....	24
2.8	Efectos Nocivos del SO <sub>2</sub> . ....	31
2.9	Norma de emisión de SO <sub>2</sub> . ....	32
2.10	Cambio Futuro en la norma.....	34
<b>III.</b>	<b>ANÁLISIS POR EQUIPO.....</b>	<b>35</b>
3.1	Secador Rotatorio .....	35
3.2	Convertidor Teniente .....	36
3.3	Horno Eléctrico .....	37
3.4	Convertidor Pierce Smith (C. P. S) .....	39
•	Reacciones químicas involucradas en el proceso. ....	39
<b>IV.</b>	<b>SISTEMA TRATAMIENTO DE GASES.....</b>	<b>40</b>
4.1	Proceso de Captura.....	40
4.2	Limpieza. ....	41
4.3	Posibles Soluciones.....	42
•	Desulfuración semi-seca .....	42
•	Desulfuración por agua de mar .....	44
•	Desulfuración húmeda piedra caliza / yeso .....	46
•	Proceso con Carbón Activado .....	47
•	Proceso de Citrato de Sodio. ....	50
•	Proceso Dimetilnilina (DMA) Xilidina. ....	53
•	Tecnología de irradiación con haces de electrones (ebds). ....	54
•	Proceso por Zeolitas. ....	57
•	Tabla comparativa. ....	58
<b>V.</b>	<b>CRITERIO SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA. ....</b>	<b>59</b>
5.1	Tabla de Selección.....	68
•	Tecnologías Seleccionadas. ....	73

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

•	<i>Comparación de Alternativas:</i> .....	78
<b>VI.</b>	<b>PROGRAMACIÓN</b> .....	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Excel</b> .....	<b>79</b>
•	<i>Definición</i> .....	79
•	<i>Trabajo realizado</i> .....	79
•	<i>Visual Basic</i> .....	89
<b>VII.</b>	<b>DISEÑO DE PLANTA</b> .....	<b>94</b>
<b>7.1</b>	<b>Descripción Diseño</b> .....	<b>95</b>
<b>7.2</b>	<b>Tamaños Propuestos</b> .....	<b>100</b>
<b>VIII.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>130</b>
<b>IX.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....	<b>133</b>
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>135</b>
<b>XI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>136</b>
<b>XII.</b>	<b>ANEXO DE CÁLCULOS</b> .....	<b>141</b>
•	<i>Obtención de las Reacciones químicas involucradas</i> .....	141
•	<i>Obtención de datos de Propiedades químicas de los diferentes compuestos</i> .....	142
•	<i>Cálculo de constantes de equilibrio inicial de cada reacción química propuesta y llevarla a la temperatura a la cual estaría trabajando el Horno Eléctrico</i> .....	142
•	<i>Identificación de reacciones dependientes</i> .....	153
•	<i>Formación del equilibrio químico</i> .....	157
•	<i>Tabla de entrada de moles de alimentación al Horno eléctrico</i> .....	159
•	<i>Planteo del sistema de ecuaciones</i> .....	160
•	<i>Programación en Excel</i> .....	165
•	<i>Calculo de constantes de equilibrio inicial de cada reacción química propuesta y llevarla a la temperatura a la cual estaría trabajando el Convertidor Pierce Smith</i> .....	166
•	<i>Formación de Equilibrio Químico</i> .....	172
•	<i>Tabla de Entrada de moles de alimentación al Convertidor Pierce Smith</i> .....	173
•	<i>Planteo del sistema de ecuaciones</i> .....	174
<b>XIII.</b>	<b>ANEXO DE CÓDIGOS VISUAL BASIC</b> .....	<b>180</b>
<b>13.1</b>	<b>Código que permite constantes de Equilibrio a una temperatura dada</b> .....	<b>180</b>
•	<i>Horno Eléctrico</i> .....	180
•	<i>C.P.S.</i> .....	182
<b>13.2</b>	<b>Código Cálculo de Extensiones</b> .....	<b>185</b>
•	<i>Horno Eléctrico</i> .....	185
•	<i>C.P.S.</i> .....	189
<b>XIV.</b>	<b>ANEXO CÁLCULO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR</b> .....	<b>193</b>
<b>14.1</b>	<b>Intercambiador 2</b> .....	<b>193</b>
<b>14.2</b>	<b>Intercambiador 3</b> .....	<b>197</b>
<b>14.3</b>	<b>Intercambiador 4</b> .....	<b>202</b>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

# I. INTRODUCCIÓN

En este momento, Chile es uno de los principales productores en el mundo de cobre. Se está consiente de los numerosos estudios y proyectos que han realizado las empresas privadas, ENAMI y Codelco-Chile en sus instalaciones, especialmente sus fundiciones, para mitigar los Gases que emiten en sus procesos y que afectan al medio ambiente y poblaciones cercanas a éstas.

Desde hace mucho tiempo, las fundiciones se ubicaron en lugares estratégicos, con el propósito de disponer oficinas para la compra de minerales en la pequeña y mediana minería. De esta recuperar el cobre, teniendo en cuenta un lugar donde adquirir agua para el proceso, terrenos despejados de civilización algunas veces y con caminos claros donde el transporte se hiciera de forma fácil y rápida. Sin embargo, nunca estuvo en la conciencia de considerar el impacto con el medio ambiente en el lugar donde se estaban alojando, como también no se pensó en el desarrollo poblacional del país. La ley que regula el impacto ambiental, es creada recién en el año 1991.

Es por estos motivos, las fundiciones operaron durante muchos años con tecnologías obsoletas pero más económicas. Al amparo de este contexto, sus operaciones afectaron el medio ambiente, debido a la contaminación en las 24 horas de producción. Paulatinamente las empresas fueron adquiriendo conciencia verde y mejorando el proceso, de acuerdo a los estudios que la ley del medio ambiente exigió que las empresas realizaran para resolver sus problemas, por la obsolescencia de sus procesos.

Desde hace décadas de la vigencia de Control Ambiental, rigen tecnologías que contaminan mucho menos, motivadas principalmente por sanciones. El problema se ha reducido en un 80% mejorando el entorno que lo rodea, e introduciendo especies que habían emigrado de aquellas zonas donde la vida prácticamente se vio cruelmente amenazada.

Las nuevas generaciones de ingenieros, les han correspondido incorporar las nuevas tecnologías con apoyo a las innovaciones en automatización y equipos computacionales, lo cual les permiten tener una visión que todas las mejoras que se han incorporado y que se

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

incorporen tienen como objetivo que todos puedan respirar un aire limpio sin daños para la salud de las poblaciones cercanas.

En la Memoria se ha trabajado para estudiar, desarrollar y dar a conocer en este ámbito ideas concretas, en donde se observan y están demostrados en valores muy inferiores a los normales, los niveles de dióxido de azufre, principal causante de las llamadas lluvias ácidas, las cuales especialmente influyen en el bajo rendimiento de los cultivos y las tierras se vuelven infértiles por el cambio de pH en ellas.

Para mostrar dicha idea, se tuvo que realizar un trabajo investigativo, no del punto de vista de laboratorio si no del punto de vista de información ya sea entregada a través de libros, revistas y artículo publicados tanto en la red mundial como en libros físicos.

Se pretende mostrar los resultados de las investigaciones realizadas, para que futuras memorias se puedan seguir desarrollando las ideas que se analizan en este documento, para comprender con mayor profundidad, en los tiempo actuales que estamos viviendo la solución mas concreta de todas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## II. ANTECEDENTES GENERALES

### 2.1 Origen del Cobre.

En la naturaleza existen distintos tipos de yacimientos de cobre, los que se presentan de diversas maneras, dependiendo de los procesos geológicos que dieron origen a su concentración.

Un tipo de yacimiento es aquel que se origina vía disolución del cobre desde los magmas (o rocas fundidas) por aguas termales, las que son conducidas hacia la superficie de la tierra a través de fracturas en las rocas. El cobre aparece entonces como vetas de mineral de alta ley o incluso de cobre nativo, una peculiaridad que permitió su descubrimiento por parte de sociedades primitivas cuando apenas se iniciaban en el conocimiento de los metales. Estos yacimientos son conocidos como 'vetiformes'.

Pero estos depósitos de cobre en estado natural o de muy alta pureza abastecieron a la humanidad durante largo tiempo, y después de miles de años se agotaron.

Otra forma de concentración de cobre, también a partir de magmas, viene de las fuentes termales submarinas, que son verdaderos géiseres ricos en metales. Al salir y mezclarse con el agua fría del mar, los metales precipitan en forma de sulfuros que quedan agrupados en el sedimento del fondo marino. Millones de años más tarde, producto del levantamiento de la corteza terrestre, estos sedimentos emergen a la superficie en forma de yacimientos.

También existen los yacimientos denominados porfíricos, que sólo pudieron ser explotados cuando se desarrollaron las habilidades metalúrgicas necesarias para separar y recuperar el metal, muy abundantes en el cordón andino. Se caracterizan por contener grandes masas de rocas con cobre sulfurado que generalmente es de baja ley. Estos se originan por el ascenso de rocas fundidas cuando la corteza oceánica se introduce bajo la

---

"Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre."



corteza continental. Ejemplos de ello en Chile son Chuquicamata, El Salvador, Andina y El Teniente.

El porcentaje de cobre presente en estos minerales es conocido por los especialistas como 'ley de cobre', y su valor es variable. En algunos yacimientos esa ley es de 1 a 1,8 por ciento, y con frecuencia resulta menor, así que la mayor parte del material explotado en las minas es desechado

Hay, además, otros yacimientos donde el cobre se encuentra en la parte superior que ha sido alterada por la acción de agentes atmosféricos a través de millones de años. Son los llamados yacimientos de cobre oxidado, también muy frecuentes en Chile, como la mina Radomiro Tomic, El Abra y la parte superior, ya explotada, de Chuquicamata.

## **2.2 Proceso Minero.**

Los distintos tipos de yacimientos de cobre pueden ser explotados a través de 2 formas, cada una con sus propios procesos pero con el mismo objetivo: extraer la porción mineralizada de cobre y otros elementos de la parte maciza y rocosa de la mina, para luego enviarlos de forma segura y eficiente a planta, donde es sometida al proceso de obtención del cobre propiamente tal. Estas dos formas son la extracción a rajo abierto y la extracción subterránea.

*La extracción a rajo abierto* es utilizada cuando los yacimientos presentan cierta forma rectangular y están ubicados en o cerca de la superficie, de manera que el material estéril que lo cubre pueda ser retirado a un costo tal que pueda ser absorbido por la explotación de la porción mineralizada. Está constituida de 4 procesos que son:

### a) Perforación.

Consiste en realizar orificios a distancias regulares entre sí, generalmente entre 8 y 12 m (conocido como malla de perforación), de manera que al introducirse los explosivos la denotación permita fragmentar la mayoría de la roca.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

b) Tronadura.

Consiste en introducir explosivos dentro de las perforaciones junto con un detonante de encendido eléctrico, que se denota mediante un control remoto, mediante una secuencia de tiempos establecidos. El producto obtenido es la roca mineralizada fragmentada de un tamaño suficientemente pequeño (en general menor que 1 m de diámetro) como para ser cargada y transportada por los equipos mineros y alimentar al chancador primario, en donde se inicia el proceso de reducción de tamaño en un sistema en línea hasta llegar a la planta de tratamiento.

c) Carguío.

El material tronado es cargado en camiones de gran tonelaje mediante gigantescas palas eléctricas o cargadores frontales.

d) Transporte.

Para el transporte del material mineralizado y el material estéril, se utilizan camiones de gran tonelaje, por ejemplo 240 o 300 toneladas. Éstos transportan el material desde el frente de carguío a sus diferentes destinos: el mineral con ley al chancador primario, el material estéril a botaderos y el mineral de baja ley a botaderos especiales.

La extracción subterránea se realiza cuando el yacimiento presenta una cubierta de material estéril de espesor tal, que su extracción desde la superficie resulta antieconómica. El mineral se extrae desde abajo hacia arriba, utilizando lo más posible la fuerza de gravedad para producir la fragmentación y el desplazamiento del mineral hacia los puntos de carguío. Una diferencia importante es que en la mina subterránea no se extrae roca estéril, sino que debido a los altos costos que implica la construcción de túneles, la explotación se concentra preferentemente en las zonas de mineral.

Entre los procesos que se ocupan para la extracción subterránea destaca el hundimiento por bloques (block caving), en el cual la extracción se realiza gracias a la fuerza de gravedad. El Proceso consiste en dividir el cuerpo mineralizado en bloques rectangulares y quebrar cada uno de estos en forma separada siguiendo una secuencia, mediante explosivos colocados en su base. De esta forma, el bloque se rompe en fragmentos que son retirados desde su parte inferior a través del nivel de producción y enviados a través de “Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

piques o y galerías hasta llegar al nivel de transporte desde donde son llevadas al proceso de chancado.

El segundo proceso no tan ocupado como el primero es el hundimiento por paneles (panel caving), que es una aplicación particular del hundimiento por bloques, con la diferencia que el quiebre y extracción del mineral se va haciendo por tajadas de un ancho menor.

### **Extracción de cobre a partir de menas sulfuradas.**

Alrededor del 90% del cobre que se produce en el mundo proviene de los minerales de sulfuro. La extracción tiene cuatro etapas:

- Concentración por flotación
- Secado de Concentrado
- Fusión
- Afino

a) Concentración por flotación.

Las concentraciones de cobre en las menas actuales son demasiado bajas por lo que la fundición directa sería muy costosa. Ésta implicaría que se fundiesen enormes cantidades de material sin valor que conllevarían un gran gasto energético y una gran capacidad de horno. Por estas razones, hoy en día se recurre al aislamiento de los minerales de cobre en forma de un concentrado. El método más efectivo de concentración es la concentración por flotación, que requiere un proceso previo de trituración y molienda.

Los principios en los que se basa el proceso de flotación son los siguientes:

Los minerales sulfurados normalmente se humedecen por el agua, pero pueden ser acondicionados con reactivos que los volverán repelentes al agua.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Esta hidrofobicidad puede ser creada en minerales específicos dentro de una pulpa agua–mena.

Los choques entre las burbujas de aire y los minerales que se han hecho hidrofóbicos conducirán a la unión entre las burbujas y dichos minerales

Las partículas de mineral no acondicionadas no se unirán a las burbujas de aire.

Con todo esto conseguimos que los minerales de cobre se adhieran a las burbujas de aire con las cuales se van a elevar hasta la superficie de la celda de flotación. El resto de minerales (ganga) se quedan atrás y abandonan la celda a través de un sistema de descarga.

Los reactivos que se utilizan para crear las superficies hidrofóbicas consisten en moléculas heteropolares, es decir, moléculas que tienen un extremo polar cargado y un extremo no polar (hidrocarburo). Estos reactivos tienen normalmente un grupo portador de azufre en su extremo polar, el cual enlaza a los minerales de sulfuro pero ignora las superficies de los óxidos. Los reactivos de sulfuro más conocidos son los xantatos de sodio y potasio, pero también se usan otras moléculas portadoras de azufre como tionocarbonatos, ditiófosfatos y tiocarbanilida.

#### b) Secado de Concentrado

El Secado es una oxidación parcial de los concentrados de sulfuro de cobre con aire y la eliminación parcial del sulfuro en forma de  $\text{SO}_2$ . Los objetivos del secado son dos:

Utilizar el calor para secar y calentar la carga antes de ser introducida al horno de fundición.

Aumentar la concentración de cobre en el producto de fundición, es decir, en la mata líquida.

El Secado se lleva a cabo entre 500 y 700°C, bajo condiciones bien controladas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### c) Fusión.

El objetivo de la fundición es formar dos fases líquidas inmiscibles: una fase líquida de sulfuro (mata) que contiene todo el cobre de la carga y una fase líquida de escoria sin cobre. La mata tiene un contenido en cobre de entre un 35 a un 65%. La escoria fundida se desecha directamente o después de una etapa de recuperación de cobre. La gran desventaja de este método es la contaminación de la atmósfera con el gas  $\text{SO}_2$ .

La fusión de mata se lleva a cabo al fundir la carga total del horno a una temperatura aproximada de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , normalmente con fundentes de sílice.

La mata fundida resultante del proceso de fundición contiene cobre, hierro y azufre como componentes principales y hasta un 3% de oxígeno disuelto. Además, contiene cantidades menores de metales como As, Sb, Bi, Pb, Ni y metales preciosos.

Para eliminar el hierro, el azufre y otras impurezas, se pasa la mata por un convertidor cilíndrico Pierce –Smith, revestido con refractario básico. En este convertidor se produce la oxidación de la mata con oxígeno a una temperatura de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Al final del proceso se obtiene un cobre metálico líquido no refinado con una pureza de entre un 98.5 a un 99.5%, denominado cobre blíster. Además de éste, también se produce la escoria y grandes volúmenes de gases calientes que contienen entre un 5 a un 15% de  $\text{SO}_2$ .

### d) Refinación Electrolítica

Finalmente, el cobre blíster se refina electroquímicamente para obtener cobre catódico de una gran pureza, superior al 99.99%.

Previamente a la refinación electroquímica es necesario llevar a cabo una refinación térmica, para evitar así la formación de ampollas de  $\text{SO}_2$ . Estas ampollas se forman cuando solidifican pequeñas cantidades de azufre y fósforo que todavía contiene el cobre blíster en forma residual. La aparición de ampollas conllevaría a la debilitación de los ánodos y a la aparición de una superficie áspera de espesor irregular.

La refinación térmica se lleva a cabo en hornos de refinación tipo giratorio que se asemejan a los convertidores Pierce – Smith. La temperatura de operación está entre los  $1130\text{ }^\circ\text{C}$  y los  $1150\text{ }^\circ\text{C}$ .

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Una vez refinado térmicamente se realiza el afino electrolítico del cobre. Este afino se puede realizar mediante electro refinación de los ánodos de cobre impuro o mediante separación por electrolisis a partir de soluciones de lixiviación. El primer método es el más utilizado, ocupando alrededor del 95%.

La electro refinación consiste en la disolución electroquímica del cobre de los ánodos impuros y el depósito selectivo de este cobre disuelto en forma pura sobre cátodos de cobre. Esta técnica tiene dos objetivos:

Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre, consiguiendo cobre con una pureza superior al 99.99% con menos de un 0.004% de impurezas metálicas.

Separar las impurezas valiosas del cobre, que pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

### **Extracción de cobre a partir de las menas de óxido: hidrometalurgia**

Aunque el cobre se presenta más frecuentemente en la forma de sulfuros, también se presenta en forma oxidada como carbonatos, óxidos, silicatos y sulfatos, particularmente en África. Estos minerales oxidados, cuando están presentes en cantidad suficiente en la mena, puede ser reducidos directamente a cobre impuro en el alto horno, como se hacía en el pasado. Pero en la actualidad las menas que se explotan tienen una concentración muy baja de cobre, por lo que es necesario recurrir a otras técnicas como la lixiviación mediante ácido sulfúrico seguida por la precipitación o por la electrólisis del cobre de la solución.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.3 Descripción general del Proceso Fundición.

A lo largo de Chile están en funcionamiento 7 Fundiciones de Cobre, estas son:

- Chuquicamata
- Alto Norte
- Potrerillos
- Paipote
- Ventanas
- Chagres
- Caletones

Las cuales se encuentran ubicadas geográficamente en la figura 1.

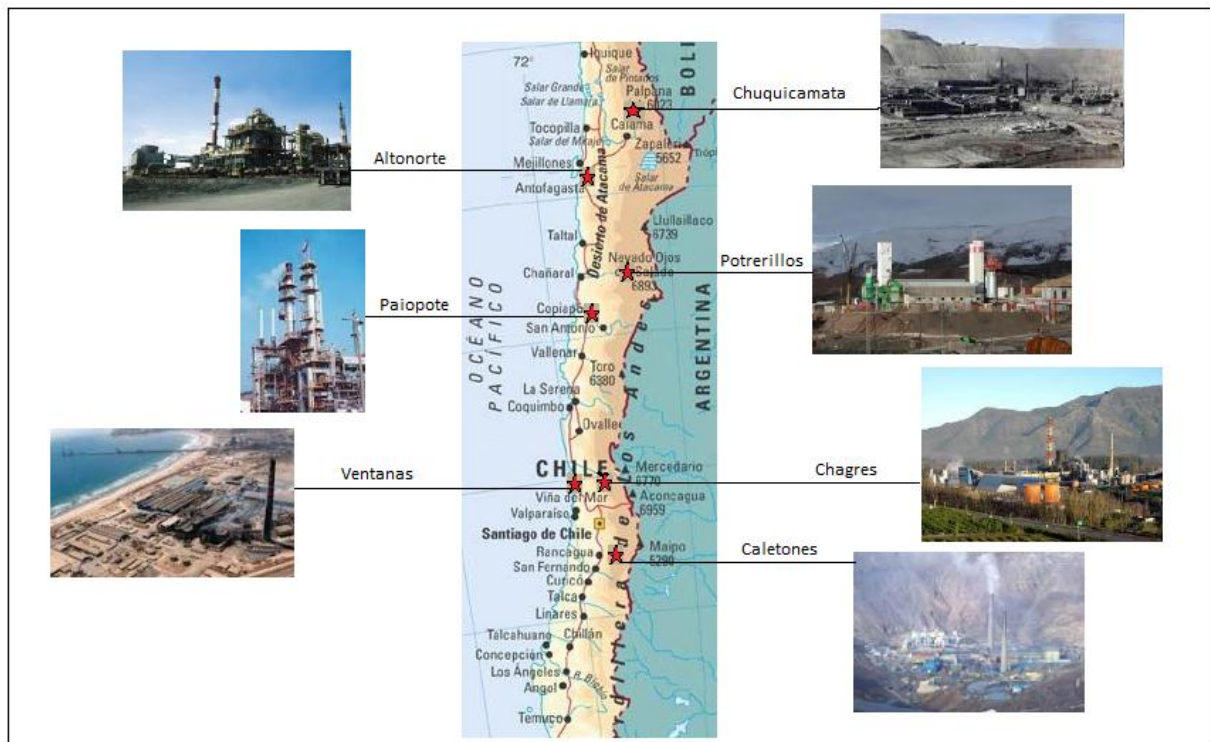


Figura 1. Mapa Geográfico de Chile.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

En general las fundiciones, funcionan de forma muy parecidas, producto que es el camino tradicional para tratar minerales sulfurados, obviamente en cada una de ellas existen algunas diferencias en las tecnologías empleadas en los hornos de fundición y alguno que otro mejoramiento en su producción gracias al manejo de gases. Sin embargo a gran escala el proceso de fundición de cobre es el siguiente.

El proceso se inicia con la recepción, almacenamiento y manejo de materias primas proveniente de las diversas compañías mineras que se procesan en la fundición. Como criterio general, se ha definido una mezcla objetivo que optimiza la capacidad del sistema, conformada por un contenido de cobre de 28%, una ley de fierro promedio de 24% y una relación azufre/cobre en el rango de 1,0 a 1,1 lo que define una ley de azufre de la mezcla entre 28% a 31%.

La humedad promedio es de alrededor de un 8,5%, que se incrementa hasta un 11% en épocas de lluvias.

La mezcla preparada se transporta por cintas a tolvas de mezcla húmeda de gran capacidad, que alimentan la planta de secado el cual deja su contenido a un nivel de 0,2% de humedad, en el caso de poseer Convertidor Teniente o se alimentan directamente al Horno Flash. Nótese que en el caso de poseer Convertidor Teniente, el concentrado seco es inyectado neumáticamente mediante vasos presurizados.

El proceso de fundición es un proceso autónomo, es decir, requiere de un pequeño soporte térmico externo para su desarrollo y se sustenta principalmente en la energía generada por las propias reacciones de oxidación del concentrado.

El reactor opera con aire enriquecido con oxígeno a 36%, produciendo metal blanco de 74% de ley de cobre se transfiere a ollas a los convertidores Pierce-Smith. La escoria con un 8% de la ley de Cobre, es enviada a un Horno Eléctrico para recuperar el contenido de cobre contenido.

Los convertidores Pierce-Smith operan en forma alternada, por lo general esta solamente uno de ellos en fase de soplado (operación en punta). Se opera con dos o tres unidades en caliente (dependiendo de la cantidad de convertidores que se posea) y un tercero o cuarto se mantiene en frío, en reserva o mantención. Los ciclos de conversión son

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



de tipo batch y comprenden el tratamiento de metal blanco proveniente del Convertidor Teniente o Flash según sea el caso y de metal del Horno Eléctrico o tratamiento de escorias. El cobre blíster producido, con una ley de cobre de 97,5% se transporta en ollas al proceso de refinación a fuego.

La limpieza de escorias de fusión primaria se realiza en un horno eléctrico Demag de 10 m diámetro y 5 m de altura, de una potencia de 9,5 KWA junto con la escoria, se procesa la mayor parte de los circulantes generados en fundición. La ley de cobre final llega a 0,8%, tras lo cual es enviada a botaderos mediante ferrocarril.

Los gases generados en el proceso de fusión y conversión son acondicionados para ser conducidos y tratados en una planta de ácido sulfúrico.

En el área de refino a fuego se refina el cobre blíster, eliminando los contenidos residuales de azufre y produciendo ánodos de características químicas y físicas apropiadas para el proceso de refinación electrolítica de cobre.

## 2.4 Equipos.

### **Secador Rotatorio.**

La condición normal de operación del secador, trabajando 24 h/día, es igual a la capacidad promedio diaria de fusión del Convertidor. Este equipo permite obtener un concentrado con una humedad remanente de 0,2%, a partir de un concentrado con una humedad entre 8 a 10%, la que puede llegar en forma eventual hasta 12%.

El secado se realiza por el contacto directo entre el concentrado húmedo y un gas calefactor. Este gas calefactor es generado en una cámara de combustión que cuenta con un quemador mixto el cual puede usar gas natural o ENAP-6 y aire atmosférico sin enriquecimiento. Los gases producidos en esta cámara se mezclan con aire secundario a temperatura ambiente, de manera que la temperatura promedio de los gases resultantes es

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

de alrededor de 700 °C evitando así que se produzca la combustión del concentrado. Estos gases y el concentrado húmedo, son alimentados al secador en co-corriente, recorriendo ambos toda la longitud del tambor del secador. El concentrado avanza impulsado por el movimiento rotatorio y la inclinación del Secador, además es levantado mediante aletas o alzadores, lo cual permite mejorar su contacto con los gases calientes, favoreciendo la transferencia de calor y masa.

El concentrado seco con 0,2% de humedad, abandona el Secador por la parte inferior del extremo opuesto al quemador y cae a un clasificador que se ubica en la zona final, cuya finalidad es rechazar el material que pueda haberse aglomerado en el proceso de secado, de manera evitar inconvenientes operacionales en el sistema de y transporte neumático. El material fino seleccionado, cae a una rastra que o carga alternadamente a uno de los dos estanques del sistema de transporte neumático a través de una tolva de atenuación intermedia.

Debido al tamaño fino del concentrado, los gases evacuados del Secador pueden arrastrar hasta un 20% del concentrado alimentado. Para recuperar este material, se dispone de un filtro de mangas y de un sistema de transporte de tornillo que descarga sobre la rastra antes mencionada.

### **Convertidor Teniente.**

El Convertidor Teniente de 4 m de diámetro por 15 m de largo, opera de forma autónoma, no se requiere de eje semilla para mantener el balance de calor. Los concentrados se inyectan secos a través de toberas (4).



Figura 2. Convertidor Teniente.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

El proceso de fusión-conversión realizado consiste en oxidar el azufre presente en el concentrado a dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) mediante la inyección de aire enriquecido con oxígeno (34% vol.) directamente en la fase metálica a través de toberas (36) sumergidas en el baño ubicadas a lo largo del Convertidor.

Los productos de este reactor son una fase líquida rica en cobre denominada metal blanco de 75% de Cu que es enviada a los convertidores Pierce Smith donde se lleva a cabo la etapa de conversión tradicional a blíster, una fase líquida pobre en cobre denominada escoria con un contenido de 8% de Cu que es enviada a un proceso de limpieza en el Horno Eléctrico y una fase gaseosa rica en SO<sub>2</sub> que abandona el reactor por boca que es enviada a Planta Acido previo enfriamiento y limpieza.

### **Horno Flash.**

En él, se funde una mezcla de concentrado y fundente, donde el concentrado es previamente secado a un grado mucho mayor, del orden de 0,2 de humedad.

Esta carga se alimenta al horno por intermedio del quemador de concentrado, que se encuentra en la Torre de Reacción del horno. El quemador mezcla el material de alimentación y el polvo de la combustión (polvos recuperados), con el aire enriquecido con oxígeno, guiando esta suspensión dentro de la torre de reacción del horno.

Por la granulometría fina de esta carga, la fusión ocurre en “suspensión”, lo que acelera las reacciones del proceso y la transferencia de calor.

Parte de las reacciones que ocurren en el Convertidor, se producen en esta fusión denominada “FLASH”, aportando además calor.

La fusión Flash, se basa en suspender y fundir la carga seca, en un flujo vertical u horizontal, de aire; aire enriquecido u oxígeno (PROCESOS FLASH OÜTOKÜMPÜ – FLASH INCO).

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

El material fundido que se forma en la Torre de Reacción, se recolecta en la Cámara de Separación, donde el eje se separa de la escoria por diferencia de peso específico (densidades), quedando de esta manera estas dos fases muy definidas, en cuanto a niveles, dentro del horno.

Tanto la escoria como el eje son sangrados del horno por sus respectivos puntos de evacuación (orificios – compuertas) y guiados por intermedio de canaletas a sus respectivas ollas de recepción. La escoria es trasladada a botaderos y las ollas con el eje son llevadas hacia la línea de Convertidores para continuar el tratamiento del eje.

Los gases generados durante el proceso avanzan por la toma de gases y siguen un tratamiento de recuperación de polvos y de aprovechamiento del calor que se llevan del horno.

a) Las ventajas de la fusión flash son:

- Bajo consumo de combustible, pudiendo llegar a ser autógena por la combinación adecuada de enriquecimiento del aire y oxidación de la carga.
- Alta capacidad unitaria de producción, cuatro veces superior a la de un horno de reverbero convencional.
- Concentración alta y constante de anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) en los gases.
- Ejes de alto grado (Ley en Cobre).

b) Algunas desventajas de la fusión flash

- Aumento de costos en algunos centros productivos por la necesidad de secar el concentrado a niveles mucho más riguroso que los utilizados en los otros procesos de fusión, como también por la necesidad de incorporar una planta de oxígeno.
- Comparado con el Horno Reverbero su única desventaja es que el proceso Flash no se presta para la limpieza de escoria de Convertidores.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## **Horno Eléctrico.**

El Horno Eléctrico se utiliza para el tratamiento de escoria, debido a que estas últimas son producidas en los procesos de fusión y conversión, contienen cantidades importantes de cobre que hacen que su recuperación sea económicamente rentable.

Algunas ventajas del Horno Eléctrico son:

- Tecnología probada a nivel Industrial y muy eficiente en la recuperación de cobre contenido en las escorias.
- Gran versatilidad por cuanto permite fundir diversos materiales, en este caso en particular, circulantes.

El Horno eléctrico es del tipo de electrodos sumergidos y de geometría circular de 10 metros de diámetro externo en el crisol y aproximadamente 4,95 metros de altura. Posee 3 electrodos del tipo Soderberg, con una potencia que varía entre 2,5 y 7,5 MW según su operación.



Figura 3. Fotografía de un electrodo.

La capacidad de tratamiento nominal de Horno Eléctrico referida a la alimentación, es de 905 t/d (capacidad máxima 1100 t/d), las cuales se desglosan como: 730 t/d de escoria del Convertidor Teniente, 46 t/d de escoria de los Convertidores Pierce Smith y 124 t/d de material sólido secundario (circulante). Adicionalmente, el consumo diario de fundente (sílice) es de 35 t y el de coque de 16 t.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### **Convertidor Pierce-Smith (CPS).**

El Convertidor Pierce-Smith consiste en un reactor semicontinuo de burbujeo, cilíndrico, de aproximadamente 4,5 metros de diámetro por 11 metros de largo.

El proceso es cerrado, la carga es tratada y llevada hasta el final del proceso sin recarga de material. De este modo mejoran las condiciones de trabajo y se reducen las emisiones ambientales.



Figura 4. Dos CPS, uno soplando (lado izquierdo) y el otro en Calentamiento (lado Derecho).

La conversión consiste en la oxidación del azufre y del fierro presente en el metal blanco y en el eje de alta ley, lo que se logra mediante el soplado con aire que se inyecta a través de toberas sumergidas en el baño. En ocasiones, este aire es enriquecido con oxígeno.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

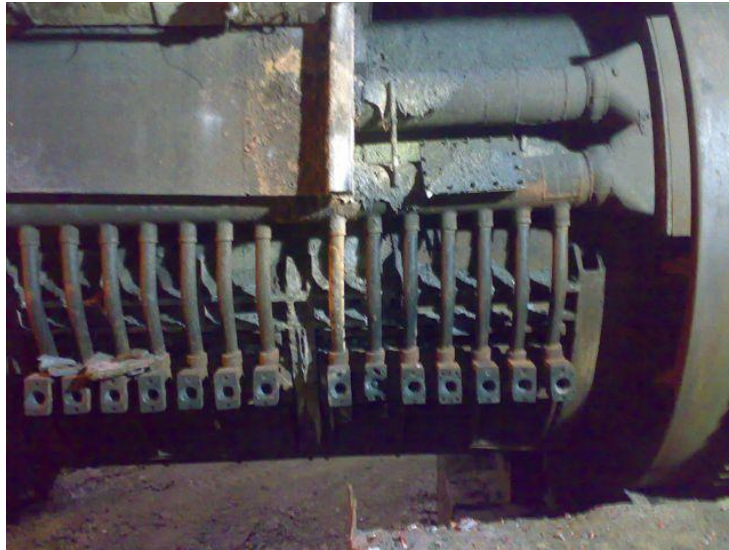


Figura 5. Toberas del CPS.



Figura 6. CPS con Metal Blanco.

Los productos del proceso son una fase líquida denominada Blíster (98,1% Cu) el que es enviado a Refino a Fuego y escoria compuesta principalmente por Fe y  $\text{SiO}_2$  (41,7% Cu) que es enviada a un proceso de limpieza en el Horno Eléctrico. Los gases de proceso producidos son enviados a Planta Acido previo enfriamiento y limpieza.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Figura 7. Alimentación de Escoria proveniente del CT al Horno Eléctrico (lado derecho).

El proceso es 'batch' desde el punto de vista de los materiales cargados, en donde cada ciclo 'batch' esta compuesto por las siguientes etapas: carguío de las escorias y circulantes, fusión de estos, reducción del contenido de magnetita, sedimentación del cobre y evacuación de los productos escoria final y eje de alta ley (70-75 % Cu App.), a través de sangrías.

La limpieza de la escoria en el Horno Eléctrico, consiste en la reducción de los óxidos de cobre y magnetita presentes, con lo cual se logra mejorar la velocidad de decantación de la fase rica en cobre y por lo tanto la separación eficaz de las fases. Para ello se utiliza carbón coque como agente reductor el cual es alimentado sobre el baño. Adicionalmente se cargan circulantes y sílice (fundente), produciendo una escoria fayalítica de bajo punto de fusión. La magnetita y otros óxidos se reducen al reaccionar con el carbón, produciéndose monóxido de carbono (CO) y otros gases tales como: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), hidrogeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O).

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



## **Refinación a Fuego.**

En el último paso de la refinación a fuego, se procesa el cobre blíster en hornos basculantes, agregando agentes purificadores especiales que se llaman fluidificantes para que se oxide una vez más, esta vez para eliminar del blíster toda impureza, quedando solamente una fracción muy reducida de elementos no deseados, tales como plomo, fierro, bismuto, níquel, arsénico, antimonio, sulfuro, selenio y telurio. Luego se extrae el oxígeno con inyecciones de vapor o aceite, con el resultado final de un cobre con un nivel de pureza mínima de 99.9%.

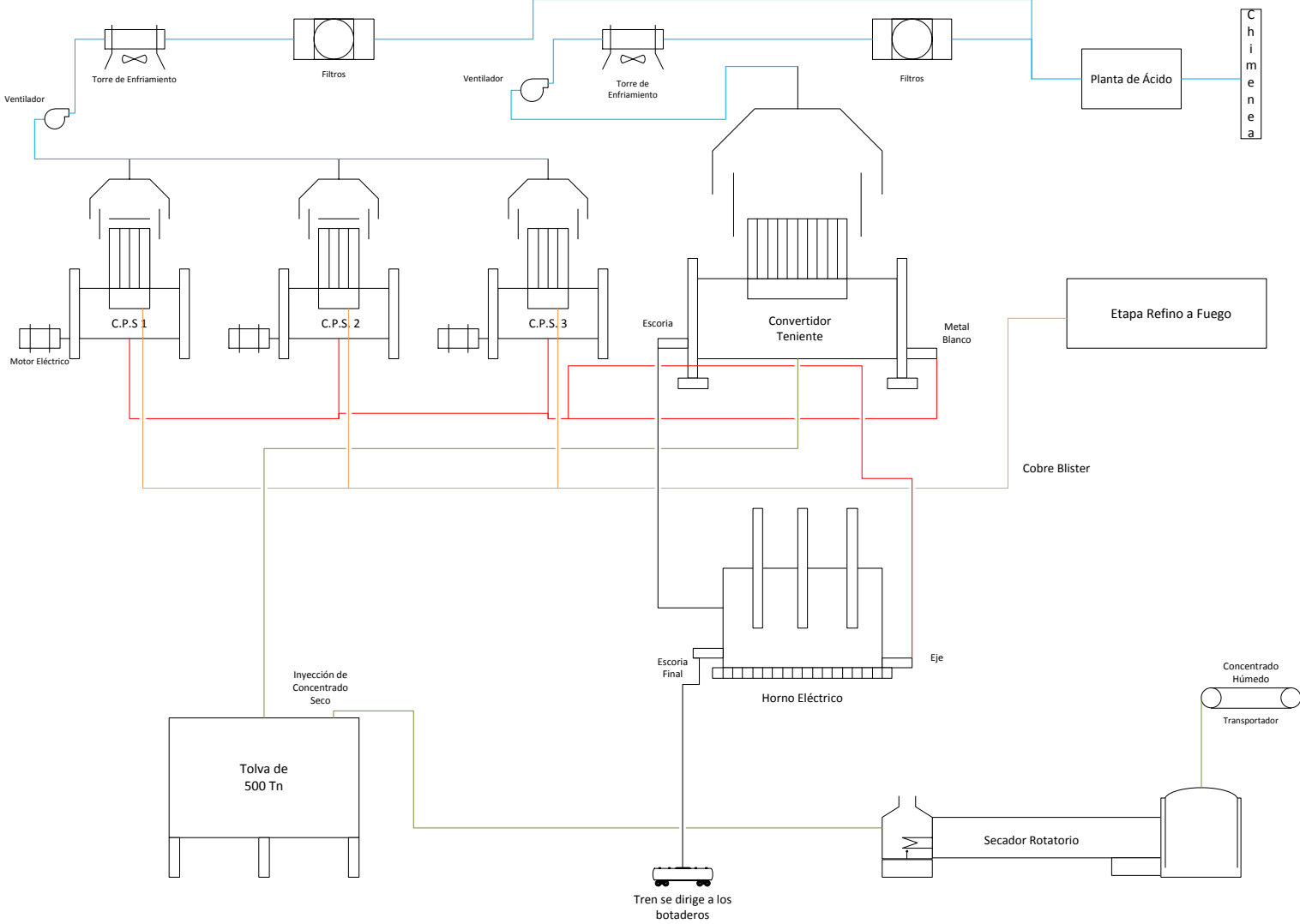
Todo lo que resta hacer es verter el metal líquido en un molde y dejar que se solidifique, formando lingotes que pesan aproximadamente 23 kilogramos cada uno.

A continuación, se muestra un diagrama general del patio de Fundición.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.5 Diagrama Patio de Fundición.



“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.6 Sistema de Manejo de Gases.

El sistema de manejo de gases es un sistema compuesto por circuitos interconectables, uno para el reactor o los reactores y otro para los CPS.

Cabe destacar que durante el proceso de transporte de metal blanco, llenado de CPS, vaciado de cobre blíster y transporte del mismo en ollas, se generan emisiones fugitivas no capturadas por los sistemas de campanas.

Para entender con mayor profundidad el sistema manejo de gases, se dará como ejemplo el sistema utilizado actualmente por Alto Norte.

Alto Norte:

- Captura de gases primaria: Los CPS y Reactor, están dotados de campanas primarias capaces de capturar 386.000 Nm<sup>3</sup>/h de gases. Estos son conducidos a través de ductos hasta las plantas de ácido, mediante tres ventiladores de tiro inducido ubicados en cada uno de éstos circuitos, generando presión negativa que minimiza la emisión de gases fugitivos desde las campanas.
- Captura de gases secundaria: Los CPS y Reactor, están dotados de campanas secundarias capaces de capturar 600.000 Nm<sup>3</sup>/h de gases fugitivos de muy baja concentración de SO<sub>2</sub>. Estos son conducidos a través de ductos hasta una chimenea de altura 100 m.
- Enfriamiento primario: En el Reactor se cuenta con ductos dispuestos a modo de serpentín a la salida de la campana, que enfrían los gases por radiación-convección. Bajo esos ductos hay una cámara colectora de polvo que permite la primera recuperación de material particulado de estos gases. En los CPS se cuenta con cámaras de enfriamiento evaporativo y colectoras de polvo. Todo el polvo recuperado es retornado a los procesos de Alto Norte.
- Limpieza primaria de gases: El gas a temperatura menor que 400°C pasa a través de dos precipitadores electroestáticos secos ubicados en cada circuito, equipos que recuperan el polvo fino contenido en los gases, y que no fue abatido en las cámaras.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Este polvo pasa a constituir el circulante denominado “polvo de fundición”, que es posteriormente reprocesado.

- Limpieza y enfriamiento secundario de gases: En esta área se eliminan partículas muy pequeñas de polvo contenidas en los gases utilizados en la fabricación de ácidos sulfúricos. La limpieza húmeda de los gases, permite eliminar el polvo residual, arsénico, mercurio y halógenos. El área está compuesta por torre de lavado, venturi-scrubbers, torre deshumidificadora y precipitadores electrostáticos húmedos. El gas junto con ser limpiado en esta acondicionándolo para las etapas posteriores del proceso. Este proceso genera una solución conocida como ácido débil, que es utilizado en la Planta de Tratamiento de Polvos como agente de lixiviación y/o comercializado.

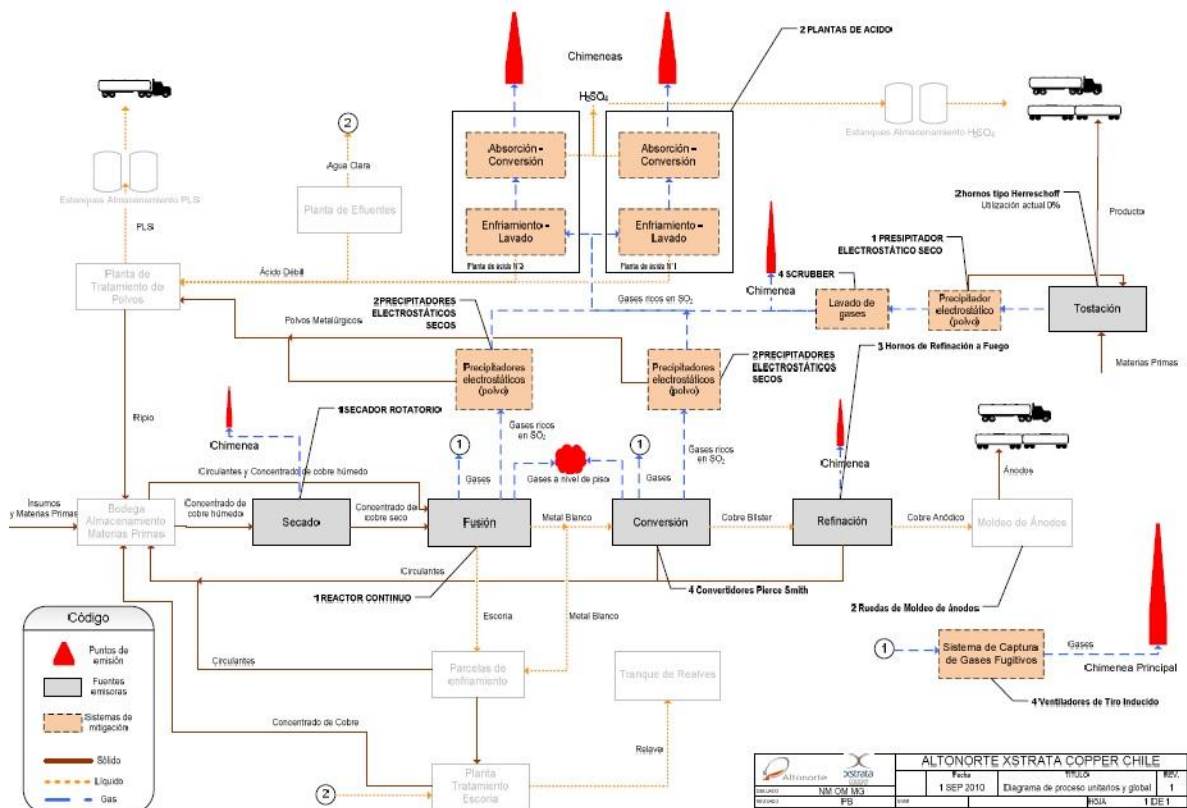


Figura 8. Diagrama del proceso de Alto Norte.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.7 Dispersión del SO<sub>2</sub>

Se cree que el dióxido de azufre es responsable por varios efectos nocivos sobre los humanos, sobre la fauna, la vegetación y las estructuras humanas. El control de este y otros contaminantes se ha transformado en un asunto fundamental en las agendas de los gobernantes en todo el mundo, generando iniciativas nacionales y regionales para reducir emisiones.

Es por estos motivos que se ha estudiado si es posible reducir sus emisiones, atacando directamente a los gases fugitivos generados en las fundiciones de Cobre. Para ello se tomó como ejemplo CODELCO División Ventanas, su sistema de Operación y el Nivel de contaminante que esta emite.

A continuación se mostrarán imágenes geográficas, graficas de niveles de SO<sub>2</sub> y diagrama de nube contaminante, donde se encuentran ubicadas las centrales de monitoreo en un mapa de la V región.

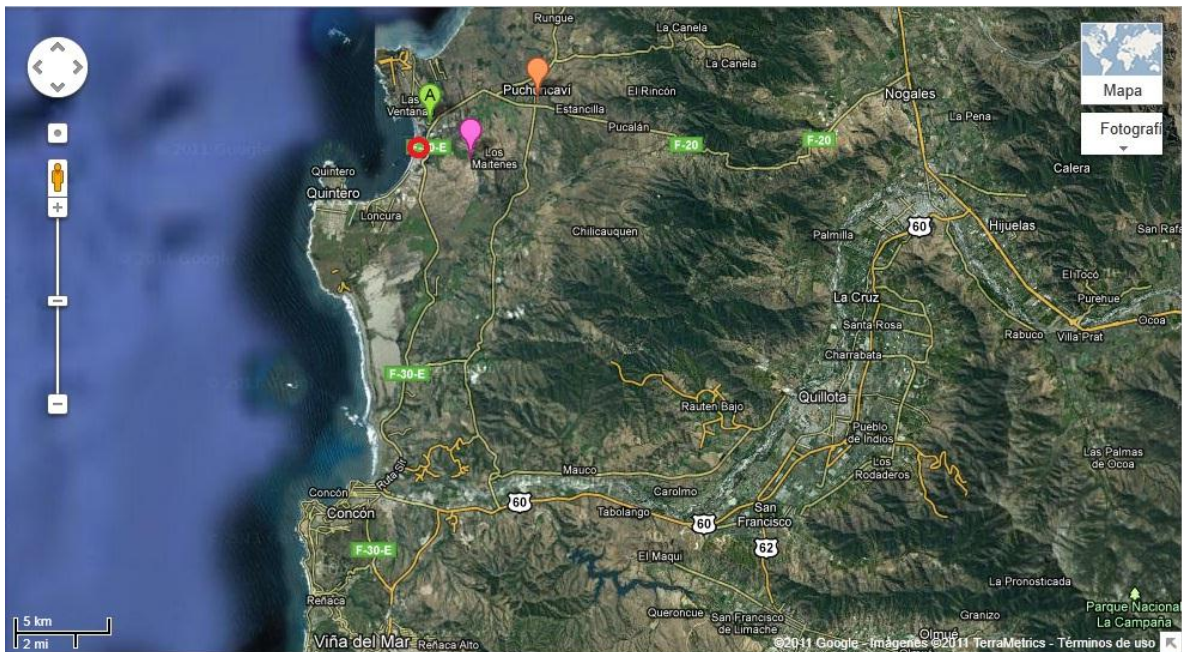


Figura 9. Vista Satelital de CODELCO División Ventanas y Centrales de Monitoreo.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Como se puede apreciar en la figura 9, se muestran las centrales de monitoreo más cercanas a CODELCO, representadas por colores: verde, rosado y naranja. Mientras que Ventanas es representado por un círculo rojo.

Las Centrales de Monitoreo más cercanas son: La Greda, Los Maitenes y Puchuncavi.

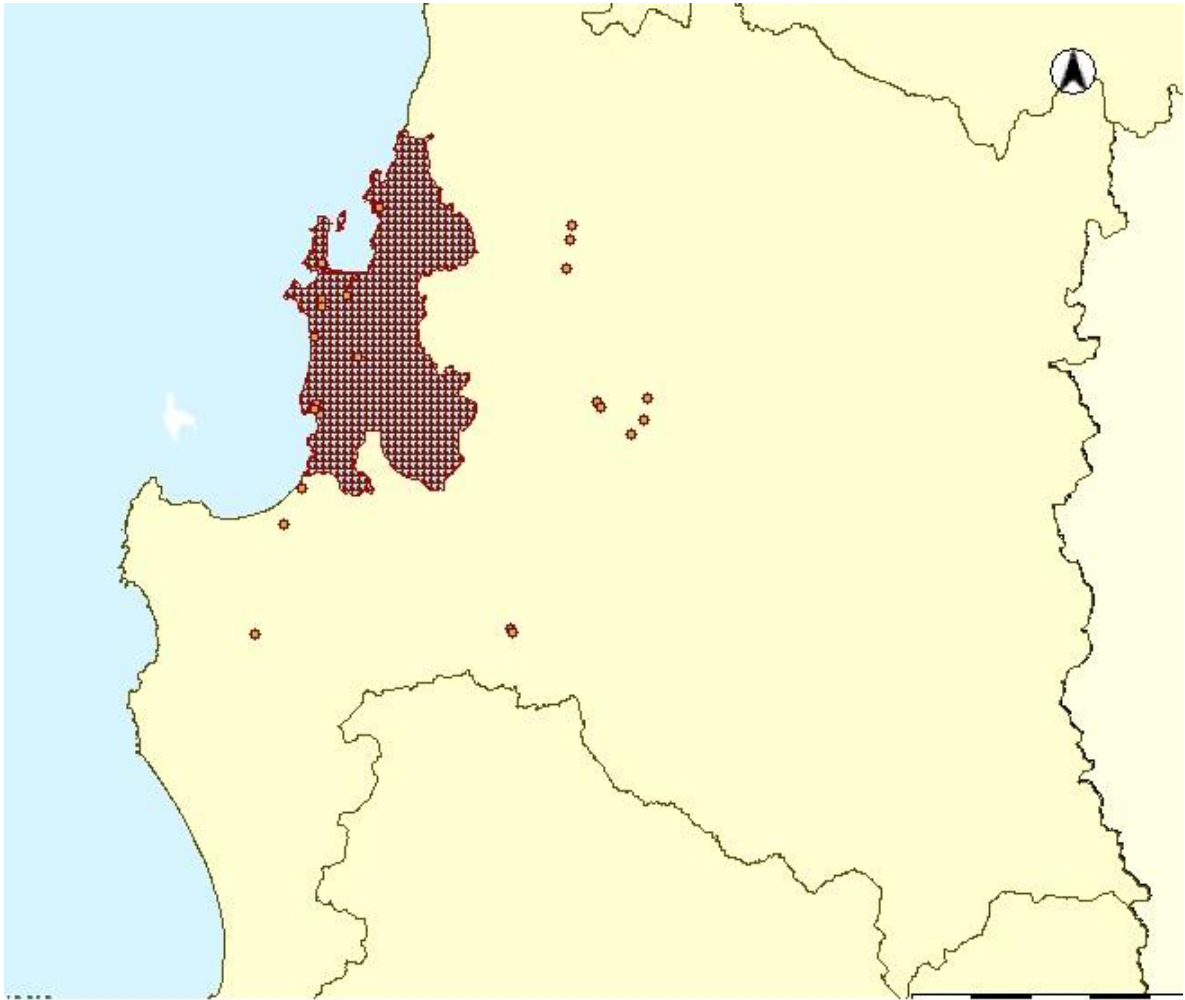


Figura 10. Mapa de Contaminantes en la V región.

Se puede apreciar que el foco de mayor contaminación se encuentra en la zona industrial de Ventanas, donde precisamente se ubica Codelco.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

15 estaciones		CH4	CO	HCNM	HCT	10	2,5	NO	NO2	NOX	O3	SO2	Meteorología
Comuna de Concón 5 estaciones	<a href="#">Colmo</a>												
	<a href="#">Concón sur</a>												
	<a href="#">Concón Urbana Fija</a>												
	<a href="#">Junta de Vecinos</a>												
	<a href="#">Las Gaviotas</a>												
Comuna de Puchuncaví 6 estaciones	<a href="#">La Greda en línea</a>												
	<a href="#">Los Maitenes en línea</a>												
	<a href="#">Meteorológica Principal</a>												
	<a href="#">Puchuncaví en línea</a>												
	<a href="#">Terminal Concentrados</a>												
	<a href="#">Terminal de Combustible Campiche</a>												
Comuna de Quilpué 1 estación	<a href="#">ARMAT</a>												
Comuna de Quintero 2 estaciones	<a href="#">Sur</a>												
	<a href="#">Valle Alegre</a>												
Comuna de Viña del Mar 1 estación	<a href="#">Viña del Mar en línea</a>												

Tabla 1. Centrales de Monitoreo ubicadas en la V Región.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

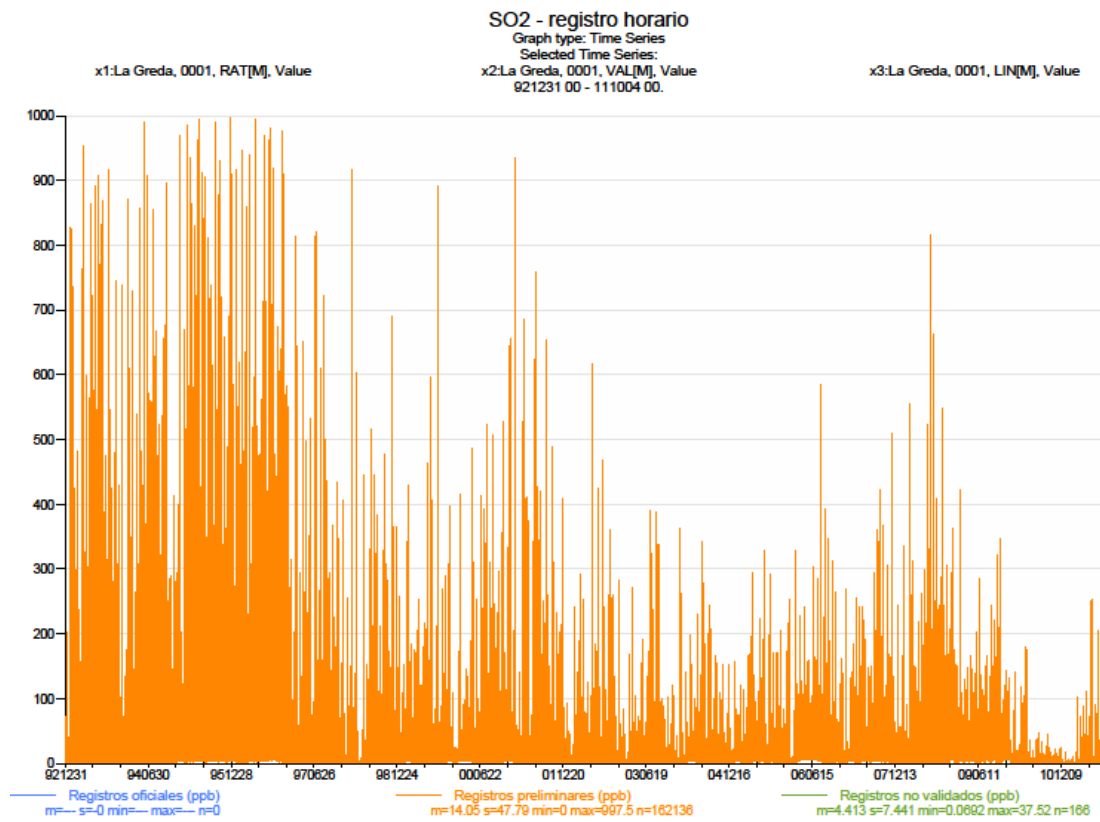


Figura 11. Registro de SO<sub>2</sub> En La Greda.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



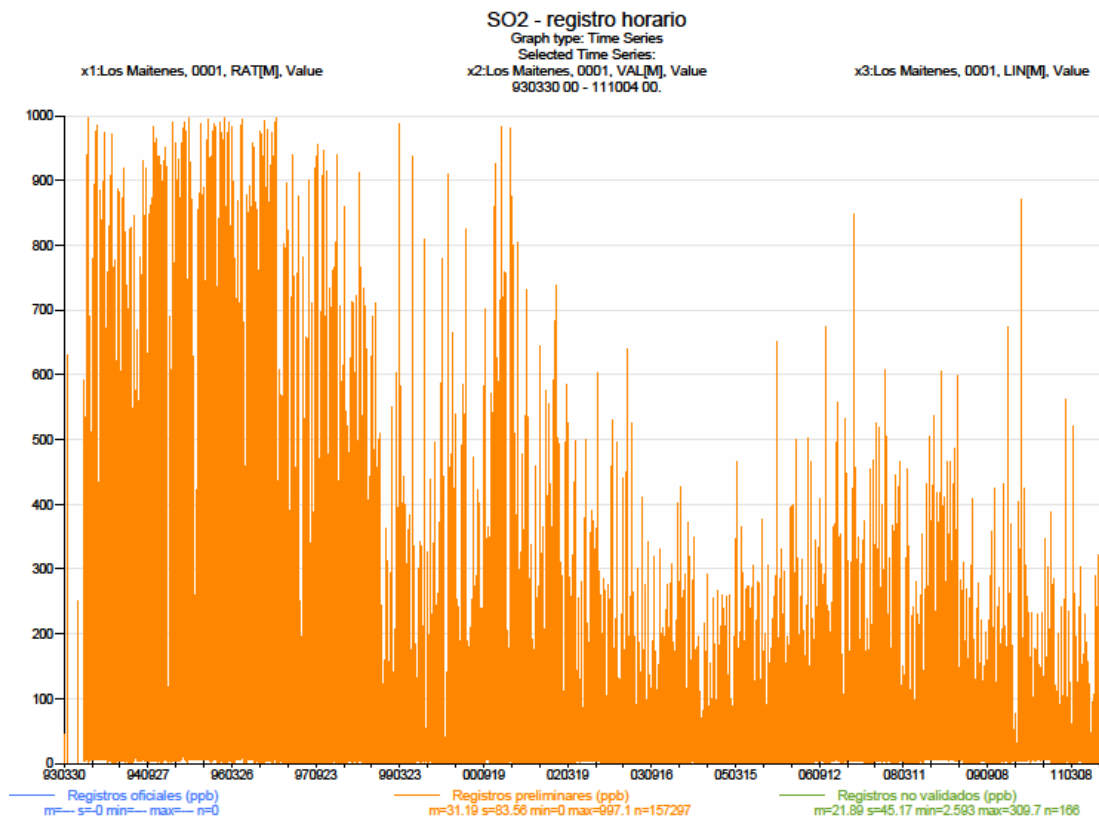


Figura 12. Registro de SO<sub>2</sub> En Los Maitenes.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

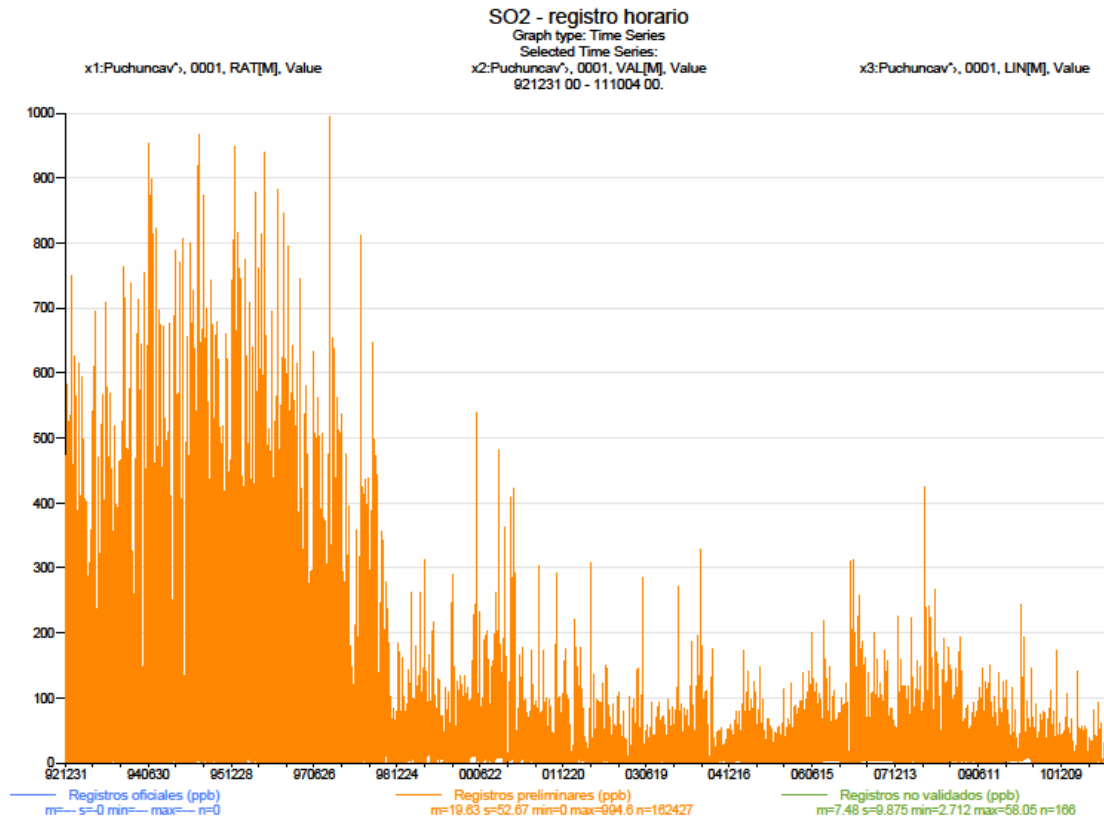


Figura 13. Registro de SO<sub>2</sub> en Puchuncavi.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

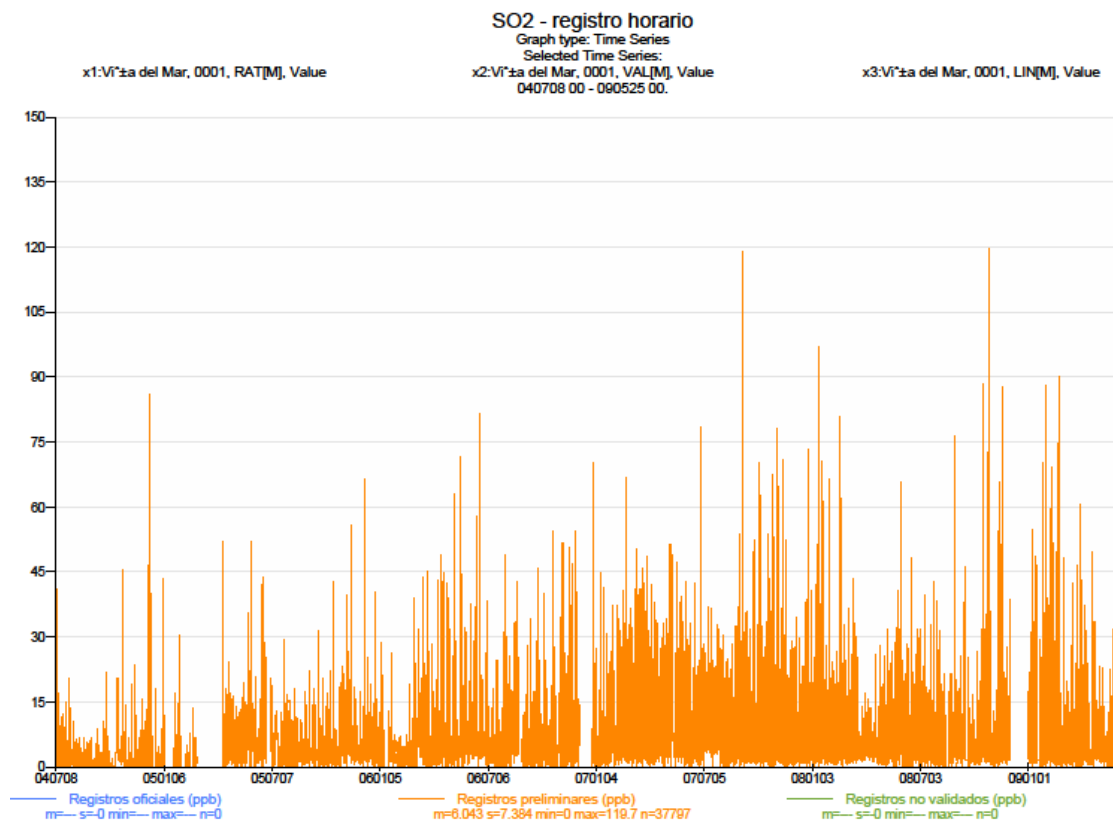


Figura 14. Registro de SO<sub>2</sub> En Viña del Mar.

Para buscar una posible solución a este problema se planteó la idea de controlar los gases fugitivos productos de fundición, encontrando sus orígenes y obteniendo datos reales. Para ello se llevó a cabo una simulación simultánea entre Excel y MatLab, donde se introducen los principales focos contaminantes que son: El Convertidor Teniente, Horno Eléctrico, Convertidores Pierce Smith y de forma muy escasa Secador Rotatorio.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.8 Efectos Nocivos del SO<sub>2</sub>.

Al respirar aire que contiene dióxido de azufre, éste pasa al interior del cuerpo a través de la nariz y los pulmones. Llega fácil y rápidamente a la corriente sanguínea a través de los pulmones. Una vez dentro del cuerpo, se degrada a sulfato y es excretado en la orina.

Los estudios realizados en animales expuestos al dióxido de azufre han descrito efectos respiratorios similares a los observados en seres humanos. La exposición de cobayas a niveles bajos ( $2.600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  -1 ppm-), alteró el ritmo respiratorio haciendo la respiración menos profunda. La exposición a concentraciones más altas produce síntomas más graves, tales como disminución de la frecuencia respiratoria, inflamación o infección de las vías respiratorias y destrucción de áreas del pulmón. Las personas asmáticas que hacen ejercicios físicos son susceptibles a los efectos respiratorios de concentraciones relativamente bajas ( $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$  -0.25 ppm-) de dióxido de azufre.

La mayoría de los efectos de la exposición en adultos (por ejemplo, dificultad para respirar, alteración del ritmo respiratorio, y ardor de la nariz y la garganta) también es probable que se produzcan en niños, pero se desconoce si los niños son más susceptibles que los adultos.

Pero los niños pueden estar expuestos a cantidades de dióxido de azufre mayores que los adultos porque inhalan más aire por unidad de peso corporal que los adultos. Además los niños hacen ejercicio con más frecuencia que los adultos. El ejercicio aumenta la frecuencia respiratoria, por lo que cuanto más dióxido de azufre penetra en los pulmones el efecto es mayor. El estado de salud de las vías respiratorias de la persona y no la edad determinan la susceptibilidad a los efectos de respirar dióxido de azufre. Esto significa que los adolescentes con buena salud (entre 12 y 17 años) no son más susceptibles a los efectos de respirar dióxido de azufre que personas de edad con buena salud.

La influencia sobre la vegetación se manifiesta desde daños a las hojas hasta la muerte de las plantas. En primer lugar las puntas de las hojas se ponen amarillas y, en casos extremos, la hoja se enrolla y muere. Cuando el envenenamiento es fuerte la planta puede morir. En las áreas de cultivo se malogran las cosechas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 2.9 Norma de emisión de SO<sub>2</sub>.

Publicado en el Diario Oficial el 06 de Marzo de 2003.

Norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

D.S. N°113 de 6 de agosto de 2002, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República

(DO 6.03.2003).

Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Considerando:

Que de acuerdo con lo preceptuado en la Ley 19.300, es deber del Estado dictar y revisar normas para regular la presencia de contaminantes en el medio ambiente, de manera de prevenir que éstos puedan significar o representar, por sus niveles, concentraciones y periodos, un riesgo para la salud de las personas.

Que el dióxido de azufre es un importante bronco constrictor, desde los primeros minutos de exposición y su efecto aumenta con la actividad física, con la hiperventilación, al respirar aire frío y seco y en personas con hiperreactividad bronquial.

Que la exposición a este contaminante puede producir efectos agudos y crónicos sobre la salud de las personas.

Que el dióxido de azufre puede presentar efectos adicionales a los de salud tales como efectos sobre la vegetación, ecosistemas y materiales expuestos a este contaminante.

Que el dióxido de azufre es un precursor de aerosoles secundarios.

Que la definición de niveles de emergencia ambiental tiene por objetivo proteger a la población en situaciones de excepción, de niveles de concentración que por su magnitud y periodo de exposición pueden producir efectos agudos sobre la población, especialmente la más sensible

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Para el caso de los niveles que definen situaciones de emergencia ambiental y por estar estos vinculados desde el punto de vista conceptual a efectos agudos, no se establecen niveles de emergencia ambiental como concentración anual.

Que en nuestro país, las situaciones de emergencia ambiental están asociadas a niveles de exposición como concentración de 1 hora y se verifican principalmente en áreas circundantes a grandes mega fuentes emisoras de SO<sub>2</sub>. En algunas de estas áreas se han registrado altos niveles de concentración de SO<sub>2</sub> en el aire, debido a la magnitud de las emisiones de estas mega fuentes

#### DECRETO:

Artículo 2.- Para efectos de lo dispuesto en la presente norma, se entenderá por:

# *ppbv*: Unidad de medida de concentración en volumen, correspondiente a una parte por billón.

# *Concentración de Dióxido de Azufre*: Valor promedio temporal detectado en el aire expresado en partes por billón (ppbv) o en microgramos por metro cúbico normal (µg/m<sup>3</sup>N).

Artículo 3.- La norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración anual será de 31 ppbv (80 µg/m<sup>3</sup>N).

Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración anual, cuando el promedio aritmético de los valores de concentración anual de tres años calendarios sucesivos, en cualquier estación monitora EMRPG, fuere mayor o igual al nivel indicado en el inciso precedente.

Artículo 4.- La norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre como concentración de 24 horas será de 96 ppbv (250 µg/m<sup>3</sup>N).

Artículo 5.- Los siguientes niveles originarán situaciones de emergencia ambiental para dióxido de azufre, en concentración de una hora:

Nivel 1: 750 – 999 ppbv (1.962 – 2.615 µg/m<sup>3</sup>N)

Nivel 2: 1.000 # 1.499 ppbv (2.616 – 3.923 µg/m<sup>3</sup>N)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Nivel 3: 1.500 ppbv o superior (3.924 µg/m<sup>3</sup>N o superior)

Artículo 7.- Cuando el dióxido de azufre fuese precursor de otro contaminante normado, los planes de descontaminación o prevención que se establezcan para el control de este contaminante, podrán incluir medidas de reducción de emisiones del contaminante dióxido de azufre, independientemente del cumplimiento de las normas de calidad de aire que esta norma establece.

## **2.10 Cambio Futuro en la norma.**

Ministra María Ignacia Benítez así lo confirmó. Sin embargo, la titular de Medio Ambiente aseguró que antes de 2014 la normativa estará en aplicación.

La ministra de Medio Ambiente, María Ignacia Benítez, aseguró que al menos durante este año no estará lista la normativa que regula las emisiones provenientes de las fundiciones de cobre. Sin embargo, es enfática en decir que “el proyecto y la normativa estarán listos en este gobierno”.

Lo que motiva a que el ministerio retrase hasta marzo la presentación del proyecto es que se busca la mayor participación ciudadana y de las empresas en su estudio, lo que no es posible durante los primeros dos meses del año.

La cartera que dirige Benítez sigue de cerca el desarrollo de este proyecto, el que dará lineamientos claros a una industria que, aunque ya captura parte de sus emisiones, aún no se encuentra regulada.

---

“Pre factibilidad técnica económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### III. Análisis por Equipo.

Una vez señalados los focos de mayor liberación de SO<sub>2</sub> se procedió a realizar un estudio detallado de cada proceso involucrado, para poder determinar cómo se comportaban los equipos. Dicho estudio combinó la teoría de balances de masa junto con la Termodinámica para poder apreciar cómo influyen la temperatura y los reactivos a alimentar en cada uno de ellos.

Como se señaló previamente, el patio de Fundición lo conforman los equipos: Secador rotatorio, Convertidor Teniente, Convertidores Pierce Smith y Horno Eléctrico.

#### 3.1 Secador Rotatorio

Principalmente el equipo está encargado de eliminar agua, sin embargo pequeñas cantidades de concentrado se pierden en el proceso.

Debido que su central función es evaporar agua, controlarlo no genera mayor problema, sin embargo para obtener su real pérdida de concentrado hay que ir muestreando a la entrada y salida del equipo.

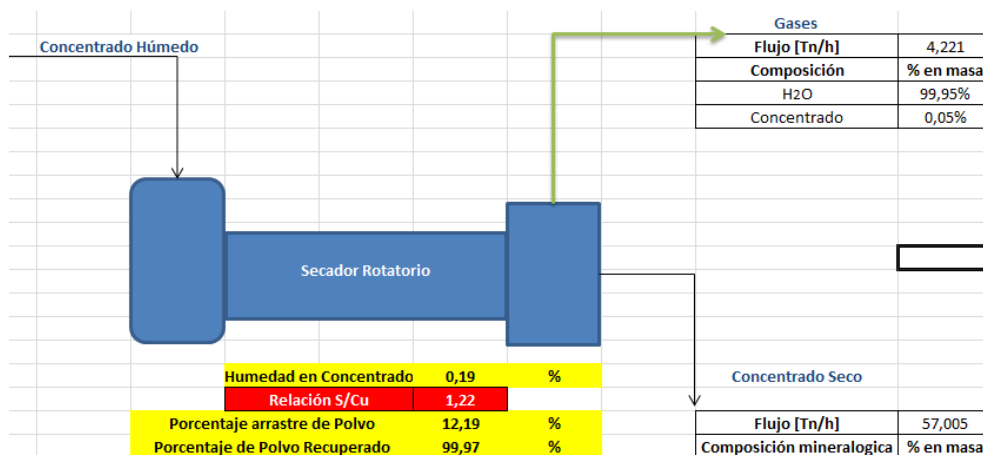


Figura 15. Diagrama General Secador Rotatorio.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



### 3.2 Convertidor Teniente

Datos a considerar en la Operación del equipo son: Humedad del Concentrado, Relación S/Cu, % molar de Aire enriquecido, Coeficiente de Oxígeno y Temperatura de Operación.



Figura 16.

Una vez que uno tiene presente dichos datos de operación podemos integrar las reacciones químicas que permiten la separación de especies y el enriquecimiento del Cobre. Dichas reacciones químicas se describen a continuación.

- 1)  $2CuFeS_2 + O_2 \rightarrow Cu_2S + 2FeS + SO_2$  (100% de Conversión)
- 2)  $CuS + O_2 \rightarrow Cu + SO_2$  (100% de Conversión)
- 3)  $2Cu_5FeS_4 + O_2 \rightarrow SO_2 + 5Cu_2S + 2FeS$  (100% de Conversión)
- 4)  $2FeS + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2FeO$  (87,526% de Conversión)
- 5)  $Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$  (100% de Conversión)
- 6)  $2FeS_2 + 5O_2 \rightarrow 2FeO + 4SO_2$  (100% de Conversión)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

- 7)  $Fe_2O_3 + FeO \rightarrow Fe_3O_4$  (18,691% de Conversión)
- 8)  $6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4$  (18,691% de Conversión)
- 9)  $4Cu + O_2 \rightarrow 2Cu_2O$  (20,391% de Conversión)
- 10)  $2FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$  (100% de Conversión)
- 11)  $2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$  (5% de Conversión)

Estas ecuaciones nos permiten saber cómo se comporta el Convertidor Teniente (C.T.). Todos los datos fueron ingresados a una planilla Excel para poder obtener los gases teóricos que está emitiendo dicho equipo.

### 3.3 Horno Eléctrico

Como se mencionó anteriormente este equipo está encargado de la limpieza de escoria, sin embargo su contaminación de  $SO_2$  es menor si se compara con los equipos, C.T. y Convertidores Pierce Smith (C.P.S.).

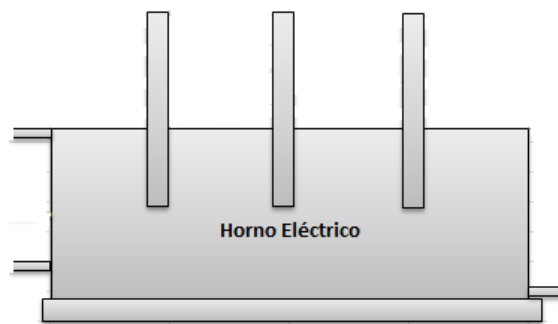


Figura 17.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Este equipo a diferencia del C.T., no se posee tanta información. Por ende se realizó una fusión entre la teoría de balances de masa, equilibrio químico y la Termodinámica del Horno Eléctrico. Para finalmente obtener el comportamiento de él, a medida que transcurre su operación y varían los datos de entrada, como composiciones y temperaturas dentro del Horno. Los cálculos para lograr esta fusión se detallan en el Anexo de cálculos.

Los resultados de las ecuaciones se muestran a continuación:

- 1)  $Fe_3O_4 + C \rightarrow 3FeO + CO$  (55,36% de Conversión)
- 2)  $2FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$  (0% de Conversión)
- 3)  $Cu_2O + C \rightarrow 2Cu + CO$  (100% de Conversión)
- 4)  $FeO + C \rightarrow Fe + CO$  (97,93% de Conversión)
- 5)  $Fe + Cu_2S \rightarrow 2Cu + FeS$  (20,31% de Conversión)
- 6)  $Fe + Fe_3O_4 \rightarrow 4FeO$  (0% de Conversión)
- 7)  $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$  (50% de Conversión)
- 8)  $Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$  (15,2% de Conversión)
- 9)  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  (50% de Conversión)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### 3.4 Convertidor Pierce Smith (C. P. S)

Encargado de concentrar el cobre alrededor de un 98%, por ende libera mayor cantidad de  $SO_2$  que proceso anterior. No se poseía información sobre como interactuaban las reacciones, por lo que se tuvo que realizar el mismo procedimiento mencionado anteriormente en el horno eléctrico. Los cálculos para lograr esta fusión se detallan en el Anexo de cálculos

#### **Reacciones químicas involucradas en el proceso.**

##### I. Etapa Formación de Escoria.

- 1)  $3FeS + 5O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 3SO_2$  (49,99% de Conversión)
- 2)  $FeS + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow FeO + SO_2$  (99,98% de Conversión)
- 3)  $2FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$  (100% de Conversión)

##### II. Etapa Formación de Cobre.

- 1)  $Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$  (99,84% de Conversión)
- 2)  $Cu_2S + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2$  (49,86% de Conversión)
- 3)  $Cu_2S + 2Cu_2O \rightarrow 6Cu + SO_2$  (100% de Conversión)

##### III. Etapa Adición de Escoria.

- 1)  $Cu_2S + 2CuO \rightarrow 6Cu + SO_2$  (Esta última Etapa casi no se realiza)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## IV. Sistema Tratamiento de Gases.

### 4.1 Proceso de Captura.



Figura 18. Patio de Fundición.

Como se muestra en la imagen, el patio de fundición es un recinto de forma rectangular, el cual posee un techo y está abierto por ambos lados, uno de estos lados es por donde se tomó la fotografía. Los equipos instalados en dicho patio son: grúas para transporte de cobre procesado, tres convertidores Pierce Smith, Horno Eléctrico, Convertidor Teniente, Proceso de Refino a Fuego, tren de carga y maquinaria pesada. Como se pudo comprobar anteriormente, dichos equipos de fundición son los encargados de producir la mayoría del  $SO_2$  y como se puede apreciar en esta imagen, a pesar de ser de baja resolución, existe contaminación en la parte superior de dicho techo, debido a los gases fugitivos.

Sin embargo este patio, no se encuentra aislado al medio ambiente. Esta fotografía, no permite visualizar que el techo posee múltiples entradas por donde se escapan los gases

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

e inclusive por los lados que deberían estar cerrados, también existen entradas de alrededor de 5 metros por los cuales se escapan los gases.

Para evitar que los gases sean liberados al medio ambiente, se tiene que realizar una re estructura del patio de fundición, el cual como primer punto tiene que ser un recinto completamente hermético al medio que lo rodea. El cual solamente podría abrirse para el ingreso de maquinaria pesada, encargada de la limpieza, y el tren de carga. Segundo, debido que los gases tienden a subir, en el techo se instalaran sistemas de captura de gases, los cuales pueden ser campanas de extracción resistentes a la corrosión

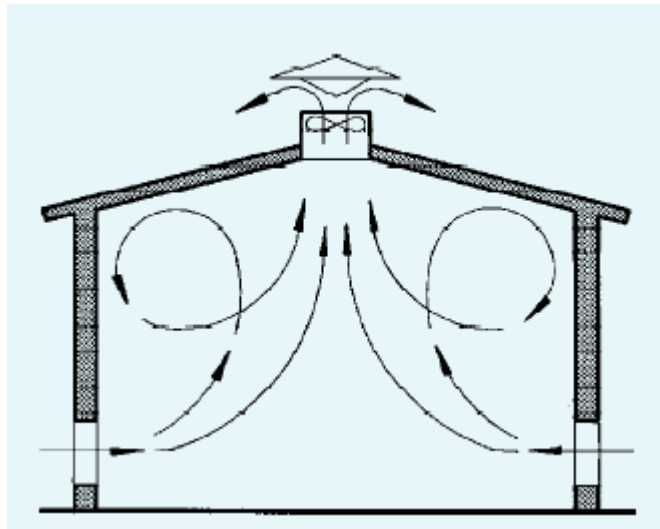


Figura 19. Posible Sistema de Extracción.

## 4.2 Limpieza.

Para la limpieza de los gases capturados, va a ser necesario contar con un sistema de filtros. Debido que el sistema de ventilación, va a estar en la parte superior. No va a ser necesario tener un sistema de filtrado extremadamente complicado, debido a que las partículas que logren entrar a dicho sistema, serán pequeñas. Las partículas de mayor tamaño, por su propio peso les va a imposibilitar ascender en demasía.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### 4.3 Posibles Soluciones.

Una vez capturados los gases y limpiados, se va a proceder a su tratamiento de limpieza.

Se conoce que la planta de ácido sulfúrico es un cuello de botella por ende enviar los gases hacia ella no es viable, sin embargo construir otro método para tratar los gases si lo es.

Debido que el patio de fundición estaría más cerrado es sumamente importante impartir a los trabajadores nuevos cursos de capacitación, debido que se encontraran en un medio mucho más peligroso por los altos niveles de gases provenientes de fundición.

Las Tecnologías propuestas son:

#### **Desulfuración semi-seca**

Es basado en la reacción entre el  $SO_2$  y el  $Ca(OH)_2$  en condiciones húmedas. El proceso se basa en una combinación innovadora en sistemas de desulfuración seca y otros procesos secos de limpieza de gases.

##### *Descripción del Proceso*

El principio innovador del proceso consiste en crear un contacto entre el gas y un polvo libre, alcalino y humedecido, para evitar los equipos de manipulación y atomización de barros y la instalación de un tanque de absorción voluminoso.

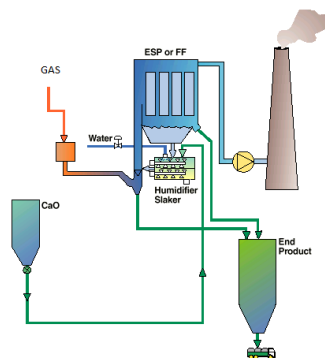


Figura 20.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

El diagrama de flujo, en la Figura 20, indica el principio básico de operación. El flujo gaseoso, cargado de material particulado, o bien pre-limpiado de partículas, ingresa en la sección vertical del ducto, de diseño especial. Luego que el gas es dirigido hacia arriba, un polvo reactivo alcalino humedecido, de flujo libre y fácilmente dispersable, se distribuye uniformemente a través de toda la sección del ducto que oficia como reactor. En este punto, se genera una nube densa de polvo reactivo. Las partículas de polvo humedecidas reaccionan con los componentes ácidos del gas, y simultáneamente se evapora el contenido de humedad, mientras pasan por el ducto-reactor y durante un determinado tiempo de residencia en el mismo. Debido a la atmósfera húmeda generada, una pequeña cantidad de humedad permanece en el polvo reactivo, como humedad absorbida de equilibrio. Desde la parte inferior el colector de polvo, un polvo “semi-seco” fluye hacia el mezclador/humidificador. Además, se agrega continuamente en el mezclador cal reactiva fresca, en relación estequiométrica con los gases ácidos. La adición de agua se controla con la temperatura a la salida del colector de polvo, la cual generalmente se mantiene en 70°C (158°F) y 40% de humedad relativa.

### *Experiencia*

El sistema combina una operación simple con bajo costo y excelente desempeño. La tecnología es capaz de alcanzar 90-95% de remoción de  $SO_2$  en un amplio rango de niveles de contenido de azufre. La utilización de Filtros de Manga en combinación con el sistema es en muchos casos ventajosa. La combinación con un precipitador electrostático es también una posibilidad. El sistema es de mantenimiento muy simple y tiene requerimientos mínimos de espacio.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



## **Desulfuración por agua de mar**

El proceso de desulfuración por agua de mar (SWFGD) absorbe el  $SO_2$  en el agua de mar, que luego es oxidada antes de ser descargada de nuevo al océano. En otras palabras, este proceso devuelve el azufre al mar en su forma original, como sulfatos disueltos. No se han detectado efectos significantes en el medio ambiente marino correspondientes con la descarga del sistema de desulfuración con agua de mar, tanto en pruebas de laboratorio como en análisis de biomasa de largo plazo y análisis de seguimiento del receptor.

### *Descripción del Proceso*

El proceso de desulfuración por agua de mar utiliza las propiedades inherentes al agua marina para absorber y neutralizar el dióxido de azufre. El agua de mar está disponible en grandes cantidades en las plantas costeras y es utilizada como agua de enfriamiento en los condensadores. Luego de pasar por los mismos, el agua de mar se reutiliza para controlar las emisiones de  $SO_2$ . La absorción del  $SO_2$  ocurre en una torre empacada, donde parte del agua de enfriamiento utilizada y el gas, en contracorriente, se ponen en contacto. No se necesita agregar ningún tipo de químico ni reactivo adicional. Un diagrama de flujo esquemático se muestra en la Figura 21.

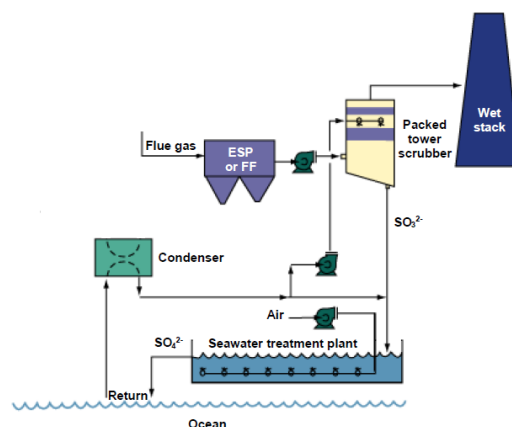


Figura 21.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

El agua de mar es alcalina por naturaleza, y tiene una gran capacidad de neutralización de los ácidos formados por la absorción del  $SO_2$ . El efluente absorbido ácido fluye por gravedad hasta la planta de tratamiento de agua de mar (SWTP). Allí se mezcla con el resto del agua de mar proveniente de los condensadores y se oxida hasta que el azufre toma la forma de sulfato ( $SO_4^{-2}$ ), inocuo y soluble. Esta oxidación se produce por una aireación, antes que el agua tratada sea devuelta al mar. Los sulfatos son ingredientes naturales del agua de mar y solo hay un pequeño aumento de concentración de los sulfatos en el agua de mar que se descarga en el océano. Este aumento está dentro de las variaciones naturales del agua de mar y a corta distancia del punto de descarga esta diferencia ya es indetectable. Debido a que en este proceso el agua de mar pasa una sola vez por el sistema, el gas se enfriará aún más cuando pasa por el absorbedor. Generalmente, es necesario volver a calentar el gas antes de ser descargado a la atmósfera, para lo que se instala un intercambiador de calor. También se pueden utilizar chimeneas húmedas.

El sistema de desulfuración por agua de mar es, químicamente, bastante similar al sistema de desulfuración húmeda piedra caliza-yeso, con la excepción de que no utiliza ningún reactivo sólido y no es necesario realizar la colección o precipitación de sólidos. Por esto, el sistema exhibe un desempeño similar, y es capaz de alcanzar niveles de emisión exigentes en combustibles de bajo contenido de azufre. El proceso de desulfuración por agua de mar ha sido estudiado ampliamente y es aceptado como una tecnología exitosamente probada por agencias ambientales independientes, incluyendo la US EPA y la EU IPPC. Las autoridades en Escocia han aprobado el sistema de desulfuración por agua de mar y lo consideran como la mejor opción ambiental práctica (BPEO).

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## ✚ **Desulfuración húmeda piedra caliza / yeso**

Como su nombre lo indica, la desulfuración húmeda piedra caliza/yeso utiliza piedra caliza como reactivo para reaccionar con el  $SO_2$  del gas, produciendo yeso (sulfato de calcio bi-hidratado) como subproducto. (Ver Figura 22). La piedra caliza se encuentra fácilmente disponible en grandes cantidades en casi todas las locaciones y el yeso es ampliamente utilizado en la industria de la construcción en la forma de paneles de yeso (construcción seca) y en mezclas de cemento. En caso de que el yeso producido no pueda ser reutilizado o vendido en una locación en particular, el material se puede disponer en forma segura en un relleno sanitario.

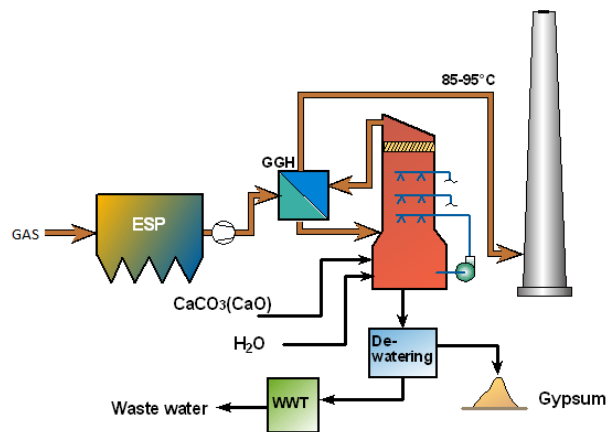


Figura 22.

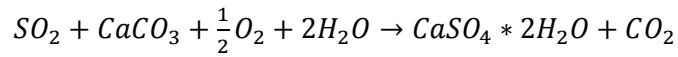
Las torres de atomización han demostrado ser la configuración óptima de absorbedor disponible para sistemas de desulfuración piedra caliza/yeso, debido a su confiabilidad, bajo potencial de formar depósitos de material, baja caída de presión y relación costo beneficio.

El gas ingresa en el absorbedor, donde se dirige hacia arriba, a través de varios niveles de atomización en contra corriente. El  $SO_2$  se absorben por el barro reactivo, que cae en la parte inferior del tanque, conocida como tanque de reacción. Es aquí donde las partículas pequeñas de piedra caliza se agregan para neutralizar y regenerar el barro. Se

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

inyecta también oxígeno en forma de aire comprimido para completar la reacción y formar el yeso:

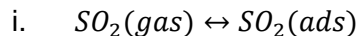


El barro de yeso se descarga del tanque de reacción hacia equipamiento de secado primario y secundario, donde el contenido de humedad se reduce al 8-10%. El yeso libre, como subproducto, puede entonces ser transportado a su destino final. Los sistemas de desulfuración piedra caliza/yeso son capaces de lograr importantes eficiencias de colección y producir yeso con alto grado de calidad en una manera económica.

### **Proceso con Carbón Activado**

Estos procesos en los que se utilizan carbones activados, fueron desarrollados por compañías como Reinluft GmbH o Bergbau-Forschung GmbH a principios de la década de los 70, para sistemas de regeneración térmica, y por Lurgi Gesellschaft fur Chemie and Huttenwesen GmbH e Hitachi Mfg. Co. Ltd. Para sistemas de regeneración por lavado con agua.

#### *Mecanismo de Reacción.*



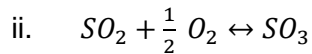
En los primeros estudios realizados por Siedlewski, se propuso que los sitios superficiales para la adsorción de  $SO_2$  podrían ser radicales libres existentes en el material carbonoso, ya que se observó que solo una pequeña parte del área superficial se utilizaba en la adsorción de  $SO_2$ , aunque finalmente se llegó a la conclusión de que además deberían participar otros sitios activos. En trabajos más recientes, se determinó la energía de adsorción de  $SO_2$  en fibras de carbón activadas, encontrándose, por un lado, que existía interacción entre el  $SO_2$  y los grupos oxigenados de la superficie carbonosa, pero que las energías correspondían a interacciones electrostáticas que ocasionan una adsorción reversible. De este modo, estos autores concluyen que la adsorción de  $SO_2$  consiste en una interacción dipolo permanente-dipolo inducido por el potencial existente entre las paredes de

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

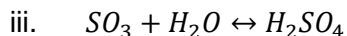
los poros, que da lugar a una estructura molecular ordenada del  $SO_2$  en el interior de esos poros y resultando energías de adsorción relativamente altas.

Sin embargo, cuando se encuentra que realmente se produce una adsorción tanto física o química, es cuando dicha adsorción se realiza a partir de mezclas gaseosas y, en algunos casos, vapor de agua.



En la reacción de transformación de  $SO_2$  a  $H_2SO_4$ , utilizando materiales carbonosos como catalizadores, después de la etapa de adsorción de  $SO_2$ , ocurre una etapa de oxidación del  $SO_2$  adsorbido a  $SO_3$ .

En todos los estudios realizados hasta la actualidad, también existen discrepancias notables con respecto a la reacción de oxidación de  $SO_2$  a  $SO_3$ , en particular, a lo que se refiere a la procedencia del oxígeno y a la forma en que este se encuentra para poder oxidar el  $SO_2$ . En algunos casos se supone, como se ha comentado anteriormente, que son los propios grupos oxigenados superficiales, los que oxidan al  $SO_2$ . Sin embargo, en la mayoría de los estudios, se proponen mecanismo tipo Langmuir-Hinselwood donde todas las especies se encuentran adsorbidas antes de la reacción. Así, partiendo de la base de que el  $SO_2$  se adsorbe en la superficie del carbón activado, se propone que el  $O_2$  también se adsorbe en la superficie. Existen distintas versiones sobre la manera en que el oxígeno está adsorbido, habiendo autores que proponen una adsorción molecular y otros que proponen una adsorción disociativa del oxígeno antes de reaccionar con el  $SO_2$  adsorbido.



Desde los primeros estudios se conoce que durante la reacción de oxidación de  $SO_2$ , únicamente en presencia de  $O_2$ , el carbón puede ser inhibido o envenenado hasta el punto de disminuir completamente su efectividad después de un determinado tiempo de reacción. Se encontró que este hecho es debido a la saturación de los sitios activos para la oxidación del  $SO_2$  por el producto de reacción ( $SO_3$ ). Así, debido a que el  $SO_3$  no adsorbe de manera espontánea a temperatura ambiente, llega un momento en que la reacción deja de progresar mientras no se produzca la regeneración de la superficie del carbón.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Sin embargo, el  $SO_3$  es fácilmente hidratable a  $H_2SO_4$ , por lo que una manera de regenerar los sitios activos, simultáneamente a la reacción de oxidación, es eliminar el  $SO_3$ , en forma de ácido sulfúrico utilizando un flujo de  $H_2O$ , ya sea en forma de vapor, como se encuentra en los gases de combustión, o en fase líquida para lo que se utilizan reactores que trabajan con el carbón en un lecho fijo o en lecho agitado. En todos los casos, se produce una elución del  $H_2SO_4$  formando haciendo que se regenere la superficie del carbón y se puede operar continuo.

#### *Proceso.*

El flujo de gas introducido por un lado del adsorbedor y sale por el lado opuesto, en el adsorbedor el dióxido de azufre es adsorbido en la superficie interior del carbón activado y es oxidado a ácido sulfúrico en la presencia de oxígeno y de vapor de agua.

El adsorbente es regenerado después de ser descargado desde el adsorbedor y es separado de las partículas por un colador vibrante. La regeneración es afectada térmicamente por el calentamiento de la carga de ácido sulfúrico adsorbido en una atmósfera inerte. Las condiciones de regeneración causan un cambio en la dirección en que se conducen las fuerzas de la reacción en este sistema. Los participantes antes de ser revertido de la reacción de adsorción reducen el ácido sulfúrico a dióxido de azufre y a dióxido de carbono debido a la acción del carbón fijado del adsorbente.

El gas que fluye de la regeneración contiene entre 20-30% de dióxido sulfuroso el cual puede ser convertido a azufre elemental.

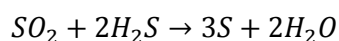
---

“Pre factibilidad técnica económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### **Proceso de Citrato de Sodio.**

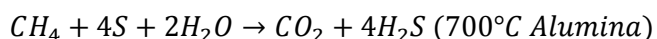
Del U.S. Bureau of Mines, es un proceso no usual en que con este absorbente resulta posible regenerar el efluente del absorbedor directamente a azufre elemental. Los gases de los hornos de fusión, con el 1 al 3% de dióxido de azufre y oxígeno libre se procesan como siguen:

1. Secado y eliminación de polvo; enfriamiento a 50°C.
2. Absorción en una solución tamponada de ácido cítrico (citrato de sodio) a pH 3,8 (a valores de pH superiores a 4 se acelera la conversión a sulfato).
3. Conversión Claus en fase líquida a azufre:



4. Eliminación del azufre de la solución de citrato por espesamiento/filtración y fusión.

Se genera el sulfuro de hidrógeno cuando se requiere, generalmente a partir de metano:



En los Estados Unidos funcionan con toda normalidad dos plantas piloto para evaluar esta tecnología. Puede, ser atractivo como un proceso auxiliar de uno en que resulta inevitable la producción de dióxido de azufre diluido que contiene oxígeno.

En base a distintos estudios, se extrajeron las siguientes conclusiones:

1. La recuperación de azufre como azufre elemental dependió de la concentración inicial del gas en la planta de reducción, pero se acercó al 85%, es decir, los gases residuales contenían del 1 al 2% de dióxido de azufre, equivalente a un horno reverbero.
2. La localización de la planta debe suministrar una fuente barata de un reductor adecuado, en los casos anteriores gas natural a 0,5 dólares EE.UU. por 100 pies cúbicos estándares (17,66 dólares EE.UU por 1000 m<sup>3</sup>).
3. Suponiendo que los subproductos (ácido o azufre) carecen de valor, los costes globales de operación directos por tonelada de cátodo 100000 tm por año) para el esquema de producción de azufre fueron del 15 al 20% superior a los ocasionados por la producción de ácido.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

4. La inversión de capital en las plantas que producen cobre-azufre fue del 15 al 20% mayor que en las plantas que elaboran cobre-ácido sulfúrico.
5. La diferencia de los costes de funcionamiento compensaría el transporte del ácido a largas distancias y debería hacerse todo lo posible para encontrar y desarrollar mercados en una amplia zona.
6. La producción y neutralización del ácido es más cara que la producción de azufre.
7. La previsión de un suministro de gas estacionario para reducir el dióxido de azufre es más importante que para la producción de ácido. El proceso de reducción está más íntimamente asociado con la operación de fusión, y con objeto de evitar dificultades de producción en la operación primaria (producción de cobre) se prefiere un complicado sistema de control (computador) para la planta de reducción.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



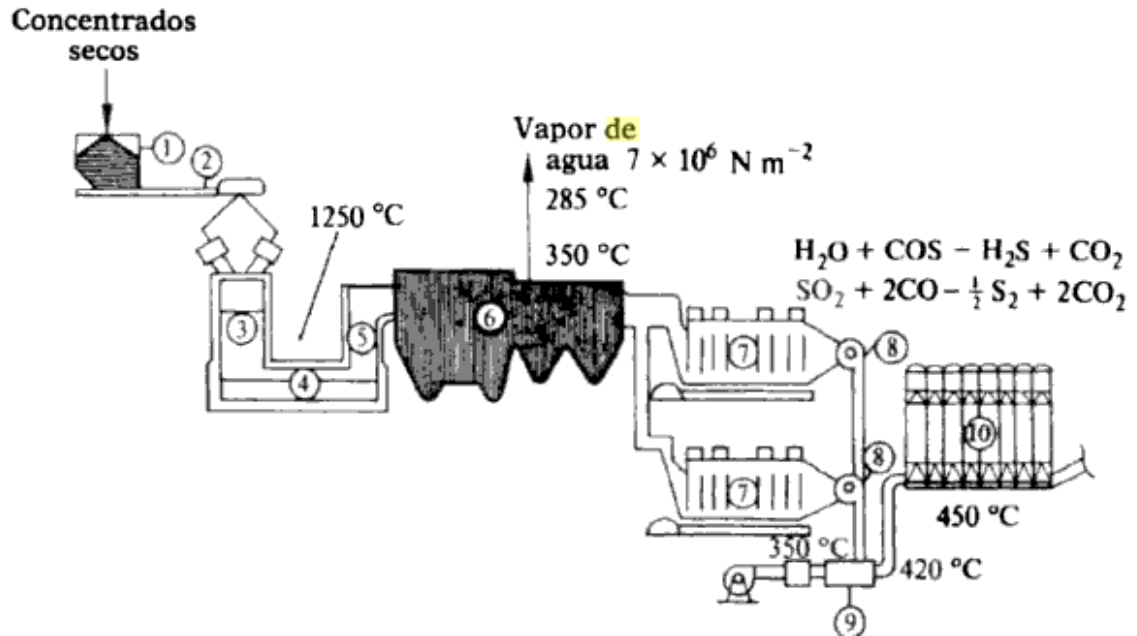


Figura 23. Proceso Citrato de Sodio (Conf. A).

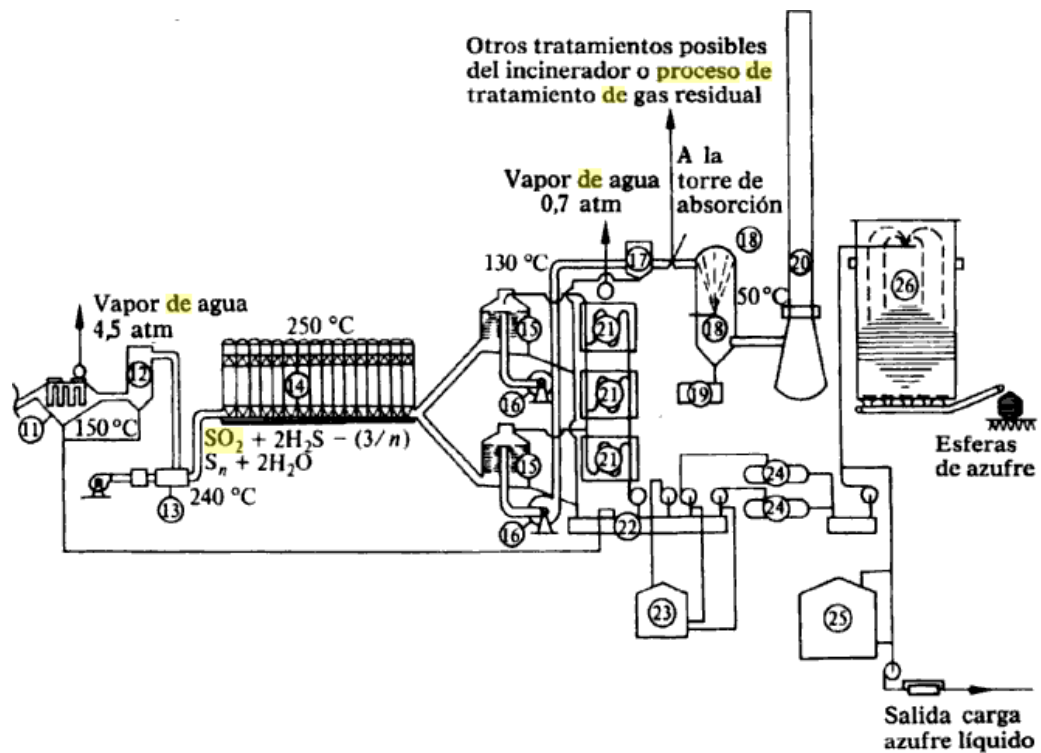


Figura 24. Proceso Citrato de Sodio (Conf. B)

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Proceso Outokumpu, figura 23, para la reducción directa de dióxido de azufre a elevadas temperaturas; (1) tolva de suministro al quemador; (2) cinta transportadora; (3) torre de reacción súbita; (4) sedimentador del horno de reacción súbita; (5) salida hacia arriba del horno de reacción súbita y cámara de reducción del  $SO_2$ ; (6) caldera de recuperación de calor; (7) precipitador electrostático; (8) ventilador de tiro inducido del gas caliente; (9) recalentador del gas por calefacción directa; (10) horno catalítico caliente; (11) caldera de refrigeración del gas; (12) eliminador de niebla; (13) recalentador del gas por calefacción directa; (14) horno catalítico frío; (15) torres de condensación irrigadas con azufre; (16) ventiladores de gas frío; (17) eliminador de nieblas; (18) torre de absorción irrigada con agua; (19) tanque de sedimentación; (20) chimenea; (21) calderas de refrigeración de azufre líquido; (22) sumidero de azufre; (23) tanque de circulación del azufre; (24) autoclaves de separación del arsénico; (25) tanque de almacenamiento del azufre; (26) torre de formulación de esferas. (Por gentileza de Outokumpu Oy, Finlandia.)

Vale la pena considerar la producción de azufre si no se encuentran mercados para el ácido, incluso a grandes distancias, y se mitiga el control del ambiente disminuyendo la cantidad de azufre que se ha de fijar. La incorporación del tratamiento del gas residual de la planta de azufre aumentaría los costes y, por tanto, el punto de ruptura con los costes del transporte del ácido. Un proceso de fusión del cobre que proporcionase una corriente gaseosa continua única, reduciría mucho el coste de la producción de azufre.

### **Proceso Dimetilanilina (DMA) Xilidina.**

Este proceso usa aminas aromáticas tales como n,n-dimetilamina o 2,3-dimetilamina (Xilidina).

Resulta económico para extraer  $SO_2$  a concentraciones mayores del 3,5% de los gases de escape de la fundición de minerales sulfurados. El  $SO_2$  se recupera en forma líquida y se utiliza en la producción de fertilizante.

También puede ser convertido en ácido sulfúrico o azufre elemental. El mercado de estos productos depende de la demanda local y de factores económicos. Por ejemplo, la

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

distancia que deben ser transportados y el método de transporte utilizado son factores importantes en el análisis económico. En general, el ácido sulfúrico tiene mayor mercado que el azufre elemental, y este último presenta ventajas económicas frente al  $SO_2$  líquido, dado su menor coste de transporte y almacenamiento (Kohl y Nielsen, 1997).

Dos son las etapas necesarias para la remoción del dióxido de azufre al utilizar este proceso. Estas son:

- Absorción del dióxido de azufre.
- Regeneración del dióxido de azufre.

La absorción ocurre en una torre de absorción compuesta en tres secciones. En la primera, se absorbe la mayor parte de dióxido de azufre con (DMA)/Xilidina, el dióxido de azufre remanente se absorbe en la segunda sección con carbonato de sodio. La tercera sección, lava el gas residual de la (DMA)/Xilidina por lavado con agua. La corriente de dióxido de azufre debe ser enfriada, antes de ser utilizada.

#### **Tecnología de irradiación con haces de electrones (ebds).**

Es una tecnología que nos permite remover simultáneamente el  $SO_2$  y los  $NO_x$ . Las centrales de demostración del Japón, Alemania, los Estados Unidos y Polonia han demostrado que la eficiencia total del sistema para la eliminación de  $SO_2$  suele exceder del 95%, y alcanza entre 80% y el 85% para la eliminación del  $NO_x$ .

La eliminación del  $NO_x$  requiere más energía que la del  $SO_2$ , y para reducir ese consumo de energía se han efectuado numerosos estudios sobre la técnica conocida como irradiación de zona. Para esos mismos fines se han realizado, y se siguen realizando actualmente pruebas cuyos resultados han demostrado que con la irradiación de zona se puede lograr ahorros de energía del 20 al 30%, lo que colocaría al sistema en una posición muy competitiva con otras tecnologías combinadas. Se continuara trabajando para reducir la cantidad de energía que requiere el sistema.

El proceso de haces de electrones que es, en esencia, un proceso de lavado en seco, elimina al mismo tiempo estos dos contaminante. Antes de pasar al enfriador por nebulización, el gas de combustión se limpia de cenizas volátiles mediante una técnica

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

estándar. A continuación el gas pasa por el enfriador por nebulización donde disminuye su temperatura, y aumenta la humedad con el agua de tratamiento. El gas pasa después por la cámara de tratamiento donde se irradia con haces de electrones de alta energía en presencia de una cantidad casi estequiométrica de amoníaco añadida al gas e combustión antes de llegar a la zona de irradiación. El  $SO_2$  y el  $NO_x$  se convierten en sus respectivos ácidos que se transforman posteriormente en sulfato de amonio y sulfato-nitrato de amonio. Estos ácidos se recuperan entonces con un precipitador electrostático. El subproducto es fertilizante útil que puede utilizarse en la agricultura. Los gases menos contaminantes son entonces liberados en la atmósfera

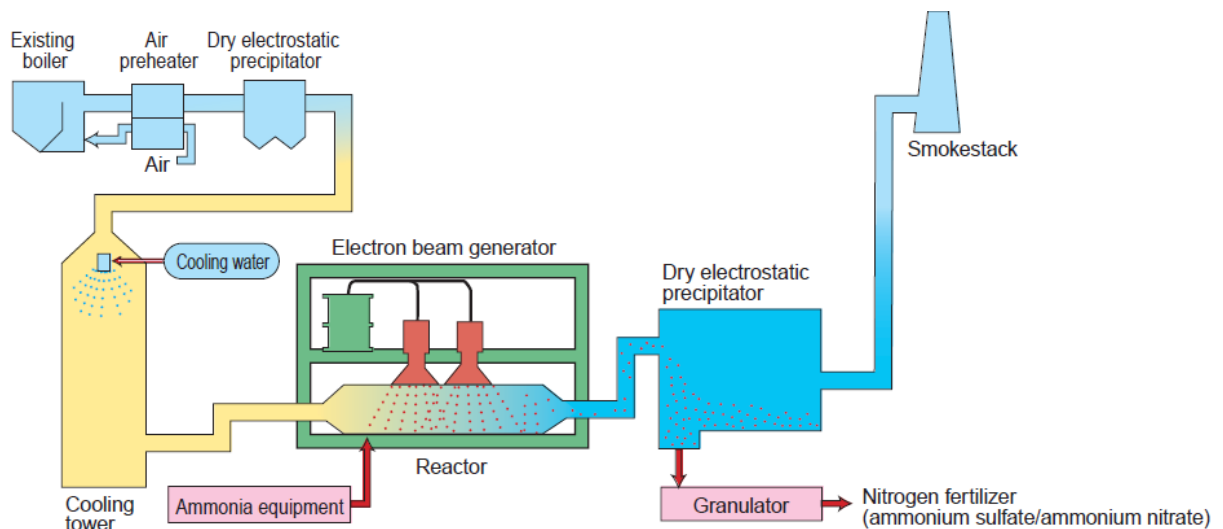


Figura 25. Sistema de Haces de Electrones.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

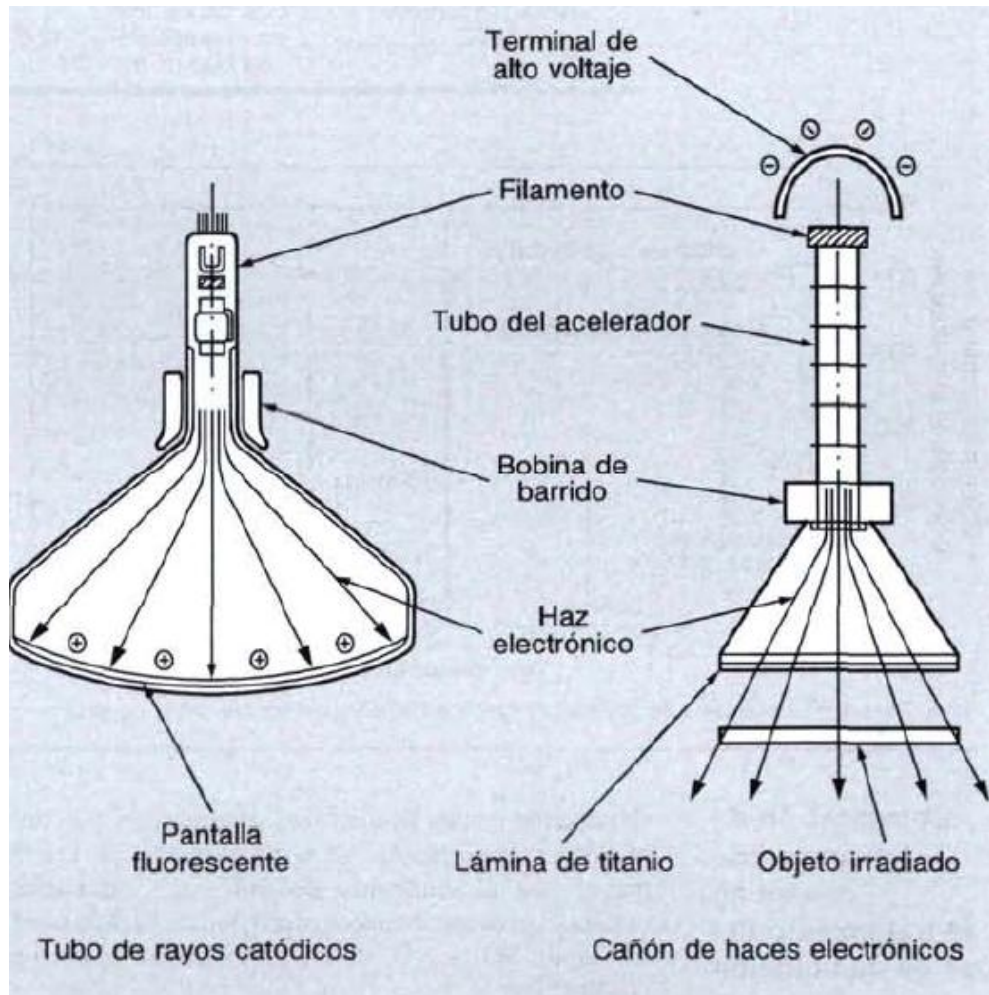


Figura 26.

El acelerador que crea el haz electrónico es un equipo muy conocido por muchas personas. Por ejemplo, uno de sus modelos se utiliza en todo el mundo: el aparato de televisión. El acelerador es sólo un tubo de rayos catódicos más potente.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## **Proceso por Zeolitas.**

Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos, que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimo de 3 a 10 angstroms.

Las zeolitas están compuesta por aluminio, silicio, sodio, hidrogeno y oxígeno. La estructura cristalina está basada en las tres direcciones de la red con  $SiO_4$  en forma tetraédrica con sus cuatro oxígenos compartidos con los tetraedros adyacentes. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.

Las principales características de las zeolitas son:

- Alto grado de hidratación.
- Baja densidad y un gran volumen de vacíos cuando se deshidrata.
- Estabilidad de sus estructuras cristalina cuando se deshidrata.
- Propiedades de intercambio catiónico.
- Habilidad de absorber gases y vapores.
- Propiedades catalíticas.

Las zeolitas cristalinas son los únicos minerales adsorbentes, los grandes canales centrales de entrada y las cavidades de las zeolitas se llenan de moléculas de agua que forman las esferas de hidratación alrededor de dos cationes cambiables. Si el agua es eliminada y las moléculas tienen diámetros seccionales suficientemente pequeños para que estas pasen a través de los canales de entrada entonces son fácilmente adsorbidos en los canales deshidratados y cavidades centrales. Las moléculas demasiado grande pasan dentro de las cavidades centrales y se excluyen dando origen a la propiedad de tamiz molecular una propiedad de las zeolitas.

Se ha encontrado que la capacidad de la zeolita de adsorber los óxidos de azufre aumenta con el aumento de contenido de sodio en la zeolita. Una zeolita con un alto contenido de la silicona también se prefiere para disuadir la degradación acida. En detalle, las zeolitas usadas pueden ser la modernita, la chabazita, la clinoptilolita o la zeolita sintética X.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

 **Tabla comparativa.**

<b>Tecnología para abatir <i>SO<sub>2</sub></i></b>	<b>Principal Costo de Operación</b>	<b>Subproductos</b>
a. <i>Desulfuración semi-seca.</i>	CaO	
b. <i>Desulfuración por agua de mar</i>	Agua de mar	Se devuelve al mar
c. <i>Desulfuración húmeda piedra caliza / yeso</i>	Caliza/Yeso	Yeso
d. Proceso con Carbón Activado	Carbón Activado	Azufre elemental
e. Proceso de Citrato de Sodio.	Citrato de Sodio	Azufre elemental o liquido
f. Proceso Dimetilanilina (DMA) Xilidina.	Dimetilanilina	Azufre elemental o liquido
g. Tecnología de irradiación con haces de electrones (ebds).	Energía y Amoniacó	Fertilizante  Azufre elemental o liquido

Tabla II. Resumen de tecnologías propuestas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## V. Criterio Selección de Tecnología.

A continuación se llevará a cabo una tabla comparativa, con las distintas tecnologías mencionadas a lo largo de esta memoria. Dicha tabla nos ayudará a tomar decisiones sobre que tecnología ocupar.

Donde:

A= Desulfuración Semi-Seca

B= Desulfuración por agua de mar

C= Desulfuración húmeda piedra caliza / yeso

D= Carbón Activado

E= Proceso de Citrato de Sodio

F= Dimetilanilina (DMA) Xilidina

G= Tecnología de irradiación con haces de electrones (ebds).

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Factores Técnicos	Tecnología para abatir $SO_2$						
	A	B	C	D	E	F	G
Controles especiales	-Contacto entre gas y polvo libre (alcalino-humedecido) -Gas pre limpiado de partículas. -Polvo fácilmente dispersable. -Agregar Cal fresca, estequiometricamente con los gases ácidos. -Adición de agua se controla con temperatura a la salida del colector.	-Adición de agua de mar fresca para tratamiento control de pH antes de descarga al mar.  -En algunas ocasiones el gas se enfría demasiado por los absorbedores. Generalmente, es necesario volver a calentar el gas antes de ser descargado a la Atmosfera.	-No se menciona.	-No se menciona.	-Secado y eliminación de polvo; enfriamiento a 50°C. -Absorción en una solución tamponada de ácido cítrico a pH 3,8. -Eliminación azufre, de solución citrato por espesamiento, filtración y fusión.	-No se menciona.	-No se menciona.
Rendimiento	-Alcanza una remoción de 90-95% de $SO_2$ en un amplio rango de niveles de azufre.	-Alcanza una remoción de 95% de $SO_2$ para bajas concentraciones de azufre.	-Alcanza una remoción de 98% de $SO_2$ .	-Alcanza una remoción de 80% de $SO_2$ .	-Alcanza una remoción de 85% de $SO_2$ .	-No se menciona	-95% de captura
Complejidad Operación	-Simple, con bajo costo y excelente desempeño.	-Simple.	-Media	-Media	-Media	-Simple	-Simple
Sistemas auxiliares	-Filtro de Mangas. -Precipitador Electrostático.	-No	-No	-No	-Sí	-Sí	-No

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Peligros de contaminación	-Por falla de humedecimiento se puede producir atomización de barros. -Liberación de Polvos.	-Liberación de agua sin tratar al mar.	-Posible contaminación con Yeso.	-No se menciona	-No se menciona	-No se menciona	-No se menciona
Posibilidades de futuros desarrollos	-Posible, proceso innovador.	-Se implementa en plantas Termoeléctricas	-Se implementa en plantas Termoeléctricas	-Se están realizando estudios en laboratorios.	-Se están realizando estudios en laboratorios	-Se están realizando estudios	-Se están realizando estudios. Alrededor de todo el mundo
Conocimiento previo de la Tecnología	-Existen muchos estudios sobre desulfuración en seco y otros procesos secos de limpieza de gases.	-Se tiene muchos estudios sobre abatimiento de $SO_2$ por agua de mar.	-Se tiene muchos estudios sobre abatimiento de $SO_2$ por este método	-Se tiene muchos estudios sobre abatimiento de $SO_2$ por este método	-Tecnología innovadora	-No se menciona	-Se ha estado desarrollando desde la época de los 80.
Requerimientos de Puesta en Marcha	-Flujo de $SO_2$ y $Ca(OH)_2$ . -Control de Humedad. -Flujo de Cal reactiva fresca.	-Flujo continuo de Agua de mar. -Control de pH. -Control de Temperatura.	Absorbedores torres de atomización.	-Enfriamiento a $50^{\circ}C$ -pH 3,8	-No se menciona	-No se menciona	-Fuente de Poder

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Materias Primas	Tecnología para abatir $SO_2$						
	A	B	C	D	E	F	G
Disponibilidad presente y futura	-La Cal viva se encuentra presente en la naturaleza. Su futuro es seguro. -En Chile es principalmente comercializado por Inacesa.	-El Agua de Mar siempre va a estar presente	-La piedra caliza se encuentra fácilmente disponible en grandes cantidades	-No hay dificultad en obtener carbón activado	-Sí. No es difícil de conseguir el Citrato de Sodio	-No se menciona	-No se posee Amoniaco en Chile, por lo que hay que importarlo
Procesamiento Requerido	-El $SO_2$ , requiere una limpieza previa, ya sea con filtros de manga o precipitadores electrostáticos. -La Cal viene lista para utilizar. -El $Ca(OH)_2$ se forma con agua la cual esta previamente controlada.	-El $SO_2$ , requiere una limpieza previa, ya sea con filtros de manga o precipitadores electrostáticos. -Temperatura del agua de mar y su pH.	-El $SO_2$ , requiere una limpieza previa, ya sea con filtros de manga o precipitadores electrostáticos.	-Igual que C	-Igual que C	-Igual que C	-Igual que C
Requerimientos de Almacenamiento	-Debe permanecer seca, lejos de la humedad, vapor o ácidos. -Silos de acero y barras cerradas herméticas.	-No es necesario, puesto que el agua de mar se toma directo de la fuente.	-Se puede almacenar sin grandes complicaciones, pero tiene que estar en un medio aireado.	-Puede ser almacenado de manera segura en cualquier área o lejos de fuentes directas de calor.	-Recipientes bien cerrados. -Ambiente seco. Temperatura ambiente.	-Evitar contacto con agentes oxidantes; ácidos fuertes; metales; cloruros; cloroformatos; y halógenos porque se producen reacciones	-Lugar al aire libre protegido del sol o en un edificio aparte preferiblemente. -Si se almacena en el interior de un edificio, éste debe ser un lugar

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

						<p>violentas.</p> <p>-Tienen que estar en recipientes bien cerrados, en un área fría, bien ventilada.</p>	<p>fresco, seco, bien ventilado, construido con materiales no combustibles y situado lo más lejos posible de fuentes de combustión potenciales.</p> <p>-Separe el material de otros productos químicos, fundamentalmente , de gases oxidantes, cloro, bromo, yodo u ácidos.</p> <p>-Tiene que ser contenidos bajo presión.</p>
<p>Problemas de Manipulación de materiales</p>	<p>-La Cal, puede provocar quemaduras químicas, especialmente en los ojos, pues la reacción con Cal y la composición química de las lágrimas, provoca</p>	<p>-El <math>SO_2</math>, es altamente tóxico, el uso de máscaras es obligatorio, además de protección a los ojos.</p>	<p>-Riesgo para la salud es el polvo de piedra caliza transportado en el aire, de sílice libre en proporción del 1 al 10% de la roca caliza.</p> <p>-En estudios</p>	<p>-Si se inhala el polvo del carbón activado, es posible leve irritación del tracto respiratorio debida a la acción secante y abrasiva del polvo.</p>	<p>-Sin indicaciones particulares.</p>	<p>-Fuentes de ignición, tales como el fumar y llamas al aire libre, están prohibidas donde se usa, o maneja la Dimetilanilina, o donde se la almacena de una</p>	<p>-El uso de equipos anti-explosivos es recomendado y en algunos casos requeridos.</p> <p>-Hay que utilizar respiratorio adecuada.</p> <p>-Es esencial facilitar el escape</p>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

	<p>una quemadura instantánea que lleva a perder la visión, si no es tratada a tiempo.</p>		<p>realizados con trabajadores de canteras y tratamiento de piedra caliza, los exámenes radiográficos revelaron cambios pulmonares, y la exploración clínica indicó la existencia de faringitis, bronquitis y enfisema.</p>			<p>manera que pudiera crear posible incendio o un peligro de explosión. -Vestimenta. Evite el contacto de la piel con la Dimetilanilina. Use ropa y guantes anti-disolventes. Protección de los ojos. Usar gafas con ventilación indirecta. Escudo de protección de la cara al trabajar. No se debe usar lentes de contacto. Debe usarse protección respiratoria.</p>	<p>del gas localmente. -Ropa protectora. -Protección a los ojos. -Es extremadamente tóxico para los peces y para la vida acuática. -El amoníaco es un fertilizante que puede promover la eutrofización (alto en nutrientes, bajo en oxígeno) de los canales de agua.</p>
--	---	--	---	--	--	---	--

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Productos de Desecho y Subproductos	Tecnología para abatir SO <sub>2</sub>						
	A	B	C	D	E	F	G
Valor económico	-Desechos, hay que pagar para que se los lleven	-Tiene un Valor comercial, puesto que el Sulfato se puede vender.	-Tiene un Valor comercial, puesto que el Yeso se puede vender.	-Tiene un Valor comercial, puesto que el ácido sulfúrico se puede vender.	-Tiene un Valor comercial, puesto que el azufre elemental se puede vender.	-Tiene un Valor comercial.	-Tiene un Valor comercial.
Manera de Eliminarlos	-Empresa Externa se encargará de transportarlos a algún lugar donde sean tratados o se puedan depositar sin afectar al entorno que lo rodea.	-El agua de mar ya utilizada, después de un proceso se devuelve al mar	-El material se puede disponer en forma segura en un relleno sanitario	-Posibles polvos que se capturen, depositarlos en un contenedor.	-No se menciona	-No se menciona	-No se menciona
Aspectos de Contaminación	-Genera productos que contaminan en un nivel intermedio	-No se ven con claridad. Dicho tratamiento del agua de mar utilizada, no afectaría al entorno.	-Polvos liberados pueden afectar a los suelos. -En el secado del yeso, también se libera mucho particulado al medio ambiente, además de los gases de combustión.	-No se menciona	-Agua de Riles.	-No se menciona	-No se menciona

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Equipos	Tecnología para abatir SO <sub>2</sub>						
	A	B	C	D	E	F	G
Disponibilidad	-Existen, debido que son equipos muy comunes	-Si existen, debido que son equipos muy comunes.	-Existe.	-Existe.	-Existe.	-Existe.	-Existe.
Materiales de Construcción	-Equipos tienen que ser resistentes a la corrosión	-Equipos tienen que ser resistentes a la corrosión de los gases de fundición. -Equipos que estén sumergidos bajo el agua de mar, tienen que recibir un tratamiento anti corrosivo, ya sea protegiéndolos con pinturas o con electricidad.	-Equipos tienen que ser resistentes a la corrosión de los gases de fundición.	-Igual que C	-Igual que C	-Igual que C	-Igual que C
Costo de Instalaciones y mantenimiento	-Económico debido que la instalación es simple y tiene requerimientos mínimos de espacio. -El mantenimiento también es simple.	-De mediana complejidad es la instalación de los equipos. -El mantenimiento está dirigido principalmente a la corrosión.	-Igual que B	-Igual que B	-De 15 a 20% más que una planta de ácido sulfúrico.	-No se menciona.	-Media, por ser tecnología novedosa.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Localización de la Planta	Tecnología para abatir $SO_2$						
	A	B	C	D	E	F	G
Cantidad de terreno requerido	-Mínimo	-Extenso, puesto que hay que traer el agua de mar desde el litoral hasta la planta	-Media	-Media	-Media	-Media	-Bajo.
Proximidad a los suministros de materias primas	- Relativamente, ubicadas en Santiago	-Sí.	-Sí.				- Relativamente, ubicadas en Santiago

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



## 5.1 Tabla de Selección.

Como una primera instancia, se va a elegir tres tecnologías que resalten más sobre el resto. Ya sea por su capacidad de captura, su complejidad operacional, su costo de materia prima, etc. Estas tecnologías elegidas, se profundizarán aún más, con costos relativos de sus equipos, cantidad de energía a consumir, espacio físico a ocupar, etc. Para finalmente así poder optar por una tecnología definitiva, la cual usaremos para tratar los gases fugitivos.

Esta tabla, va a contener 3 niveles de criterio: Alto el cual llevará el número 3, Medio llevará el número 2 y Bajo que llevará el número 1. Hay que tener presente que en algunos casos el criterio de calificación va a ir variando, puesto que para algunos casos un 3 va a ser algo muy bueno y para otros va a ser algo muy malo. Para que no halla confusión en este punto, la tabla finalmente va a tener un gráfico, el cual separa claramente los puntos buenos y malos de cada tecnología.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

<b>FACTORES</b>		<b>Desulfuración Semi-Seca.</b>	<b>Desulfuración por agua de mar</b>	<b>Desulfuración húmeda piedra caliza / yeso</b>	<b>Proceso con Carbón Activado</b>	<b>Proceso de Citrato de Sodio</b>	<b>Proceso Dimetilamina (DMA) Xilidina</b>	<b>Tecnología de irradiación con haces de electrones (ebds)</b>	<b>Proceso por Zeolitas</b>
<b>Factores Técnicos</b>	Flexibilidad del Proceso	Sí	Sí	Sí	No	Sí.	Sí.	Sí.	Sí.
	Requerimientos de controles especiales.	2	2	2	1	2	1	1	1
	Rendimiento	90-95%	95%	98%	80%	85%	(-)	95%	(-)
	Complejidad Operacional.	1	1	2	2	2	1	1	1
	Requerimientos de sistemas auxiliares.	1	1	1	1	2	2	1	1
	Peligros de Contaminación.	2	2	2	1	1	2	1	2
	Posibilidades de futuros desarrollos.	2	2	2	2	2	2	2	1
	Conocimiento previo de la tecnología.	3	3	3	3	1	1	3	1
	Obsolescencia.	1	1	1	2	1	1	1	1

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

	Requerimientos de puesta en marcha.	2	2	2	1	1	1	2	2
<b>Materias Primas.</b>	Disponibilidad presente y futura.	2	3	3	3	3	2	1	3
	Procesamiento Requerido.	2	1	1	1	1	1	1	1
	Requerimientos de Almacenamiento	2	1	1	1	1	2	2	2
	Problemas de Manipulación de Materiales.	3	1	2	1	1	3	3	2
<b>Productos de Desecho y Subproductos.</b>	Valor económico.	1	2	2	2	2	2	3	2
	Mercados potenciales y usos.	1	3	2	3	3	3	3	2
	Manera de eliminarlos.	1	2	1	1	2	2	1	1
	Aspectos de contaminación.	2	1	2	2	1	1	1	1
<b>Equipos.</b>	Disponibilidad	3	3	3	3	3	3	2	3

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

	Materiales de construcción.	2	3	2	2	2	2	2	2
	Costos de instalación y mantenimiento	1	3	2	2	3	2	2	3
	Diseño especiales.	1	1	2	1	1	1	1	1
<b>Localización de la Planta.</b>	Cantidad de terreno requerido.	1	3	2	2	2	2	1	2
	Proximidad a suministros de materias primas.	2	3	3	3	2	2	1	2
<b>Costos.</b>	De materias primas	(-)	1	2	(-)	(-)	(-)	3	(-)
<b>Factor de Tiempo.</b>	Tiempo de fabricación equipos especiales.	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Consideraciones de proceso.</b>	Materia Prima común con otros procesos.	1	2	2	2	2	1	2	1
	<b>Promedios Factores Positivos.</b>	<b>1,88</b>	<b>2,63</b>	<b>2,38</b>	<b>2,5</b>	<b>2,25</b>	<b>2,13</b>	<b>2</b>	<b>1,88</b>
	<b>Promedios Factores Negativos.</b>	<b>1,56</b>	<b>1,63</b>	<b>1,69</b>	<b>1,44</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	<b>1,44</b>	<b>1,50</b>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

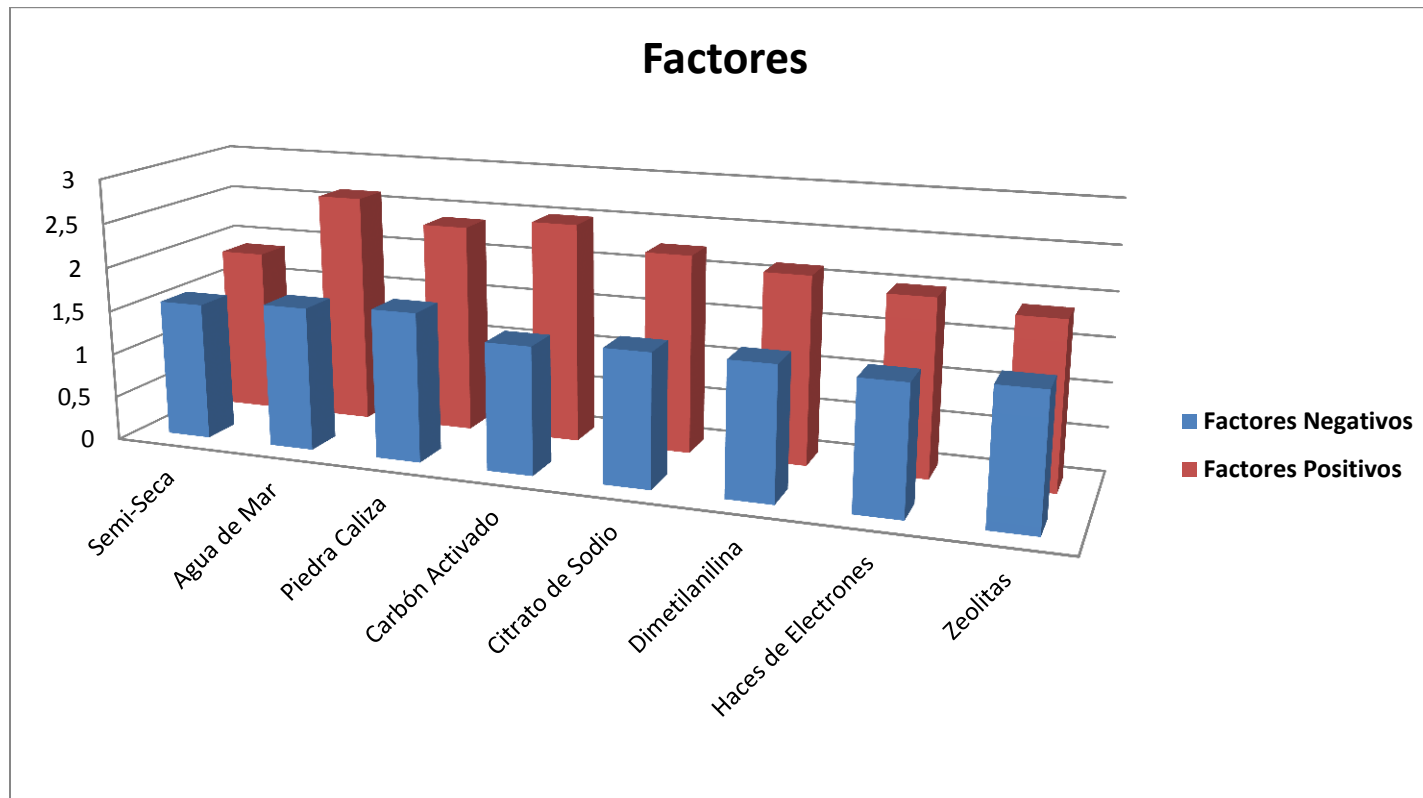


Figura 27. Gráfica comparativa de Factores.

## **Tecnologías Seleccionadas.**

A continuación, se presentarán las tres tecnologías seleccionadas. Tratando de profundizar de igual manera en cada una de ellas.

➤ **Desulfuración Por Agua de Mar.**

- Planteamiento de Diseño.

Debido que la materia prima a usar es agua de mar, se tiene que idear una forma de captura y descarga de ésta, sin comprometer el Medio Ambiente. Estas serían:

Captación de agua de mar con estructura tipo sifón y túnel de aducción excavado en arena hacia la planta.

Descarga de agua de mar con tubería enterrada en el sector terrestre y sobre muelle en sector marino.

En la captación de agua de mar tiene que estar provista de sistemas de reja fija y móvil que evite la entrada de objetos sólidos a la Planta.

Se va a producir una conducción gravitacional por el túnel de sección rectangular con 4 m de ancho y 3,5 m de alto, hasta el pozo de bombeo.

El pozo va a estar provisto de bombas, las cuales van a conducir el agua de mar hacia la planta de desulfuración.

Las aguas provenientes de la desulfuración serán conducidas hacia un sistema de tratamiento, el cual corresponde a una piscina de aeración y control de pH. Además esta piscina tiene que recibir agua de mar adicional requerida para el proceso, para contribuir con los carbonatos y bicarbonatos naturales presentes en el agua de mar. Solamente sí los gases tienen un alto contenido de dióxido de azufre.

El agua adicional va a ser bombeada desde una cámara de carga conectada con el túnel de agua de mar.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Después del tratamiento de las aguas, se descargan a un pozo de descarga el cual estaría ubicado a los pies de la piscina, desde donde se evacuarán las aguas por medio de tuberías, a nivel basal, aproximadamente a la cota 17 m para descargar a nivel submarino a la cota – 5 m.

Se va a necesitar un absorbedor consistente en un reactor cilíndrico vertical, en donde el agua de mar es inyectada en forma de lluvia atomizada en su parte superior; los gases ingresan en la parte inferior recorriendo verticalmente el absorbedor en contraflujo con la lluvia de agua de mar. Los gases limpios y enfriados por el agua de mar descargan por la parte superior del reactor hacia la chimenea.

Como forma opcional, para no liberar sulfatos al agua de mar, sería extraerlos, para luego comercializarlos.

- Análisis Técnico.

Como se había mencionado anterior mente el método es flexible y tiene una operación continua, la cual permite operar de forma normal, sin necesidad de parar, producto de altos niveles de contaminación.

Es de operación simple, por lo que hay que controlar pocos factores. Lo bueno que posee esta tecnología, es que aprovecha la alcalinidad del agua de mar para obtener rendimientos de 95% en la remoción del dióxido de azufre. No hay que adicionar ningún otro reactivo.

La localización de la planta se encontraría inmediatamente al lado del patio de fundición, para así evitar fugas de los gases a tratar. Además que en ventanas ya se posee un terreno disponible, cerca del patio de fundición. Por lo que el costo de cañerías y ductos se vería altamente reducido.

Lo negativo, sería el extenso trabajo de terreno, para instalar los túneles que traen las aguas de mar y los contenedores donde finalmente van a ser depositadas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

➤ Desulfuración Húmeda Piedra Caliza

- Planteamiento de Diseño.

Cañería encargada de llevar la corriente gaseosa de dióxido de azufre, pre limpiada.

Torre de atomización, donde ocurrirá el proceso.

Otras dos líneas las cuales llevarán, piedra caliza para que ocurra la reacción y agua adicionada el proceso.

Un tanque de reacción.

Línea que inyecte Oxígeno.

Planta de Secado

- Análisis Técnico.

Al ser un proceso de funcionamiento continuo, nos permite trabajar las 24 horas del día, sin afectar la producción de cobre.

Este proceso tiene un muy buen rendimiento en la remoción de Dióxido de Azufre, alrededor de un 98%, sin embargo su materia prima la piedra caliza, junto con el agua de mar más el gas a tratar generan como subproducto yeso. El cual si no se tiene una buena operación podría crear una gran complicación, puesto que este se podría solidificar y sería complicado de remover, interrumpiendo el normal funcionamiento de la planta. Para impedir que esto ocurra, es que se agrega una planta de secado, la cual está encargada de extraer el yeso sin mayores dificultades.

Una consideración extra que hay que tener en esta operación, es el riesgo que existe para la salud en relación con la presencia de polvo proveniente de la piedra caliza, el cual es fácilmente transportado en el aire, la sílice libre alrededor de un 1 al 10% puede provocar cambios pulmonares, pudiendo provocar faringitis, bronquitis y enfisema.

Como se mencionaba previamente un subproducto de este proceso, es la fabricación de yeso, el cual se puede comercializar sin mayores problemas.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



➤ Tecnología de irradiación con haces de electrones.

- Alternativas de Diseño.

Línea por la cual viaja el dióxido de azufre limpio y enfriado a la temperatura requerida.

Esta línea de gas, se encontrará en la cámara de irradiación.

Los electrones alimentados a la cámara de irradiación, serán alimentados por los aceleradores EB.

Una tercera línea, se dirigirá a la cámara de irradiación, dicha línea va a contener el amoniaco necesario para que ocurra la reacción.

El amoniaco es almacenado en un estanque el cual posee un sistema de bomba para ser inyectado al momento que se le necesite.

Posteriormente, abra una línea de salida de la cámara de irradiación, la cual pasará por otro equipo que espese el fertilizante en el ambiente, y el gas limpio se dirige a la chimenea.

Depósito donde se junta el fertilizante producido.

- Análisis Técnico.

Es un proceso el cual también posee una operación continua, sin provocar la interrupción del proceso del cobre. Lo bueno de esta tecnología es limpia. Puesto que no ocupa de materia prima otros elementos, como los mencionados anteriormente y tampoco entrega desechos. Por lo que su operación es bastante simple. Además que su porcentaje de captura es de un 95% y se ve beneficiado, a medida que la concentración de óxido de azufre aumenta.

Uno de los grandes problemas que contiene esta tecnología es para realizar la reacción química:

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

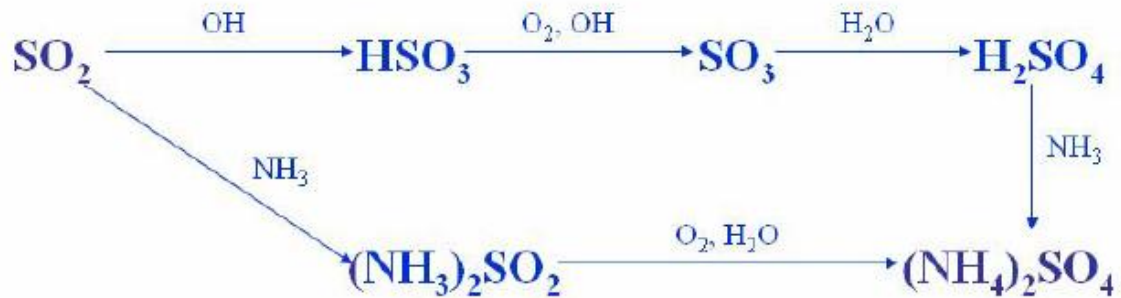


Figura 28. Reacción Química para la irradiación con haces de electrones con amoníaco y dióxido de azufre.

Uno debe de poseer Amoníaco, el cual en Chile no tenemos e importarlo es muy caro, en comparación con otras materias primas de distintas tecnologías.

También una de las consideraciones a tomar, es debido que el amoníaco es un elemento altamente explosivo, por lo cual hay que tomar las normas de seguridad apropiadas.

Sin embargo como lo demuestra la reacción, el subproducto obtenido de esta tecnología es fertilizante, el cual se puede comercializar sin problemas.

 **Comparación de Alternativas:**

<b>Alternativa / Tecnología.</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Observaciones</b>
Desulfuración Por Agua de Mar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Materia Prima de Fácil acceso.</li> <li>-Operación Simple.</li> <li>-No requiere de reactivos extras.</li> <li>-No genera un peligro la manipulación de materia prima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Extenso trabajo de terreno, para la carga y descarga de agua de mar.</li> <li>-Gasto constante en la lucha contra la corrosión.</li> <li>-Se requiere gran terreno para el funcionamiento de toda la planta.</li> <li>-Velar por no contaminar el Mar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Permite remover el 95% del Dióxido de Azufre presente. Sin embargo esto sucede a bajas concentraciones.</li> </ul>
Desulfuración Húmeda Piedra Caliza.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se puede Obtener Yeso Comercial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El barro usado en el proceso, puede traer complicaciones en la operación.</li> <li>-Se tiene que instalar un Secador, para lograr obtener Yeso.</li> <li>-Complicaciones en la Salud trae el tratar con la Piedra Caliza, debido al polvo.</li> <li>-Polvo Generado por el Yeso, perjudica en la fertilidad de los suelos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se puede obtener una eficiencia del 98% en la remoción de dióxido de azufre.</li> </ul>
Tecnología de Irradiación con haces de electrones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tecnología limpia.</li> <li>-Se obtiene como subproducto fertilizante.</li> <li>-Fácil operación.</li> <li>-Requiere de poco Terreno, para instalar la planta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El amoniaco, utilizado en el proceso, no existe en Chile. Importarlo sale muy caro.</li> <li>-El amoniaco, es un gas altamente explosivo, tiene que ser almacenado con mucha seguridad.</li> <li>-Gas Venenoso 2, no se puede inhalar, no se puede tener contacto directo con la piel y puede provocar ceguera transitoria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendimiento de un 95% en la remoción de dióxido de azufre. Sin embargo mejora su eficiencia a medida que la concentración del gas aumenta.</li> </ul>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Finalmente, se optó por la Tecnología de Agua de Mar. A pesar de sus puntos negativos, nos entrega una gran ventaja al tener la Materia Prima extremadamente cerca de la Operación y su bajo costo.

## VI. PROGRAMACIÓN

### 6.1 Excel.

#### **Definición.**

Microsoft Excel es una aplicación para manejar hojas de cálculo. Este programa es desarrollado y distribuido por Microsoft, y es utilizado normalmente en tareas financieras y contables.

#### **Trabajo realizado.**

Debido que Excel es una herramienta poderosa, en la cual es posible manejar múltiples hojas de cálculos, se decidió realizar el proceso completo de Fundición. Partiendo desde la mezcla de concentrados húmedos. Hasta llegar a la Etapa previa a Refino a Fuego, puesto que es la zona de mayor liberación de Dióxido de Azufre.

A continuación, se mostrará detalladamente el proceso realizado en Excel. El cual nos va a permitir, realizar cambios en la alimentación del proceso, cambiando variable y de forma automática obtener los resultados deseados.

El trabajo realizado, cuenta principalmente de tres partes: Diagrama del Proceso de Fundición, Captura y Limpieza de Gases y finalmente Sistema Tratamiento de gases.

#### a. Diagrama del Proceso de Fundición.

Como se muestra en la imagen, se parte desde la base que los concentrados provenientes de distintas mineras, ya a sido mezclado. Sin embargo, este se encuentra húmedo, muy parecido a la consistencia que se podría encontrar con la arena de playa. Esto

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

se produce principalmente ya que el concentrado de Cobre es de fácil combustión. De esta manera se mantiene disminuido el riesgo de ignición.

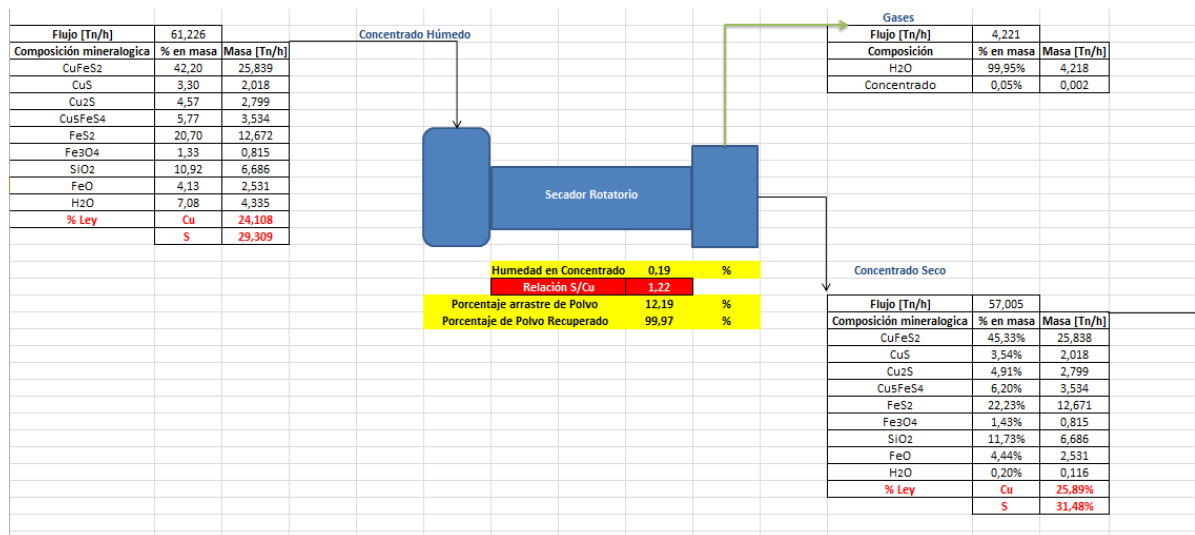


Figura 29. Secador Rotatorio.

Como señala la Figura, y mencionado con anterioridad. El proceso se inicia con el secado del concentrado. En donde la gente de Operación, tiene que tener presente siempre 4 factores primordiales: Humedad Concentrado de Cobre a la Salida, Relación Azufre-Cobre (importante para la etapa del Convertidor Teniente o Horno Flash, puesto que el azufre nos ayuda a mantener el proceso autónomo, sin la necesidad de agregar calor extra), Porcentaje de arrastre de Polvo y Porcentaje de Polvo recuperado.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

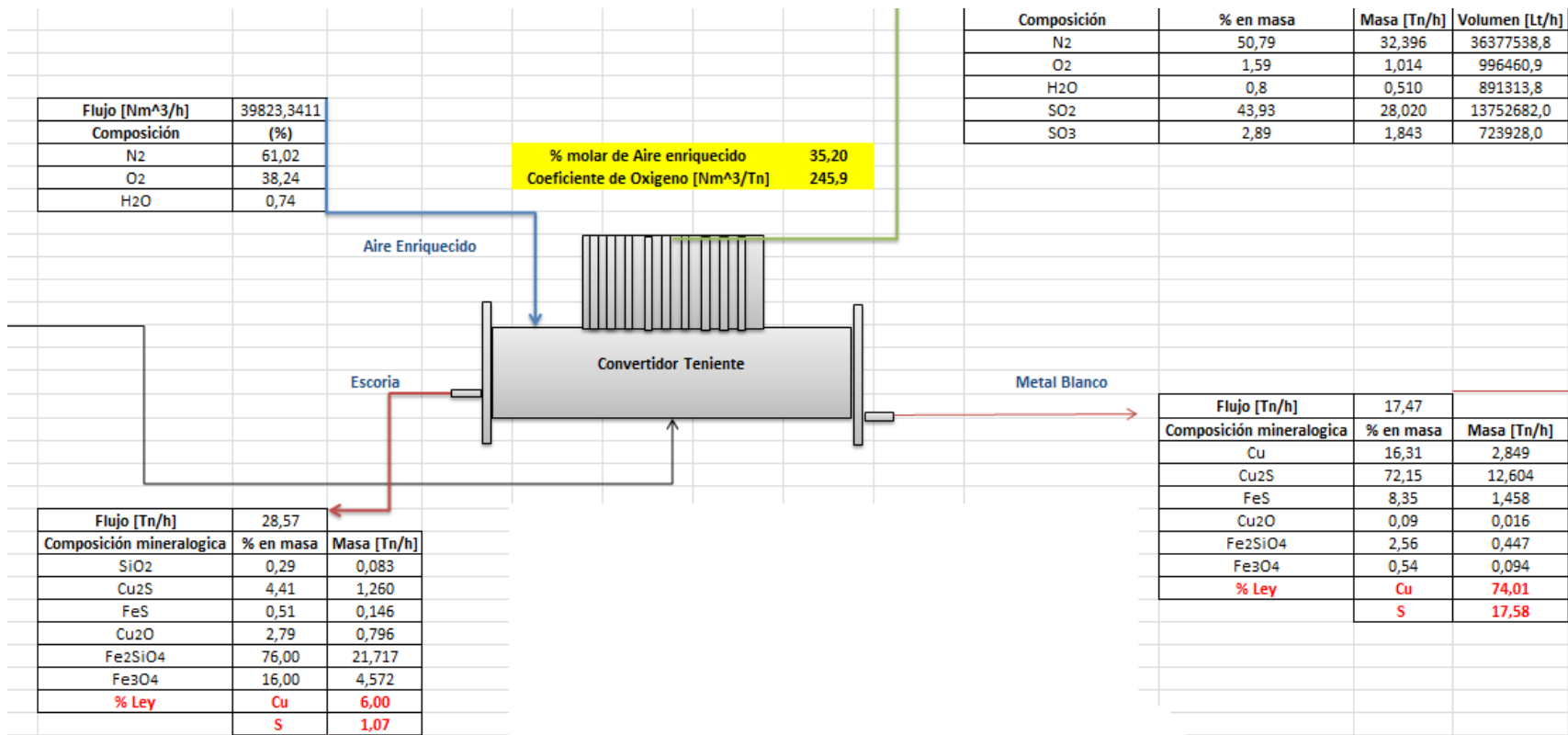


Figura 30. Convertidor Teniente.

Una vez que el concentrado seco abandona el secador rotatorio, a través de presión, es conducido hasta el Convertidor Teniente, donde se lleva a cabo la primera fundición.

Para asegurar que se logre una reacción semi-autógena y que sus respectivas reacciones químicas se lleven a cabo, es importante tener un flujo constante de aire enriquecido. El cual es provisto por la Planta de Oxígeno, cercana al proceso. De esta manera los operarios, tienen que tener en mente dos puntos importantes: % molar de Aire Enriquecido y Coeficiente de Oxígeno.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

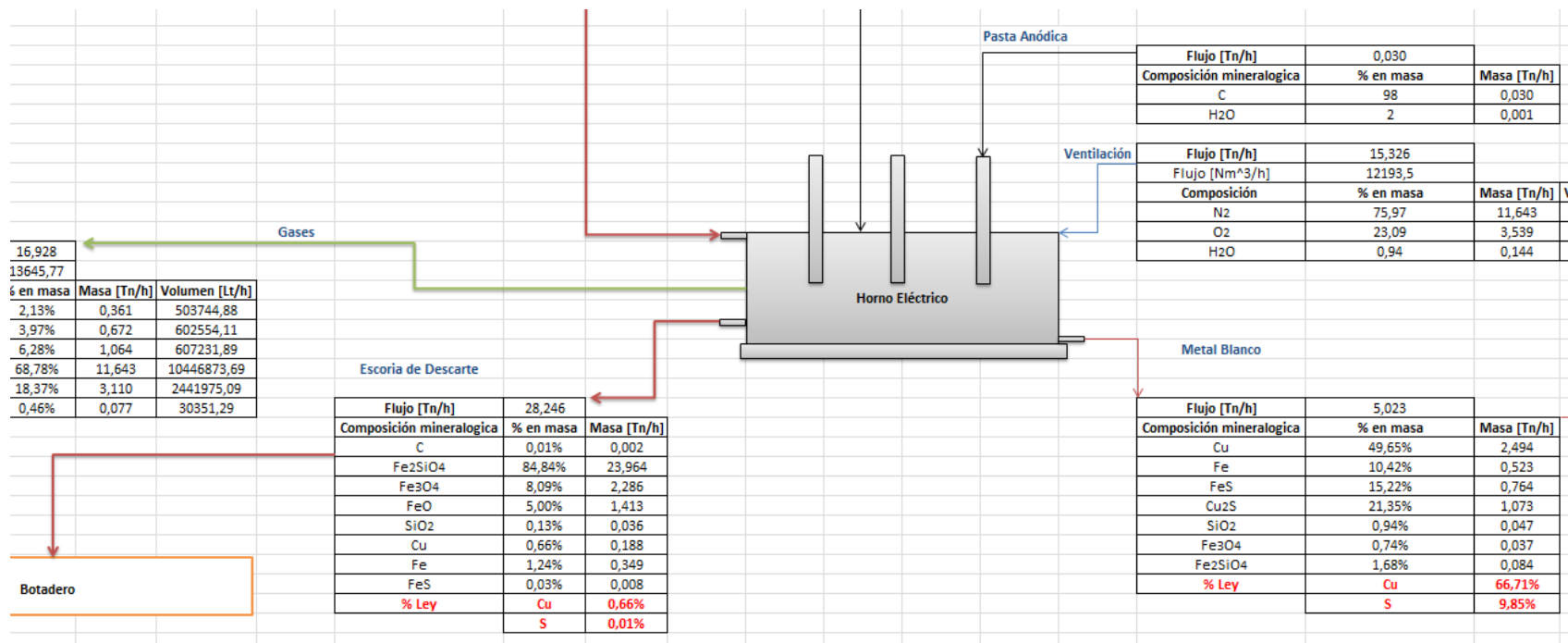


Figura 31. Horno Eléctrico.

La Escoria proveniente principalmente del Convertidor Teniente, son enviadas al Horno de Tratamiento de Escorias u Horno Eléctrico. El cual logra, a través de distintas reacciones químicas, recuperar el cobre, que se estaba perdiendo en la escoria. Finalmente la Escoria proveniente del Equipo, es enviada a través de un tren de carga hacia los botaderos.

Los Factores que tienen que considerar la gente de Operación son: Intensidad de Corriente, Pasta Anódica, Coque, Circulante y Temperatura del Horno. Esta última es debido a los ladrillos refractarios, los cuales a través del tiempo se van desgastando.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Una de las principales diferencias entre equipos, es la necesidad de aplicar calor en forma de energía eléctrica para llevar a cabo las distintas reacciones involucradas.

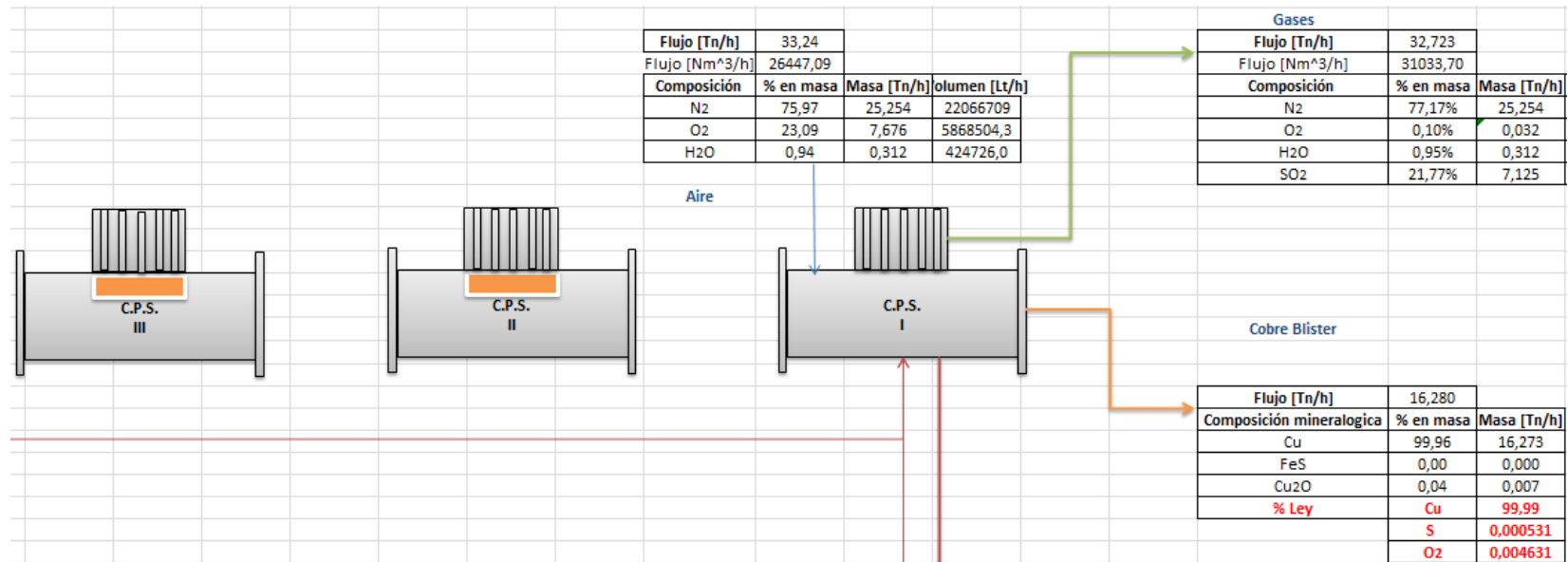


Figura 32. Convertidores Pierce Smith.

Por lo general, siempre hay un convertidor en cual se encuentra en la etapa de soplado y hay otro que se encuentra en espera, el cual lo mantienen caliente con quemadores de gas.

Como se había mencionado con anterioridad, estos convertidores reciben el Metal Blanco proveniente del Convertidor Teniente y del Horno Eléctrico. Los cuales concentran con mayor intensidad el Cobre, entregando un Cobre Blister. Listo para ser enviado al Proceso de Refino a Fuego.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Los Operarios tienen que considerar los factores de mantener siempre destapadas las toberas por las cuales se les administra oxígeno y de vez en cuando tomar una muestra directa al Fundido para de esta forma comprobar si el proceso a finalizado o no. Ya que el riesgo en potencia que existe es el Cobre Oxidándose.

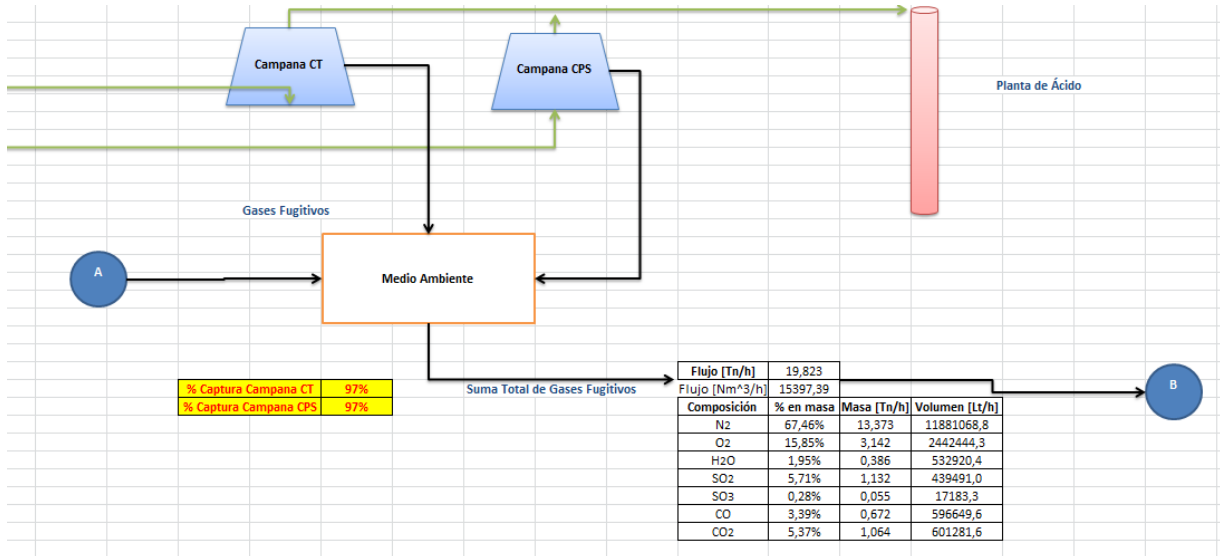


Figura 33. Sistema de Campanas.

En el Proceso de Concentrado su principal combustible es el azufre, al oxidarse este para generar calor, entrega como subproducto Dióxido de Azufre. Como hemos visto anteriormente es muy toxico para la salud y el medio Ambiente. Para ellos los Convertidores Pierce Smith y Convertidor teniente, poseen campanas las cuales captan en su mayoría los gases de fundición. Los cuales después de distintos procesos de enfriado y limpieza son enviados a la Planta de Ácido Sulfúrico. Sin embargo, las campanas no son 100% eficientes, además que existen múltiples fugas debido a la antigüedad de los materiales y también se producen importantes liberaciones de gases de fundición en el mismo transporte en ollas de los materiales. Debido a todo aquello, se producen los llamados gases Fugitivos, los cuales sin ningún tratamiento son enviados al medio ambiente.

Con los cálculos desarrollados en Excel, se logró tener una estimación de la cantidad de Gases Fugitivos, enviados al medio Ambiente. Revelando una impactante realidad, se libera demasiados gases. Por estos motivos la gente de la comunidad sufre distintos problemas, en especial los niños.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

b. Captura y Limpieza de Gases.

Debido a la gran liberación de Dióxido de azufre, se ideó el plan de Captura de Gases Fugitivos, a continuación se mostrará el diagrama desarrollado en Excel de la idea desarrollada en el capítulo VI.

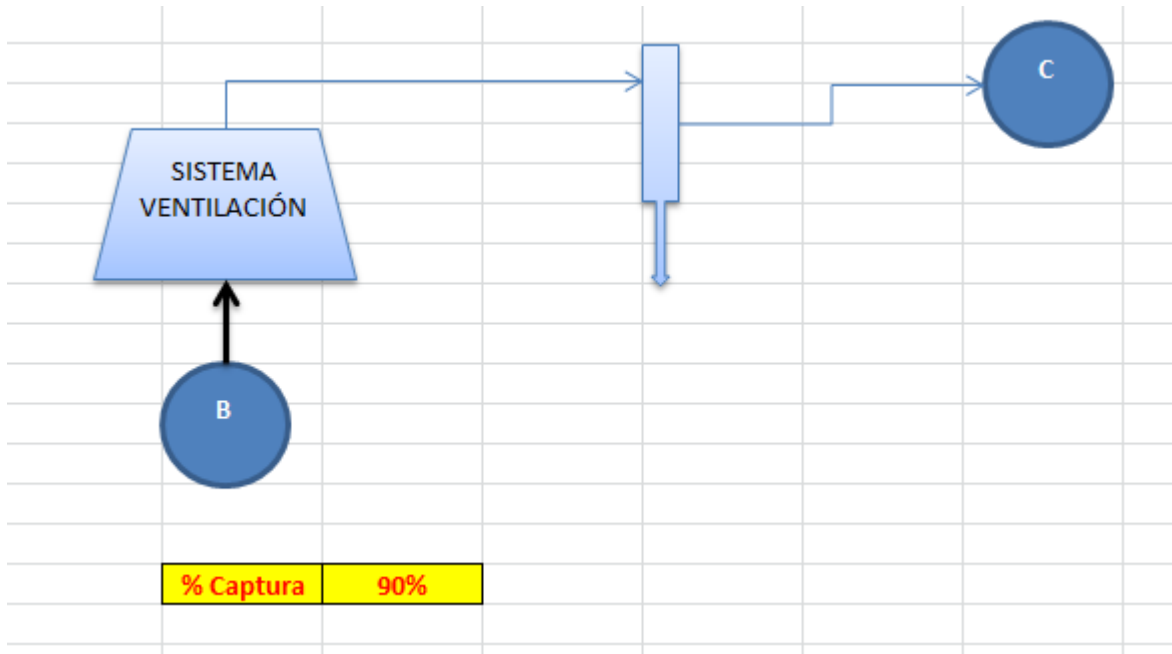


Figura 34. Sistema de Ventilación, patio de fundición.

Como se puede apreciar en la figura 34. El patio de Fundición, tendría instalado en la zona del techo un sistema de Ventilación. El cual va a ser encargado de extraer el aire del medio. Este sistema no va a poseer un sistema de enfriamiento. Debido que a esa altura los gases ya se habrán enfriado con el medio. Pero si contará con filtros pequeños.

c. Sistema tratamiento de Gases.

Como se puede apreciar en la figura 34 y como se va a mencionar más adelante. La tecnología escogida para abatir el dióxido de azufre, es agua de mar. Gracias a la geografía de Chile, gozamos de una basta cantidad y además que Ventanas se encuentra cerca de la costa.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Del mismo modo, al proceso de Fundición. Se mostrarán las partes que conforman a la Planta de Tratamiento, la cual también se encuentra integrada a Excel y enlazada con los procesos anteriores descritos. Por ende, si al comienzo se cambia alguna variable, se va a ver influenciado en este punto.

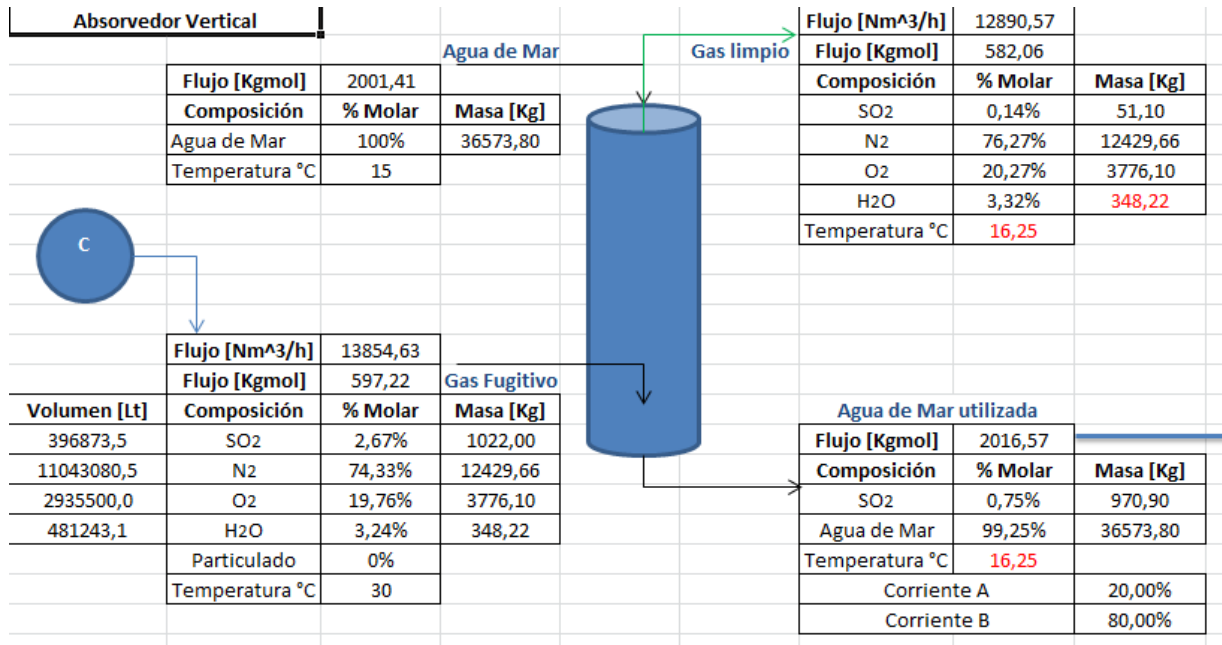


Figura 35. Zona de Absorción de Dióxido de Azufre.

Se puede apreciar a los gases que entran a la parte inferior del Absorbedor para ser puestos en contacto con una lluvia de Agua de Mar. Más adelante se describe todo el proceso.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

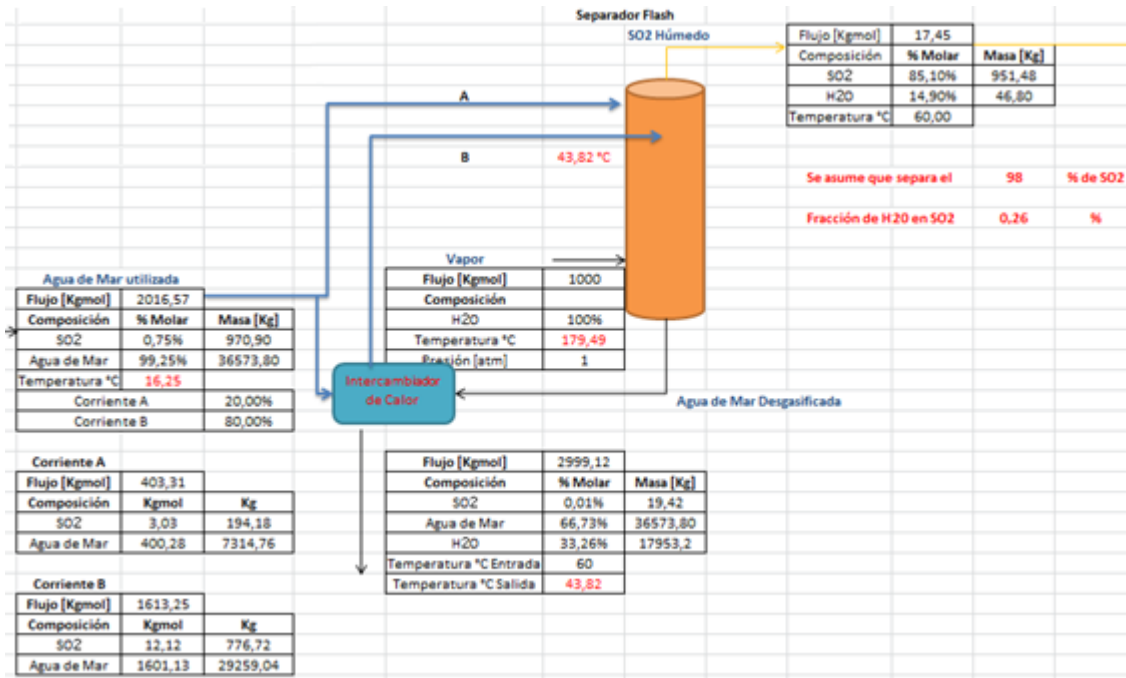


Figura 36. Zona recuperación de Dióxido de Azufre.

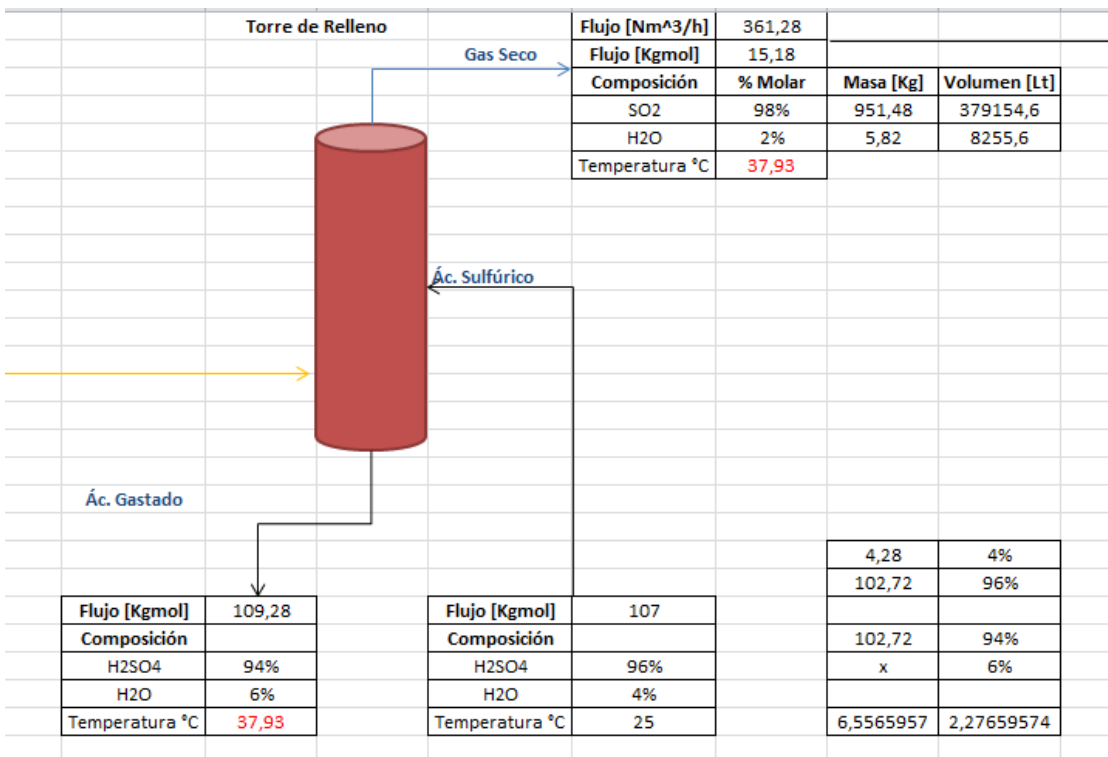


Figura 37. Zona de Secado Dióxido de Azufre.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

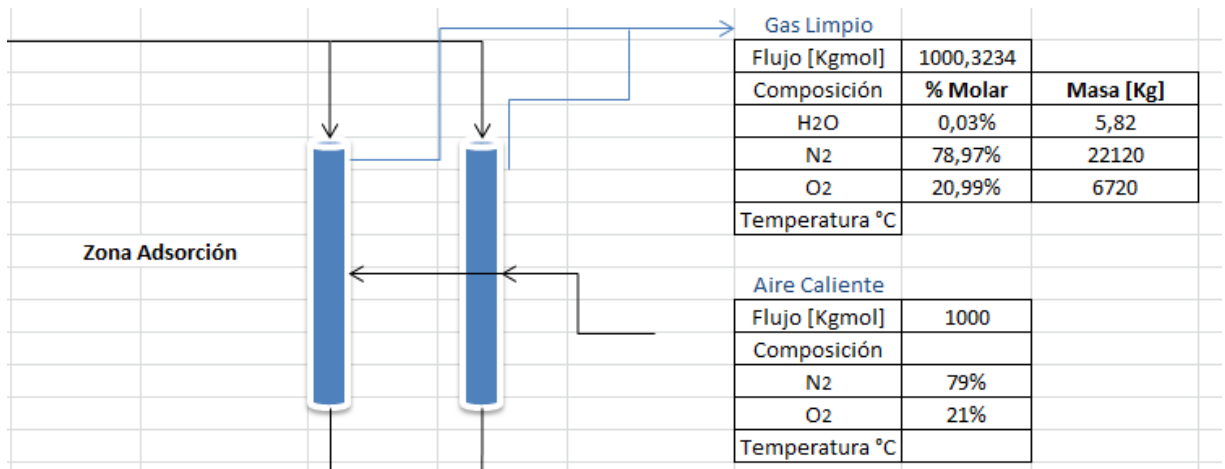


Figura 38. Zona de Adsorción, en donde es removido la totalidad del agua restante.

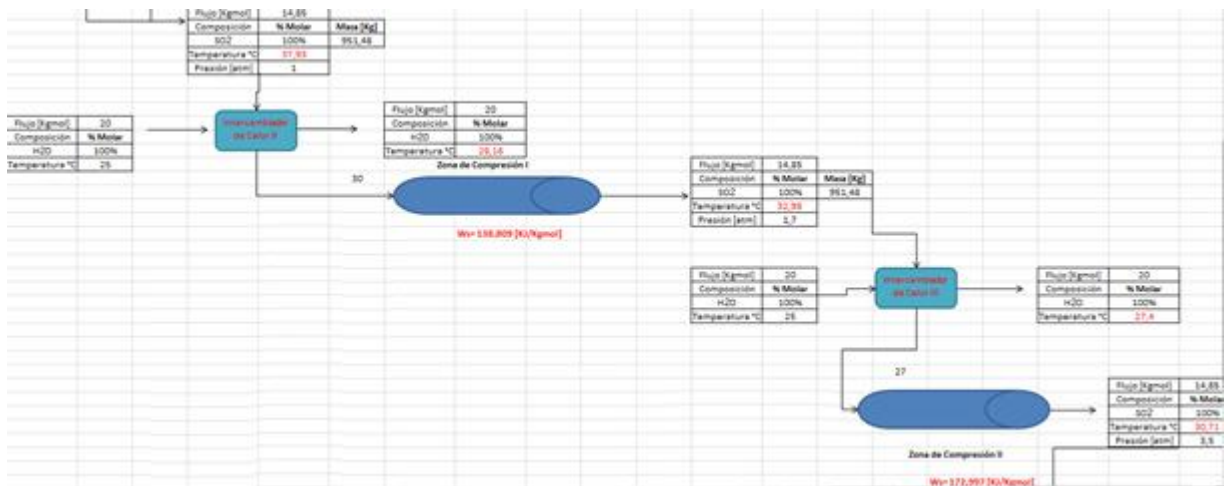


Figura 39. Zona de Compresión.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

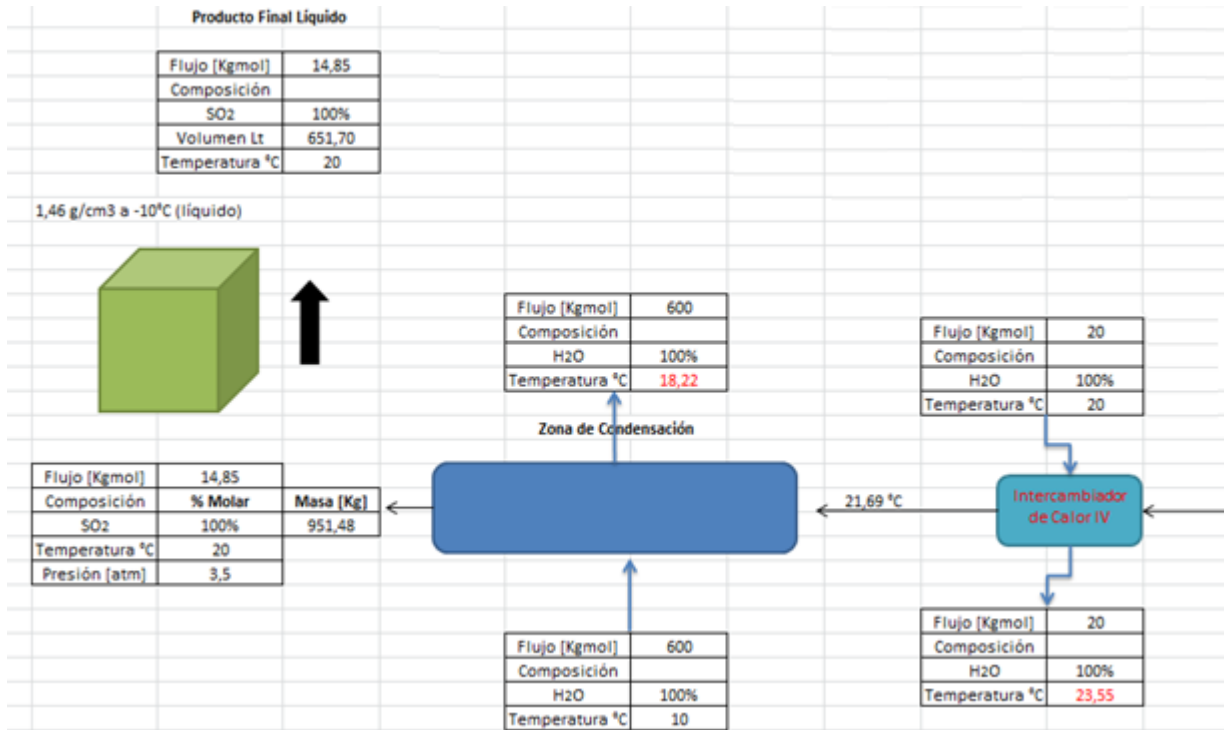


Figura 40. Zona de Condensación, donde se obtiene producto Final.

### Visual Basic.

Es un lenguaje de programación dirigido por eventos, desarrollado por el alemán Alan Cooper para Microsoft. Este lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados.

Se encuentra presente dentro de Excel, por lo que nos permite un fácil acceso y una interacción entre ellos.

Es necesario emplear métodos numéricos que a la larga, si se realiza de forma manual se transforman en un verdadero problema y peso extra al usuario. Es por esto, que gracias a Visual Basic, se logra introducir en códigos, todos los cálculos mencionados.

A continuación se mostrarán y explicarán los códigos, que nos posibilitan obtener los resultados de la planilla Excel, de forma rápida y sencilla.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

a. Cálculo de Constantes de Equilibrio.

<b>Ctes equilibrio H.E.</b>	k1 =	3,818479132	
	k3 =	7015008703	
	k4 =	99,84808504	
	k5 =	0,744778239	
<b>C.P.S.</b>	<b>Etapa de formación de escoria</b>		<b>L i m p i a r</b>
	k1 =	5,167E+44	
	k2 =	2,45929E+12	
	<b>Etapa de formación de cobre</b>		
	k4 =	315139,2659	
	k5 =	804503,177	

Figura 41. Hoja de Excel en la cual se obtiene las constantes de Equilibrio a una temperatura dada.

Como se puede apreciar en la figura 41, se puede calcular la constante de Equilibrio de dos Equipos distintos, a la temperatura que estos estén trabajando. Primero, al hacer clic en el botón que dice “Ctes. Equilibrio H.E.” Excel, nos preguntará cual es la temperatura a la cual esta trabajando el Equipo. Luego de proporcionar dicha información, el programa se ejecuta, mostrando los resultados en las casillas correspondientes. De la misma forma sucede con el Segundo Equipo.

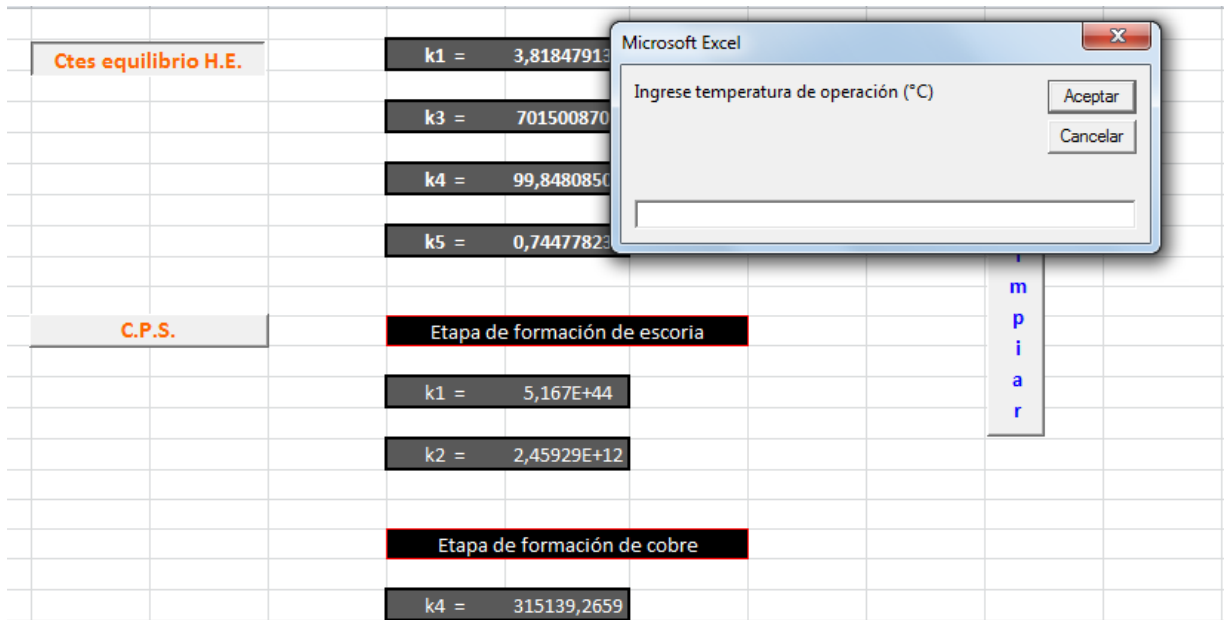


Figura 42. Ejecución del Programa.

Código que permite dicha Ejecución está en Anexo de Códigos.

b. Cálculo de Extensiones.

De alta complejidad matemática, puesto que se tubo que pasar de un método numérico a un código de programa. Sin embargo, gracias a la ayuda del Programa MathCad 14, el cálculo de las derivadas de las funciones, no generaron grandes complicaciones.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Horno Eléctrico						Horno Electrico	
Fe3O4	[Kgmol] 22,47	<b>Matriz negativa</b>				<b>Extensiones</b>	
C	48,33	-358094,1204				e1	12,439438
FeO	0	1047241470				e3	17,871156
CO	0	50,32278278				e4	17,646453
Cu2O	17,87	104,9585557				e5	2,0252935
Cu	0	<b>Matriz Jacobiana</b>					
Fe	0	1072780,054	810052,8378	734327,4029	-3427,4896		
Cu2S	9,97	3205403747	3,50076E+11	3219185650	-6883350,1		
FeS	6,76	2258,212691	2355,665242	2436,153531	-48,004106		
		177,6262032	-1285,74616	911,0415907	-5440,9184		
k1	3,818479132	<b>Matriz Inversa</b>					
k3	7015008703	2,55969E-06	-7,05142E-13	-0,00077258	5,205E-06		
k4	99,84808504	-1,58181E-09	2,88277E-12	-3,34259E-06	2,684E-08		
k5	0,744778239	-2,37739E-06	-2,15488E-12	0,001133122	-8,497E-06		
		-3,14137E-07	-1,06507E-12	0,000165301	-0,0001851		
		<b>Operación de Matrices</b>					
		-0,955680657					
		0,003420003					
		0,905201574					
		0,100271039					

Figura 43. Hoja de Cálculo de Excel, en la cual el usuario puede a través del Botón “Horno Eléctrico” tener las Extensiones de cada reacción involucrada.

Como se puede apreciar en la figura 43, para la ejecución, el programa lee las constantes de equilibrio calculadas previamente y la alimentación del Horno Eléctrico.

El Código se encuentra en Anexo de Códigos.

C.P.S.		C. P. S.	
<b>Etapa 1</b>		<b>Extensiones "Etapa 1"</b>	
	[Kgmol]	<b>Matriz negativa</b>	<b>e1</b> <b>-3E+11</b>
<b>FeS</b>	25,2816964	-1,70432E+94	<b>e2</b> <b>5,2E+11</b>
<b>O2</b>	239,8618063	4,53513E+41	
<b>FeO</b>	0		
<b>Fe3O4</b>	0,566744216		
<b>SO2</b>	0		
		<b>Matriz Jacobiana</b>	
		-2,56441E+97	-1,7096E+97
		4,58614E+44	3,03677E+44
<b>k1</b>	5,167E+44		
<b>k2</b>	2,45929E+12		
		<b>Matriz Inversa</b>	
		5,73232E-96	3,22711E-43
		-8,65698E-96	-4,84067E-43
		<b>Operación de Matrices</b>	
		0,048656912	
		-0,071988461	
<b>Etapa 2</b>		<b>Extensiones "Etapa 2"</b>	
	[Kgmol]	<b>Matriz negativa</b>	<b>e1</b> <b>85,8056</b>
<b>Cu2S</b>	85,93922598	-3240595,769	<b>e2</b> <b>0,06661</b>
<b>O2</b>	189,30	-285574,9503	
<b>Cu</b>	84,0936631		
<b>Cu2O</b>	0,114501132		
<b>SO2</b>	0		
		<b>Matriz Jacobiana</b>	
		-14470741640	-28941453052
		1080995730	2167687204
<b>k4</b>	315139,2659		
<b>k5</b>	804503,177		
		<b>Matriz Inversa</b>	
		-2,62896E-08	-3,51E-07
		1,31102E-08	1,755E-07
		<b>Operación de Matrices</b>	
		0,185430593	
		-0,092603423	

Figura 44. Hoja de Cálculo Convertidor Pierce Smith.

Funciona de la misma forma, que el Horno Eléctrico.

El Código se encuentra en Anexo de Códigos.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## VII. Diseño de Planta.

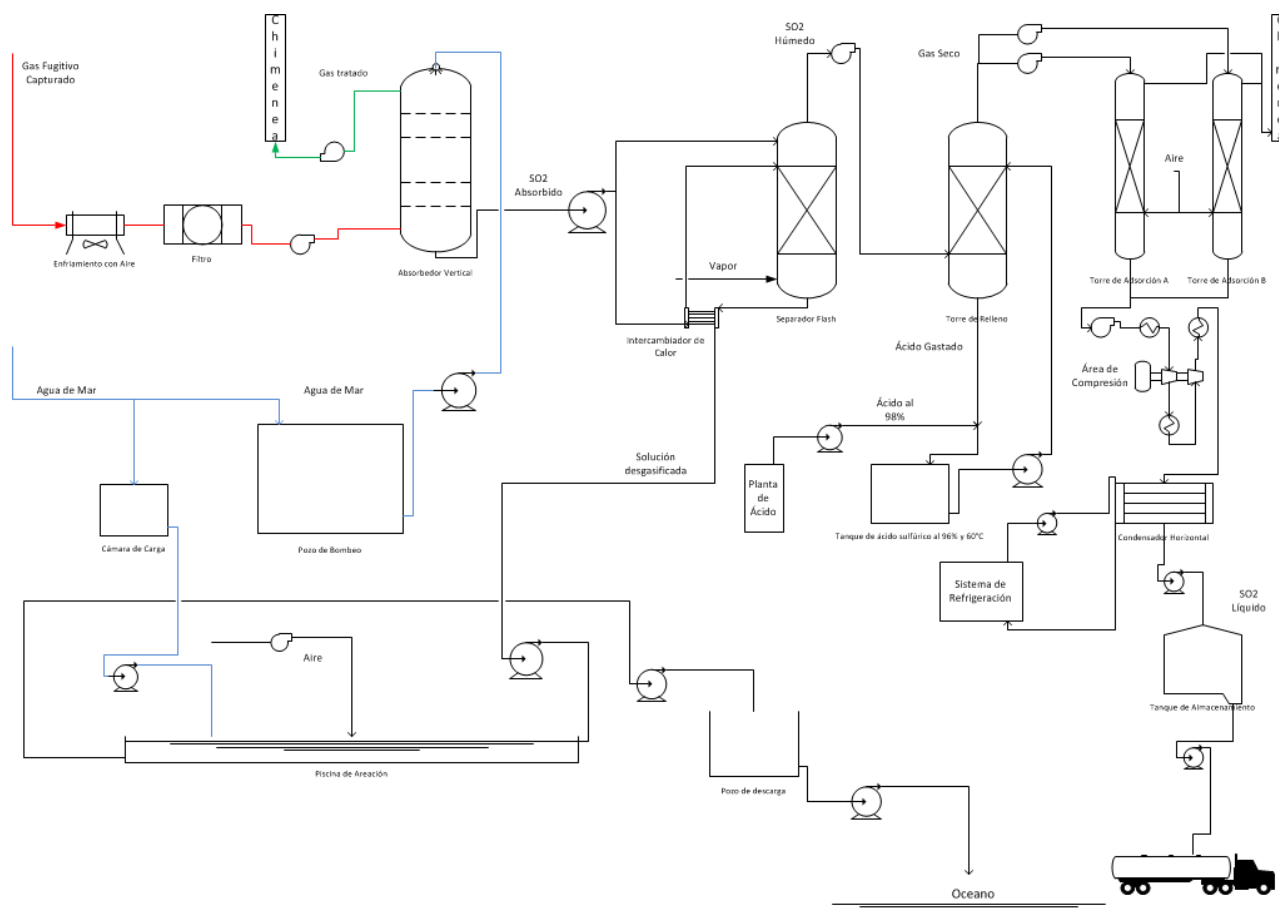


Figura 45. Diseño General. Planta Tratamiento de Gases.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## 7.1 Descripción Diseño.

Como se había descrito anteriormente. Los gases capturados y limpios son enviados hacia la planta de tratamiento. En donde ingresan a la línea de producción. (Ver Figura 46).

**Primero, Zona de Absorción:** Los gases entran por la base del Absorbedor, en donde se encuentran en contra corriente, con agua de mar dispersada en forma de lluvia para maximizar el contacto. A medida que el gas recorre todo el Adsorbedor Vertical, va entregando el Dióxido de Azufre hacia el Agua de mar. Hasta llegar a la parte superior del Absorbedor, en donde la presencia de Dióxido de Azufre es tan reducida que se puede liberar directamente al medio ambiente.

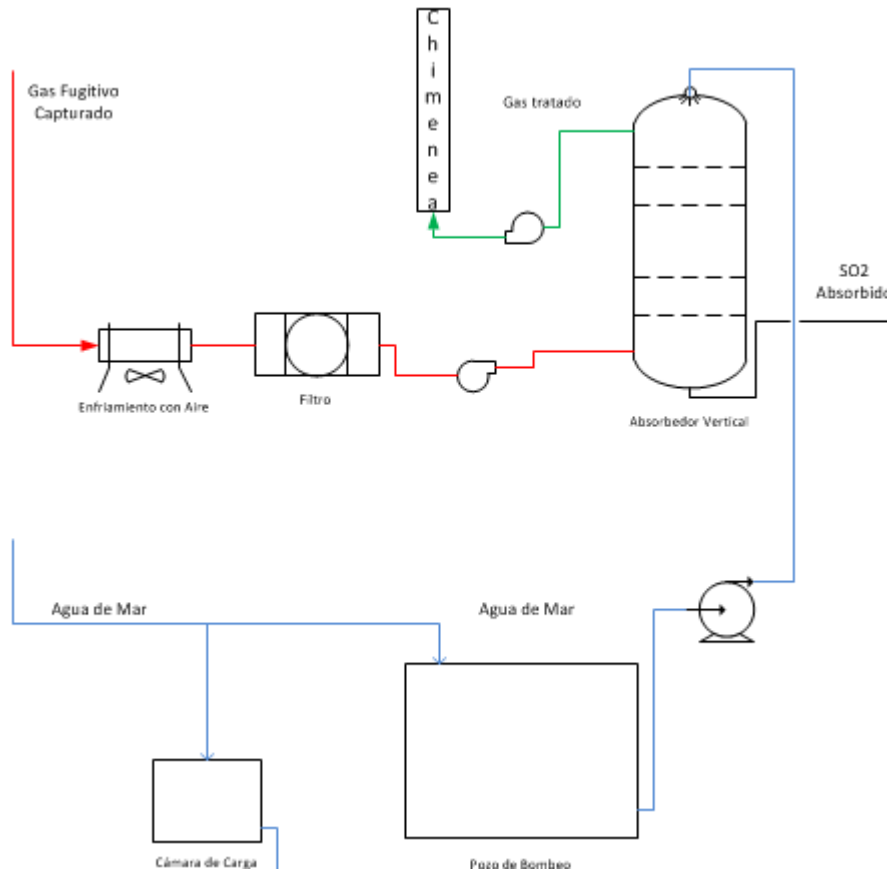


Figura 46. Zona de Absorción.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**Segundo, Zona de Recuperación:** Como se muestra en la figura 47, el Agua de mar es retirada del Absorbedor a través de bombas, las cuales envían el fluido hacia la zona de recuperación del Dióxido Azufre disuelto. El Separador Flash opera a 60°C, para ello una porción de Agua de Mar utilizada es calentada mientras que el resto entra de forma directa, el proceso se alcanza adicionando vapor sobre calentado a la Torre. De esta forma se logra la separación del Dióxido de Azufre.

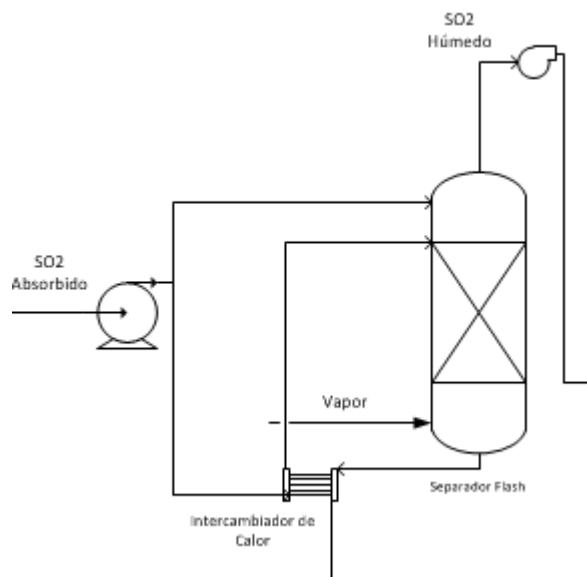


Figura 47. Zona de Recuperación.

**Tercero, Zona de Tratamiento Aguas:** El Agua de Mar des gasificada es enviada hacia la piscina de aeración, en donde a través del mismo aire y otros aditivos se le normaliza el pH y se prepara para ser enviada de vuelta al Mar, en donde las condiciones de su liberación tiene que estar bien controladas para no afectar a la biodiversidad que presenta el Océano y su entorno.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

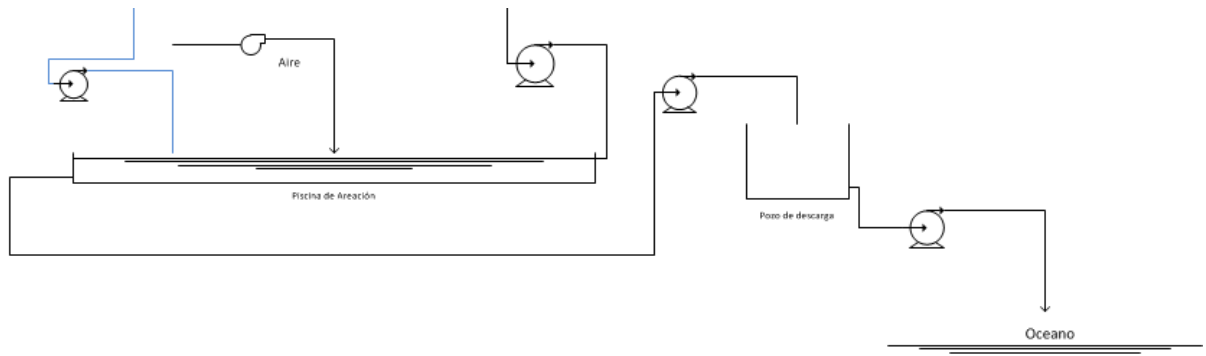


Figura 48. Zona de Tratamiento Aguas.

**Cuarto, Zona de Secado SO<sub>2</sub>:** Por la parte superior de la Torre Flash es sacado el SO<sub>2</sub> húmedo, debido que presenta un 15% de humedad más menos. Para lograr ir concentrando la corriente de SO<sub>2</sub>, dicho gas es enviado hacia una Torre de Relleno, en donde al gas es puesto en contacto con ácido sulfúrico al 96% traído directamente de la planta de ácido sulfúrico. De esta manera se logra disminuir la cantidad de humedad presente en el gas, diluyendo el ácido hasta un 94%. El ácido diluido es enviado devuelta a la planta para su renovación.

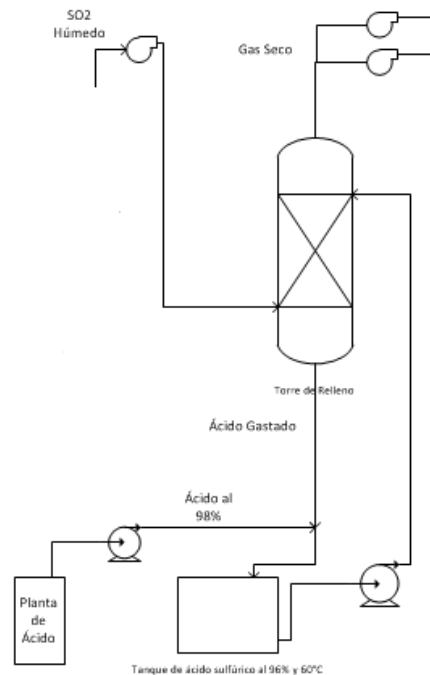


Figura 49. Zona de Secado.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**Quinto, Zona de Adsorción:** De la zona de Secado, el dióxido de azufre, sale con un 2% de humedad, significativamente menor a como entró. Para poder asegurarnos que el gas entre a la zona de compresión en una concentración del 100%, es necesario enviar el gas hacia una zona de Adsorción. En donde la corriente de gas se encuentra con un sistema que opera de forma simultanea. Mientras el gas pase por una de las torres el Adsorbedor de Sílica gel, se va saturando gradualmente de Agua. Una vez que el Adsorbedor se encuentre totalmente saturado se cierra una válvula que nos permite que el gas entre a la Torre B que funciona de igual manera que la anterior. De esta forma el proceso ocurre continuamente, sin afectar los procesos anteriores.

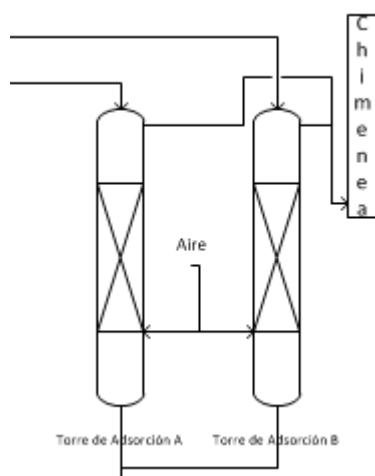


Figura 50. Zona de Adsorción.

La torre de Adsorción que contenga la Sílica Gel saturada, se encuentra aislada del gas y para renovar el Adsorbedor se hace pasar una corriente de aire caliente, con el tiempo ira evaporando el agua contenida. Eso si tiene que coincidir mas menos el tiempo de Adsorción y el tiempo de regeneración.

**Sexto, Zona de Enfriamiento y Compresión:** Una vez que se a logrado tener una corriente gaseosa de 100% Dióxido de azufre, se procede a enfriar para así lograr una mejor compresión del gas. De esta forma, cuando llega a la etapa de Condensación hay que retirar muy poco calor para lograr condensarlo.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

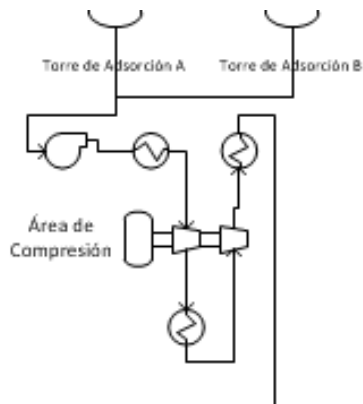


Figura 51. Zona de Enfriamiento y Compresión.

**Séptimo, Zona de Condensado:** El gas que se va condensando se deposita en contenedores especializados para esta materia. Una vez que los contenedores estén llenos, son enviados a través de camiones cisternas para su distribución y venta.

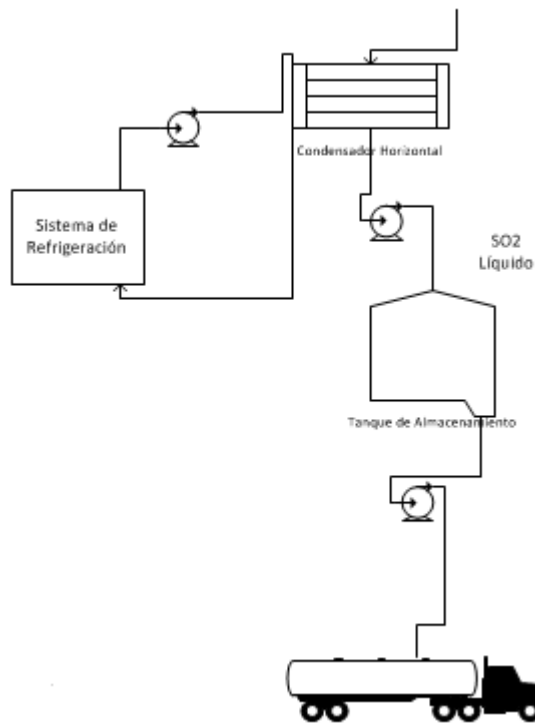


Figura 52. Zona de Condensado y Distribución.

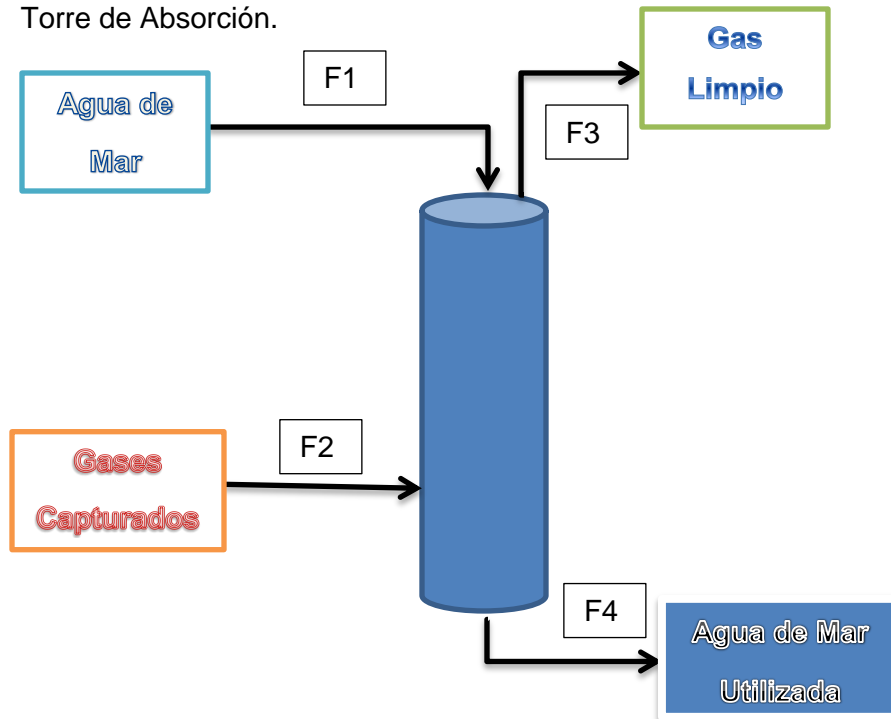
---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



## 7.2 Tamaños Propuestos.

a) Torre de Absorción.



- **Balance de Masa.**

$$(1) F1 + F2 = F3 + F4$$

Para poder resolver el balance de masa, es necesario determinar la cantidad de Absorbente requerido, en este caso Agua de Mar, por ello se realiza lo siguiente.

- **Curva Equilibrio SO<sub>2</sub> con Agua de Mar.**

La temperatura del Absorbente es vital en la operación, puesto que está relacionada directamente con la capacidad del Agua de Mar, para absorber Dióxido de Azufre.

Mientras más baja temperatura posea el Agua de Mar, mayor será su capacidad para Absorber el Dióxido de Azufre. En las costas Chilenas el agua de mar posee una temperatura relativamente baja, lo cual facilita su operación.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

La curva de Equilibrio para el SO2 con Agua de Mar es la siguiente:

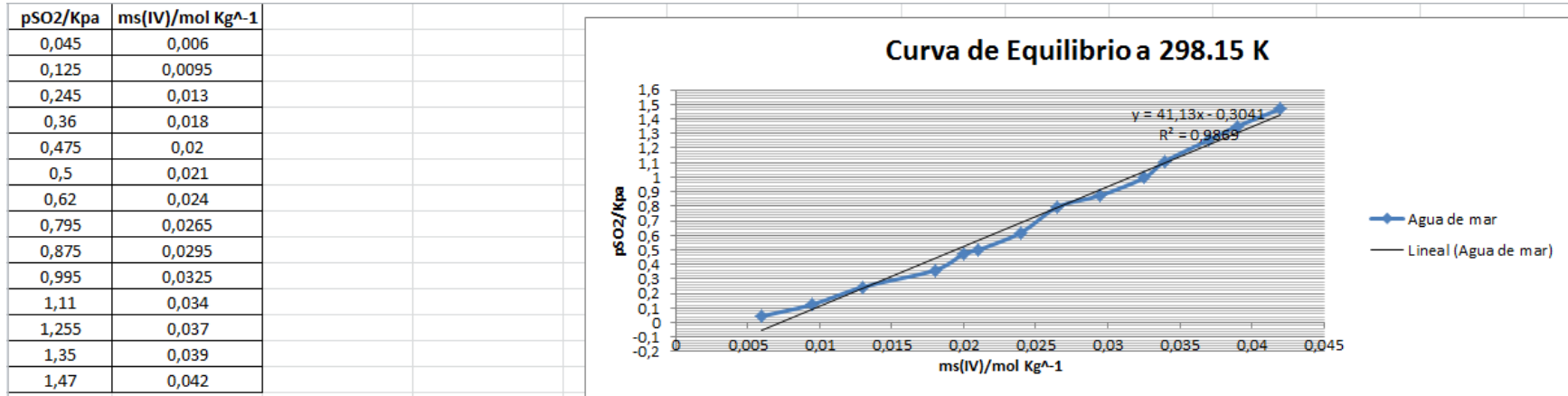


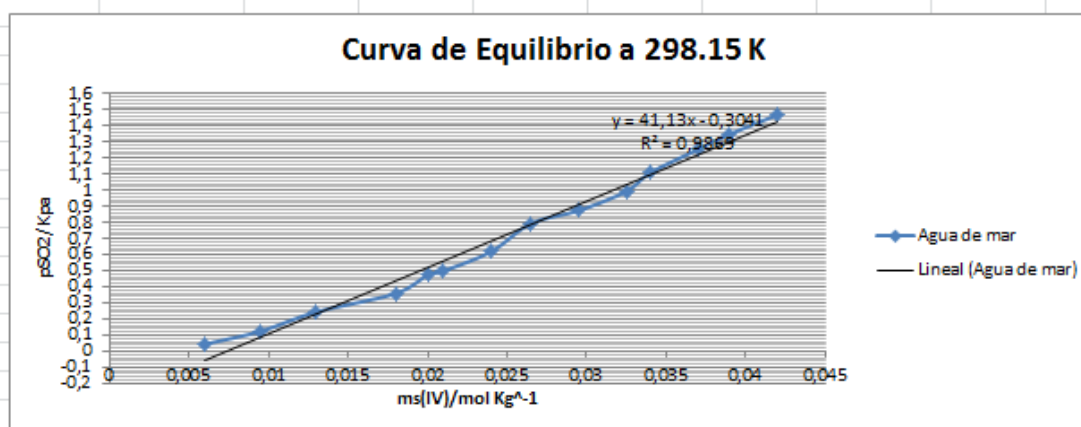
Figura 53. Curva de Equilibrio a 25°C.

Como se puede apreciar en la figura. Esta es la curva de equilibrio de Dióxido de Azufre con Agua de mar, a través de regresión lineal se puede obtener la ecuación de dicha gráfica. Sin embargo, como se había mencionado previamente la Absorción del Agua de Mar varía según su temperatura. Para aquello se realizó lo siguiente:

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

pSO <sub>2</sub> /Kpa	ms(IV)/mol Kg <sup>-1</sup>
0,045	0,006
0,125	0,0095
0,245	0,013
0,36	0,018
0,475	0,02
0,5	0,021
0,62	0,024
0,795	0,0265
0,875	0,0295
0,995	0,0325
1,11	0,034
1,255	0,037
1,35	0,039
1,47	0,042



pSO <sub>2</sub> /Kpa	ms(IV)/mol Kg <sup>-1</sup>
0,04	0,0065
0,105	0,02
0,245	0,0225
0,365	0,0295
0,5	0,038
0,65	0,045
0,755	0,0515
0,9	0,054
1,025	0,067
1,155	0,07
1,265	0,0755
1,4	0,079
1,51	0,085

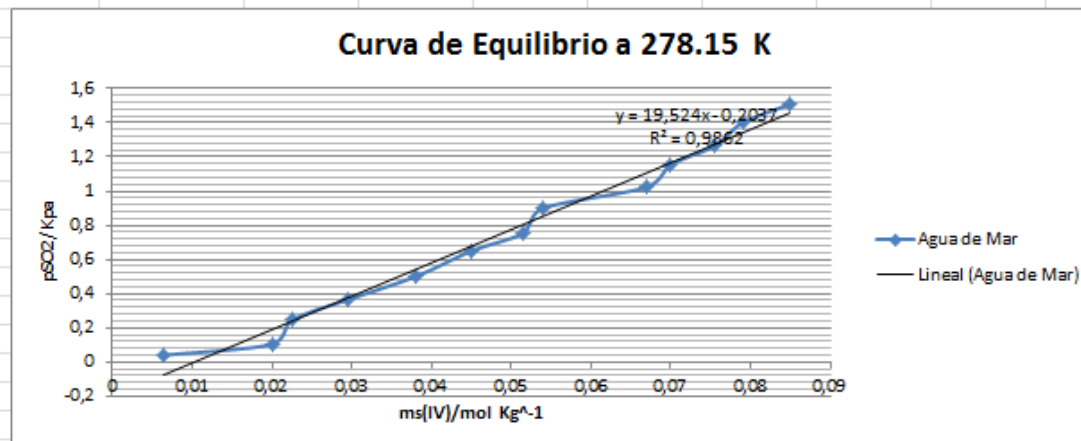


Figura 54. Comparación de Temperaturas.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Se tomó datos de Absorción de Agua de Mar con Dióxido de Azufre en distintas temperaturas (298,15-278,15) °K. De esta forma a través de interpolación lineal y gracias al Programa Excel, se logró obtener una gráfica de absorción en función de la Temperatura.

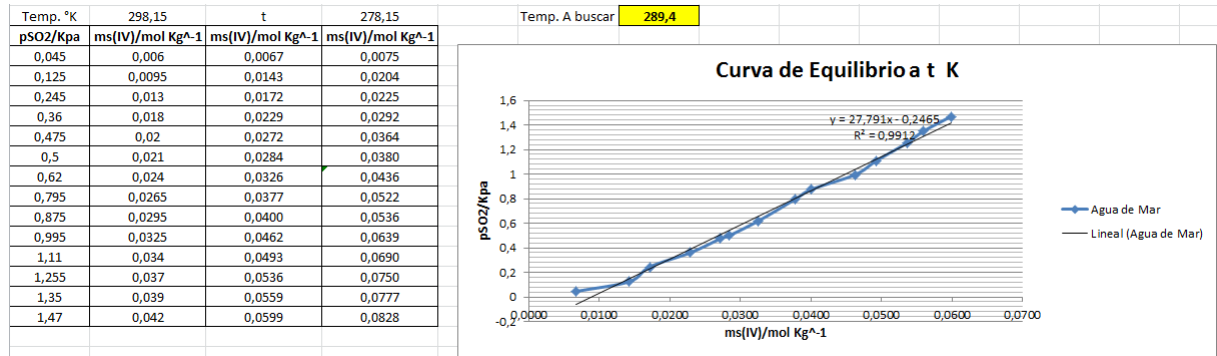


Figura 55. Curva de Equilibrio en Función de Temperatura.

De esta forma, donde se encuentra el cuadro de color amarillo se escribe la temperatura a la cual se encuentra el Agua de Mar a utilizar. De forma automática se realiza los cálculos en la tabla y se grafica, obteniéndose la función de dicha gráfica, la cual en su posterioridad es usada para los cálculos para la altura del Relleno en la Torre.

- **Cálculo Agua de Mar.**

Una vez obtenidos los datos de la curva de Equilibrio se procede al Cálculo de Agua de Mar necesaria.

Paso 1. Peso Molecular Promedio, corriente de Gas.

$$PM(gas) = 29,43$$

Paso 2. Cantidad Molar.

$$n_{aire} = 581,26 [Kgmol]$$

$$n_{SO2} = 15,95 [Kgmol]$$

Paso 3. Cálculo de Y.

$$y_1 = 0,0267 \text{ (Fracción Molar de } SO_2 \text{ en Gases Capturados.)}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Cantidad Absorbida} = 95\%$$

$$\text{Moles de SO}_2 \text{ sin Absorber} = 0,8 \text{ [Kgmol]}$$

$$y_2 = \frac{\text{Moles sin Absorber}}{(\text{n aire} + \text{moles sin absorber})} = 0,0014$$

Paso 4. Cálculo de x.

$$x_1 = \frac{(y_1 + (-1 * \text{info curva}))}{(\text{info 2 curva})} = 0,0098$$

$$x_2 = 0 \text{ Se Asume}$$

Paso 5. Cálculo de L/G min.

$$\frac{L}{G} \text{ min} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)} = 2,58$$

Paso 6. Cálculo de L/G Operación.

$$\frac{L}{G} \text{ Op.} = 1,3 * \frac{L}{G} \text{ min} = 3,35$$

Paso 7. Recalculo de x1.

$$x_1 = \frac{(y_1 - y_2)}{\frac{L}{G} \text{ Op.}} = 0,0076$$

Paso 8. Cálculo de Flujo Marítimo.

$$F_1 = \frac{L}{G} \text{ Op.} * (\text{n aire} + \text{nSO}_2) = 2001,41 \text{ [Kgmol]}$$

Paso 9. SO<sub>2</sub> Absorbido.

$$\text{nSO}_2 \text{ ab.} = \text{nSO}_2 - \text{moles de SO}_2 \text{ sin Absorber} = 15,16 \text{ [Kgmol]}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

- **Balance de Energía.**

Para conocer las temperaturas de las corrientes de salida, es necesario realizar un balance de energía. Para ello se realiza lo siguiente.

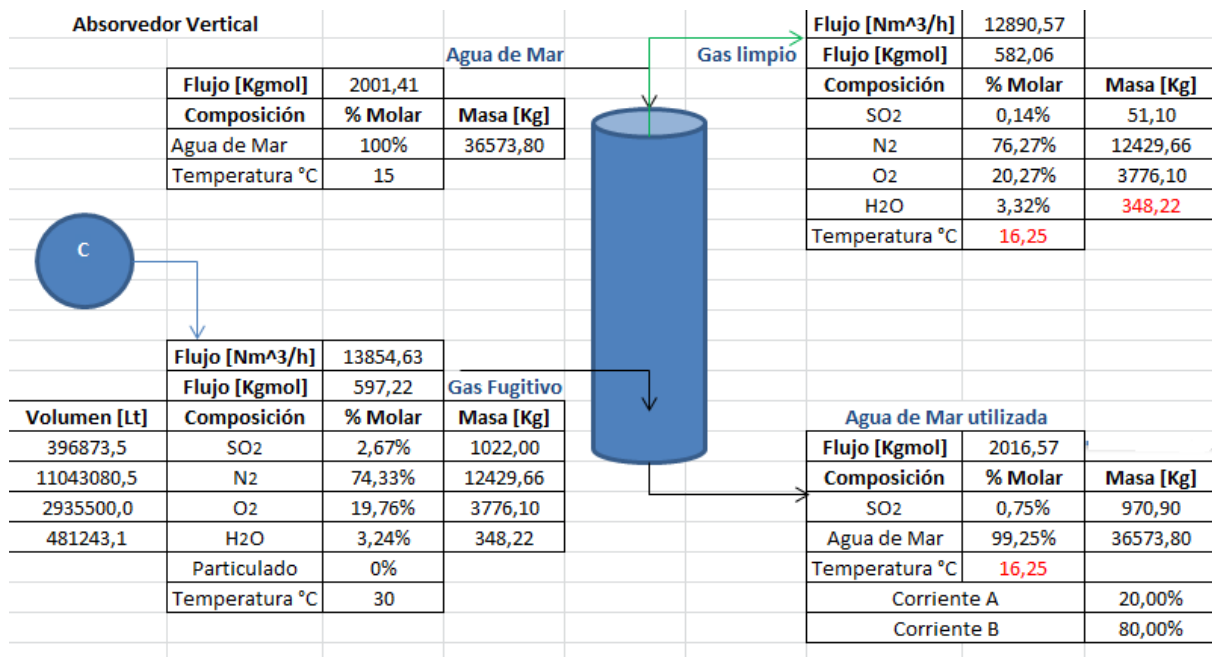


Figura 56. Corrientes involucradas en Absorbedor Vertical.

**Paso 1.** Calcular el Peso Molecular Promedio del Agua de Mar.

**Paso 1.1.** Composición Agua de Mar

Elemento o Compuesto	Porcentaje en Peso	Peso Molecular
H <sub>2</sub> O	96,487%	18
Cl <sup>-</sup>	1,935%	35,453
Na <sup>+</sup>	1,076%	22,989
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,271%	96,064
Mg <sup>++</sup>	0,129%	24,312
Ca <sup>++</sup>	0,041%	40,08
K <sup>+</sup>	0,039%	39,102
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,014%	61,019

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$Br^-$	0,0067%	79,909
$Sr^{++}$	0,0008%	87,62
$B$	0,0004%	10,811
$F^-$	0,0001%	18,998

**Paso 1.2.** Conversión de Porcentaje en Peso a Molar.

Tomando una Base de cálculo de 1 Kg de Agua de Mar, se tiene.

$$n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{PM_{H_2O}} = 53,604$$

$$n_{Cl} = \frac{m_{Cl}}{PM_{Cl}} = 0,546$$

$$n_{Na} = \frac{m_{Na}}{PM_{Na}} = 0,468$$

$$n_{SO_4} = \frac{m_{SO_4}}{PM_{SO_4}} = 0,028$$

$$n_{Mg} = \frac{m_{Mg}}{PM_{Mg}} = 0,053$$

$$n_{Ca} = \frac{m_{Ca}}{PM_{Ca}} = 0,01$$

$$n_K = \frac{m_K}{PM_K} = 9,974 * 10^{-3}$$

$$n_{HCO_3} = \frac{m_{HCO_3}}{PM_{HCO_3}} = 2,294 * 10^{-3}$$

$$n_{Br} = \frac{m_{Br}}{PM_{Br}} = 8,385 * 10^{-4}$$

$$n_{Sr} = \frac{m_{Sr}}{PM_{Sr}} = 9,13 * 10^{-5}$$

$$n_B = \frac{m_B}{PM_B} = 3,7 * 10^{-4}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$nF = \frac{mF}{PMF} = 5,264 * 10^{-5}$$

$$nTotal = 54,723 [Kgmol]$$

Por lo tanto:

$$y_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{nTotal} = 0,98 \rightarrow 98\%$$

$$y_{Cl} = \frac{n_{Cl}}{nTotal} = 9,974 * 10^{-3} \rightarrow 0,997\%$$

$$y_{Na} = \frac{n_{Na}}{nTotal} = 8,553 * 10^{-3} \rightarrow 0,855\%$$

$$y_{SO_4} = \frac{n_{SO_4}}{nTotal} = 5,155 * 10^{-4} \rightarrow 0,052\%$$

$$y_{Mg} = \frac{n_{Mg}}{nTotal} = 9,696 * 10^{-4} \rightarrow 0,097\%$$

$$y_{Ca} = \frac{n_{Ca}}{nTotal} = 1,869 * 10^{-4} \rightarrow 0,019\%$$

$$y_{K} = \frac{n_{K}}{nTotal} = 1,823 * 10^{-4} \rightarrow 0,018\%$$

$$y_{HCO_3} = \frac{n_{HCO_3}}{nTotal} = 4,193 * 10^{-5} \rightarrow 4,193 * 10^{-3}\%$$

$$y_{Br} = \frac{n_{Br}}{nTotal} = 1,532 * 10^{-5} \rightarrow 1,532 * 10^{-3}\%$$

$$y_{Sr} = \frac{n_{Sr}}{nTotal} = 1,668 * 10^{-6} \rightarrow 1,668 * 10^{-4}\%$$

$$y_{B} = \frac{n_{B}}{nTotal} = 6,761 * 10^{-6} \rightarrow 6,761 * 10^{-4}\%$$

$$y_{F} = \frac{n_{F}}{nTotal} = 9,619 * 10^{-7} \rightarrow 9,619 * 10^{-5}\%$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Finalmente se Obtiene:

$$PMAgua\ de\ Mar = y_{H_2O} * PM_{H_2O} + y_{Cl} * PM_{Cl} + y_{Na} * PM_{Na} + y_{SO_4} * PM_{SO_4} + y_{Mg} * PM_{Mg} + y_{Ca} * PM_{Ca} + y_{K} * PM_{K} + y_{HCO_3} * PM_{HCO_3} + y_{Br} * PM_{Br} + y_{Sr} * PM_{Sr} + y_B * PM_B + y_F * PM_F = 81,828$$

**Paso 2.** Capacidades Caloríficas.

$$cp_{H_2O(g)} = 8,314 * (3,47 + 0,00145 * t + 12100 * t^{-2}) \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$cp_{Agua\ de\ Mar} = 2 * 10^{-6} * t^3 - 0,0003 * t^2 + 0,0092 * t + 3,9059 \left[ \frac{KJ}{Kg * ^\circ C} \right]$$

$$cp_{N_2} = 8,314 * (3,28 + 0,000593 * t + 4000 * t^{-2}) \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$cp_{SO_2(g)} = 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$cp_{O_2} = 8,314 * (3,639 + 0,000506 * t - 22700 * t^{-2}) \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$cp_{H_2O(l)} = 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) \left[ \frac{J}{mol * K} \right]$$

$$cp_{H_2SO_4} = 139,1 * 10^{-3} + 15,59 * 10^{-5} * t \left[ \frac{KJ}{mol * ^\circ C} \right] \text{ Entre } 10 - 45\ ^\circ C$$

**Paso 3.** Balance de Energía.

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, las temperaturas de salidas son isotérmicas y base de entalpia es a la entrada.

$$Q = \text{Energía Corriente F4} + \text{Energía Corriente F3} \quad (1)$$

Donde: F3 es la corriente de gas limpio y F4 es la corriente Agua de Mar utilizada.

Desarrollando la expresión (1) se obtiene:

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Q = \left( n_{SO_2} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{SO_2(g)} dt + n_{Agua de Mar} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{Agua de Mar} dt \right) + \left( n_{H_2O(l)} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{H_2O(l)} dt + n_{O_2} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{O_2} dt + n_{N_2} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{N_2} dt + n_{SO_2(g)'} * \int_{t_i}^{t_f} cp_{SO_2(g)} dt \right)$$

Por lo tanto:

$$0 = 15,157 * \int_{288}^{(t+273)} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt + 48444,36 * \int_{15}^t 2 * 10^{-6} * t^3 - 0,0003 * t^2 + 0,0092 * t + 3,9059 dt + 15,426 * \int_{303}^{(t+273)} 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) dt + 118,003 * \int_{303}^{(t+273)} 8,314 * (3,639 + 0,000506 * t - 22700 * t^{-2}) dt + 443,916 * \int_{303}^{(t+273)} 8,314 * (3,28 + 0,000593 * t + 4000 * t^{-2}) dt + 0,795 * \int_{303}^{(t+273)} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt$$

Resolviendo la Ecuación, se obtiene:

$$t = 16,249 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **Cálculo de Dimensiones.**

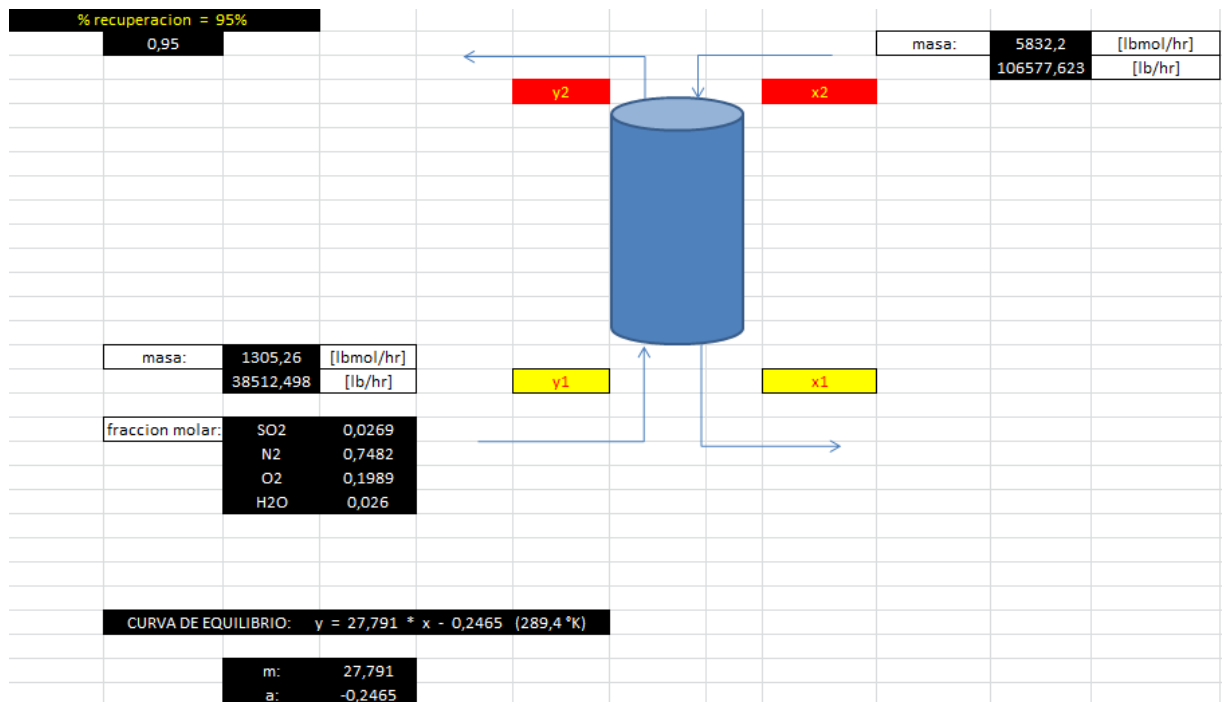


Figura 57. Cuadro informativo Torre de Absorción.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Una vez obtenido todos los datos, procedemos al cálculo de tamaño. Para ellos se realiza lo siguiente:

**Paso 1.** Obtención de x e y.

$$y1 = \text{Fracción Molar de } SO_2 = 0,0269$$

$$y2 = \frac{0,0269 * nTotal * (1 - \text{Fracción Recuperación})}{(0,0269 * nTotal * (1 - \text{Fracción Recuperación})) + ((yN_2 + yO_2 + yH_2O) * nTotal)}$$

$$y2 = 0,0013803$$

$$x2 = 0 \text{ Asumido}$$

$$x1 * = \frac{y1 - a}{m} = 0,0098377$$

**Paso 2.** Cálculo de L/G.

$$\frac{L}{G} (\text{min}) = \frac{y1 - y2}{x1 * - x2} = 2,59407$$

Suponiendo un Factor de 1,3.

$$\frac{L}{G} Op. (\text{molar}) = \frac{L}{G} (\text{min}) * 1,3 = 3,372291$$

$$\frac{L}{G} Op. (\text{másico}) = \frac{L}{G} Op. (\text{molar}) * \left(\frac{PMl}{PMg}\right) = 2,0885939$$

**Paso 3.** Recalculando x1.

$$x1 = \frac{y1 - y2}{y2 + x2} = 0,0075675$$

**Paso 4.** Buscando en Gráfica.

$$x = \frac{L}{G} Op. (\text{másico}) * \left(\frac{\rho g}{\rho l}\right)^{0,5} = 0,0709775$$

Con este valor, entro a la Gráfica y busco el valor de y

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

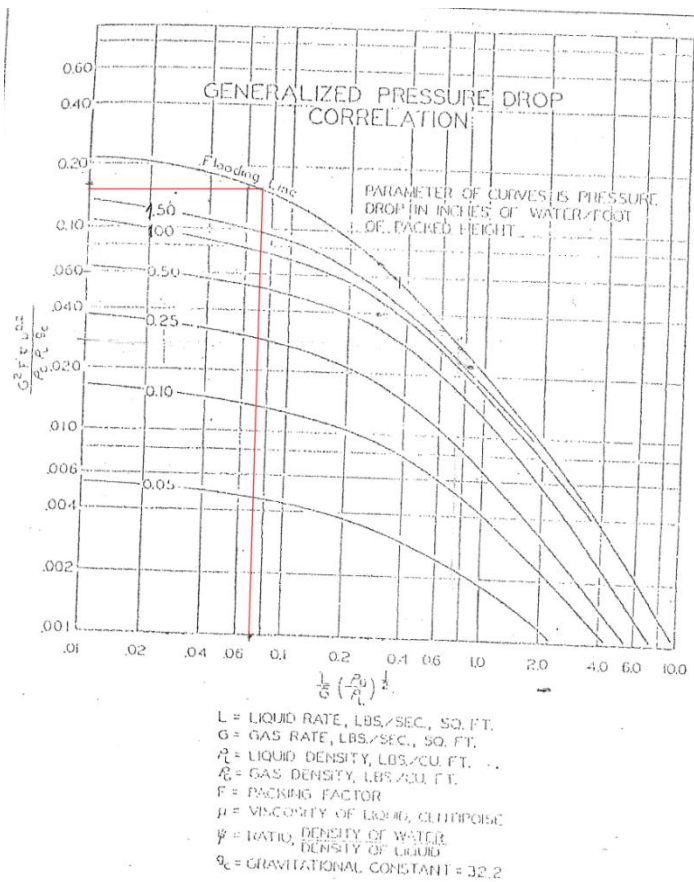


Figura 58. Correlación Generalizada de Caída de Presión.

$$y = 0,18$$

De tabla: Relleno y packing.

<b>Relleno:</b>	Rashing rings ceramic
<b>F:</b>	37
<b>Dp:</b>	3 [Pulg]

$$Gf = \sqrt{\frac{y * gc * \rho g * \rho l}{F * \gamma * \mu l^{0,2}}} = 0,83853893 \left[ \frac{lb}{pie^2 * seg} \right]$$

Suponiendo un Factor de [0,65 – 0,85] = 0,8

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Gop = factor * Gf = 0,67083114 \left[ \frac{lb}{pie^2 * seg} \right]$$

$$\text{Área de Columna} = \frac{mTotal}{Gop} = \frac{3600}{0,67083114} = 5366,51 [pie^2]$$

$$Diámetro = \sqrt{\frac{4 * \text{área de columna}}{3,14}} = 83,14 [pie]$$

$$D(st) = 4,5 [pie] = 54 [pulg]$$

Chequear:

$$15 < \left( \frac{D(st)}{dp} \right) < 24$$

$$\frac{D(st)}{dp} = 18 \text{ (acceptable)}$$

$$A(st) = 3,14 * D(st)^{0,5} = 15,89625 [pie]$$

$$Gop = \frac{(mtotal)}{A(st)} = \frac{3600}{15,89625} = 0,67298336 \left[ \frac{lb}{pie^2 * seg} \right]$$

Chequear:

$$0,5 < \left( \frac{Gop}{Gd} \right) < 0,85$$

$$\frac{Gop}{Gd} = 0,802566951 \text{ (acceptable)}$$

Por lo tanto, altura:

y1	0,0269
y2	0,001380273
y1 *	x1 * m + a = -0,03619231
y2 *	0

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$(y - y^*) = \frac{(y1 - y1^*) - (y2 - y2^*)}{\ln\left(\frac{y1 - y1^*}{y2 - y2^*}\right)} = 0,016145187$$

$$Nog = \frac{y1 - y2}{(y - y^*)} = 1,580639878$$

$$G'' = \frac{nTotal}{A(st)} = 0,0228087$$

$$L'' = \frac{nTotal' \frac{1}{3600}}{A(st)} = 0,1019143$$

$$Hg = 1,24 * \left(\frac{G''^{0,3}}{L''^{0,25}}\right) = 0,7059807$$

$$HL = 0,37 * 0,052^{0,18} = 0,2173113$$

$$Hog = Hg + \left(\frac{\left(\frac{nTotal}{3600}\right)}{\left(nTotal' \frac{1}{3600}\right)}\right) * HL * m = 2,0575898$$

Finalmente:

$$z = Nog * Hog = 3,2523 \text{ [pie] de Relleno} = 0,9913 \text{ [m]}$$

b) Bomba Agua de Mar.

Debido al uso esencial de Agua de Mar para el tratamiento de gases, es necesario realizar los cálculos para obtener la potencia de Bomba, para ello se realiza lo siguiente:

- **Cálculo de Pérdidas.**

**Pérdidas por Descarga.**

$$Volumen \text{ Agua de Mar} = 598 \left[ \frac{Lt}{min} \right]$$

$$Q = 598 \left[ \frac{Lt}{min} \right] = 0,3518 \left[ \frac{Pie^3}{s} \right]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Se va a considerar un Diámetro Nominal de 3 Pulgadas en la línea de descarga, por lo tanto.

$$Di = 0,2557 \text{ [pie]}$$

$$v = \frac{4 * Q}{3,1416 * Di^2} = 6,85 \left[ \frac{\text{Pie}}{\text{s}} \right]$$

Una vez calculada la velocidad por el ducto, es posible obtener el número de Reynolds.

$$\rho = 1,02 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{Lt}} \right] = 63,714 \left[ \frac{\text{Lb}}{\text{Pie}^3} \right]$$

$$\mu = 1,28 \text{ [cp]} = 0,00086 \left[ \frac{\text{Lb}}{\text{Pie} * \text{s}} \right] \text{ (Temperatura } 15 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$Re = \frac{Di * v * \rho}{\mu} = 129779,59 \text{ (Turbulento)}$$

En este punto es esencial obtener la rugosidad relativa a utilizar, para ello se utiliza acero inoxidable. De esta forma obtenemos:

$$\frac{\varepsilon}{d} = 0,0005866$$

$$fd = 2,01 * 10^{-2} \text{ (Factor de Darcy)}$$

Finalmente las pérdidas por descarga serían:

$$hfd = \frac{fd * v^2}{Di * 64,4} * LeqD = 0,0573 * LeqD$$

### **Pérdidas por Succión.**

Generalmente el diámetro de Succión es mayor que el diámetro de descarga, esto es para obtener una velocidad menor de succión y así evitar pérdidas innecesarias y mayor consumo de potencia en la bomba.

Por lo tanto diámetro a utilizar es de 3 ½ Pulgadas Nominales.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Di = 0,2957 \text{ [pie]}$$

$$v = \frac{4 * Q}{3,1416 * Di^2} = 5,12 \left[ \frac{\text{Pie}}{\text{s}} \right]$$

$$Re = \frac{Di * v * \rho}{\mu} = 112224, \text{ (Turbulento)}$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = 0,0005073$$

$$fd = 2,01 * 10^{-2} \text{ (Factor de Darcy)}$$

Finalmente las pérdidas por succión serían:

$$hfs = \frac{fd * v^2}{Di * 64,4} * LeqS = 0,027706 * LeqS$$

- **Cálculo Bernoulli.**

Se toma como base de referencia a la línea de Succión, por lo tanto:

**Bernoulli de Descarga.**

$$Altura = 8 \text{ [m]} = 26,24 \text{ [Pie]}$$

$$B2 = Altura + \left( \frac{v^2}{64,4} \right) = 8,73 \left[ \frac{\text{Pie} * \text{Lbf}}{\text{Lbm}} \right]$$

**Bernoulli de Succión.**

$$Altura = 0 \text{ [m]} = 0 \text{ [Pie]}$$

$$B2 = Altura + \left( \frac{v^2}{64,4} \right) = 0,41 \left[ \frac{\text{Pie} * \text{Lbf}}{\text{Lbm}} \right]$$

- **Potencia Bomba.**

$$LeqD = 6 \text{ [m]} = 19,68 \text{ [Pie]}$$

$$LeqS = 4 \text{ [m]} = 13,12 \text{ [Pie]}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



$$B_d = B_2 + h_{fd} * LeqD = 9,86 \left[ \frac{Pie * Lbf}{Lbm} \right]$$

$$B_s = B_1 - h_{fs} * LeqS = 0,044 \left[ \frac{Pie * Lbf}{Lbm} \right]$$

Con una eficiencia del 60%.

$$-W = B_d - B_s = 9,8 \left[ \frac{Pie * Lbf}{Lbm} \right]$$

Finalmente Obtenemos.

$$BHP = \frac{Q * \rho * -W}{550 * 0,6} = 0,7$$

$$Potencia Nominal = BHP * 1,18 = 0,8$$

*Aproximadamente se necesita una Bomba de 1 [HP]*

c) Intercambiadores de Calor.

Intercambiador 1:

- **Balance de Masa.**

En los intercambiadores de calor, no existe un intercambio de masa, solo transferencia de energía. Es por este motivo que el balance de masa, sería simplemente “lo que entra es igual a lo que sale”.

- **Balance de Energía.**

Para conocer las temperaturas de las corrientes de salida, es necesario realizar un balance de energía. Para ello se realiza lo siguiente.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

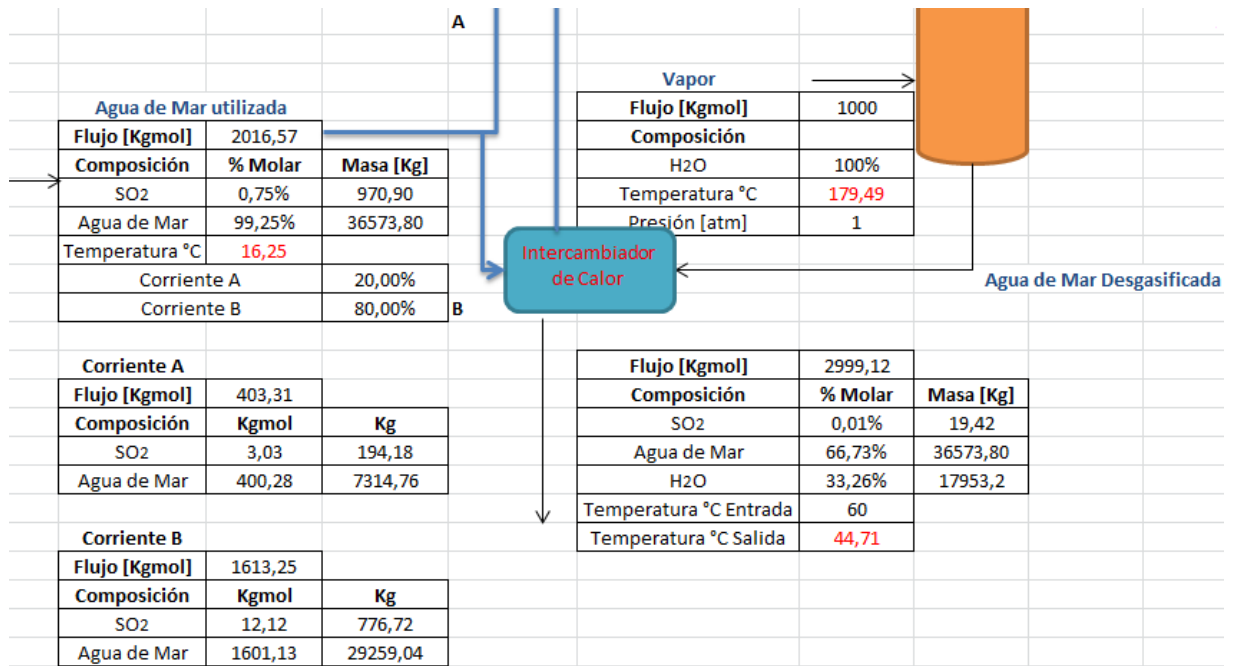


Figura 59. Datos sobre Intercambiador de Calor.

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, las temperaturas de salidas son isotérmicas y base de entalpia es a la entrada.

$$Q = n_{SO_2} \int_{298,25}^{(t+273)} cp_{SO_2} dt + n_{AguadeMarb} \int_{16,25}^t cp_{AguadeMar} dt + n_{AguadeMar} \int_{60}^t cp_{AguadeMar} dt + n_{SO_2} \int_{333}^{(t+273)} cp_{SO_2} dt + n_{H_2O} \int_{333}^{(t+273)} cp_{H_2O} dt$$

Remplazando, se obtiene:

$$0 = 12,13 \int_{298,25}^{(t+273)} 8,314 \cdot (5,699 + 0,000801 \cdot t - 101500 \cdot t^{-2}) dt + 29259,04 \int_{16,25}^t 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,0003 \cdot t^2 + 0,0092 \cdot t + 3,9059 dt + 36573,8 \int_{60}^t 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,0003 \cdot t^2 + 0,0092 \cdot t + 3,9059 dt + 0,303 \int_{333}^{(t+273)} 8,314 \cdot (5,699 + 0,000801 \cdot t - 101500 \cdot t^{-2}) dt + 997,4 \int_{333}^{(t+273)} 8,314 \cdot (8,712 + 0,00125 \cdot t - 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) dt$$

Finalmente, temperatura calculada.

$$t = 44,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

- **Cálculo de Dimensiones.**

<b>Q</b>	4021000	[BTU/h]
<b>LMTD</b>	58,13445	[°F]

Tubos:

<b>Masa</b>	146117,356	[Lb/hr]
<b>T Promedio</b>	125,438	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	1,331	[Lb/(pie hr)]
<b>Conductividad térmica</b>	0,374	[BTU/ (hr pie °F)]
<b>Flujo Volumétrico</b>	0,65045	[pie <sup>3</sup> /s]

Carcaza:

<b>Masa</b>	86971,148	[Lb/hr]
<b>T Promedio</b>	86,063	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	2,057	[Lb/(pie hr)]
<b>Conductividad térmica</b>	0,356	[BTU/ (hr pie °F)]

$$Velocidad\ Recomendada\ por\ tubo = 6 \left[ \frac{pie}{s} \right]$$

$$Área\ de\ flujo\ Recomendada = \frac{Flujo\ Volumétrico}{6} = 0,108409 [pie^2]$$

Suponer:

$$100 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * °F} \right]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Área Transferencia de Calor} = \frac{Q}{100 * LMTD} = 691,6725 \text{ [pie}^2\text{]}$$

<b>para tubos de 3/4 plg., BGW=16:</b>	<b>area de transf. por tubo:</b>	<b>0,1963</b>	<b>[pie^2/pie]</b>
	<b>DI(tubos):</b>	<b>0,052</b>	<b>[pie]</b>
	<b>area de flujo por tubo:</b>	<b>0,302</b>	<b>[plg^2]</b>

Suponer Largo:

$$16 \text{ [pies]}$$

$$\text{Número de Tubos} = \frac{\text{Área de Transferencia de Calor}}{\text{Área de Transferencia por Tubo} * 16} = 220,222 \rightarrow 221$$

<b>Buscar en tabla para tubos DE=3/4 [plg], arreglo en cuadro pt=1 [plg]</b>			
	<b>numero de tubos(st):</b>	<b>270</b>	
	<b>numero de pasos:</b>	<b>2</b>	
	<b>DI(carcaza):</b>	<b>1,77</b>	<b>[pie]</b>
	<b>pt:</b>	<b>1</b>	<b>[plg]</b>

Verificar si número de pasos es correcto, para ellos se realiza lo siguiente:

$$Z = \frac{Thi - Tho}{Tco - Tci}$$

$$Y = \frac{Tco - Tci}{Thi - Tci}$$

Donde  $Thi$  = temperatura de entrada del fluido caliente,  $Tho$  = temperatura de salida del fluido caliente,  $Tci$  = temperatura de entrada del fluido frío y  $Tco$  = temperatura de salida del fluido frío.

Reemplazando se obtiene:

$$Z = 0,54 \text{ e } Y = 0,65$$

Con los resultados obtenidos, nos metemos en la siguiente tabla:

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

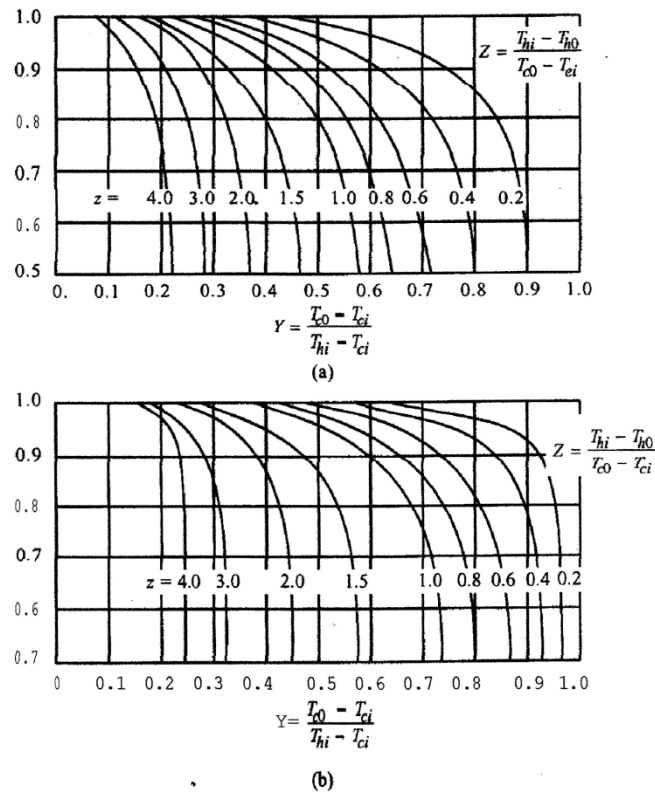


Figura 60. Factor de corrección FT para la media logarítmica de las diferencias de temperaturas: a) intercambiadores 1-2, b) intercambiadores 2-4. [Tomado de R. A. Borman, A. C. Mueller y W. M. Trans. A.S.M.E., 62. 284, 285 (1940).]

Se obtiene un valor de  $FT = 0,825$ . En general, no se recomienda un intercambiador de calor cuando  $FT < 0,75$ . De ser así, debe usarse otro arreglo de tubos y carcaza.

Una vez comprobado el intercambiador de calor, se hace una corrección para la media logarítmica de la diferencia de temperaturas. De esta forma se obtiene:

$$\Delta T = MLDT * FT = 70,47 * 0,825 = 58,14 \text{ } ^\circ F$$

Recalculo:

Área de Transferencia de Calor =

Número de Tubos(st) \* Número de Pasos \* Área de transferencia por Tubo \* Largo =  
1696,032

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Área de Transferencia de Calor Final} = \frac{1696,032}{2} = 848,016 \text{ [pie}^2\text{]}$$

**Tubo (Agua):**

$$\text{Área de Flujo} = \text{Área Recomendada} = 0,108409 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de Tubos} = \frac{\text{masa}}{\text{Área de Flujo}} = 1347840 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \text{Velocidad de Tubos} * \left( \frac{\text{DI}(\text{tubos})}{\text{Viscosidad}} \right) = 52657,91$$

$$pr = cp * \left( \frac{\text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} \right) = 3,558824$$

$$hi = 0,027 * \frac{\text{Conductividad Térmica}}{\text{DI}(\text{tubos})} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1 = 1774,8912$$

$$\text{Coeficiente de Pelicula} = 1476,709504$$

**Carcaza (SO2):**

$$\text{Diámetro equivalente en cuadro} = \frac{4 * \frac{pt^2 - \left( 3,14 * \left( \frac{0,75}{2} \right)^2 \right)}{3,14 * 0,75}}{12} = 0,07904 \text{ [pie]}$$

$$c = pt - 0,75 = 0,25 \text{ [pulg]}$$

$$B = \text{DI}(\text{carcaza}) * 12 = 21,25 \text{ [pulg]} \text{ Se Asume máximo espaciamiento de deflectores.}$$

$$\text{DI}(\text{carcaza}) = \text{DI}(\text{carcaza}) * 12 = 21,25 \text{ [pulg]}$$

$$\text{Área de Flujo} = \text{DI}(\text{carcaza}) * C * \frac{B}{144 * pt} = 0,784 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de Materia} = \frac{\text{masa}(\text{carcaza})}{\text{Área de Flujo}} = 110937,87 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \frac{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Velocidad de Materia}}{\text{Viscosidad}(\text{carcaza})} = 4262,93$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$pr = \frac{cp * \text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} = 5,78$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de Película} &= \frac{0,027 * \text{Conductividad Térmica}}{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1} \\ &= 174,84 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

**Global:**

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{\text{Coeficiente de Película(tubo)} * \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}{\text{Coeficiente de Película(tubo)} + \text{Coeficiente de Película(carcaza)}} \\ &= 156,33 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

$$U_d = \frac{Q}{\text{Área de Transferencia de Calor} * \text{LMTD}} = 81,56 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$\text{Factor de Obstrucción} = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} = 0,0058664$$

Intercambiadores 2, 3 y 4:

Los cálculos de los intercambiadores de calor, dieron como resultado intercambiadores demasiados pequeños. Por lo tanto, no se instalarán, sus resultados están descritos en el anexo

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

d) Condensador.

• Balance de Energía.

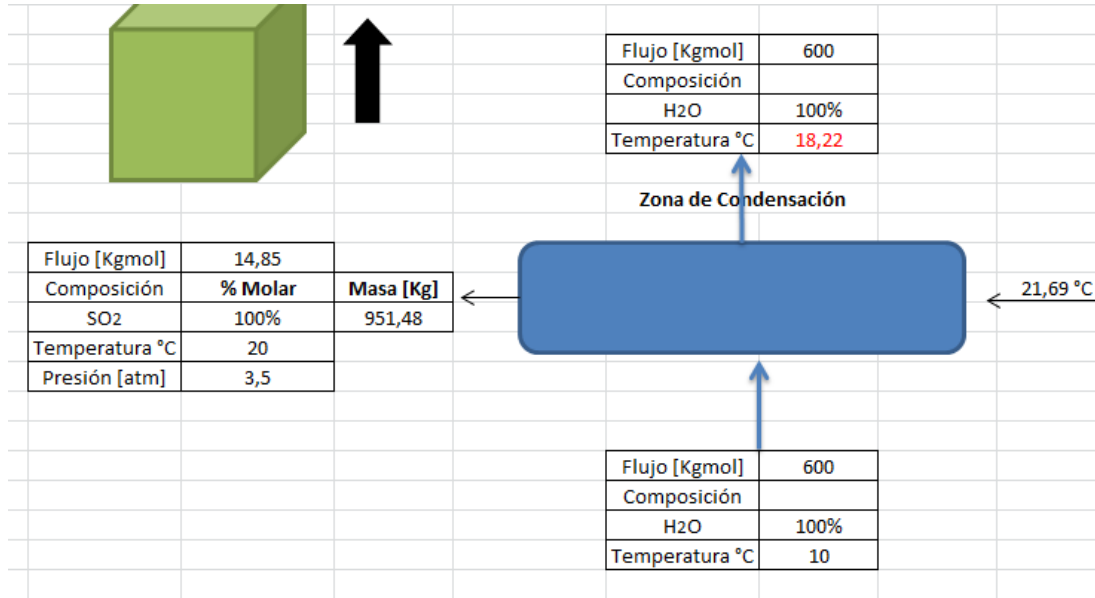


Figura 61. Datos sobre Condensador.

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, la temperaturas de salida es fijada a 20°C y base de entalpia es a la entrada.

$$Q_{\text{Condensación}} + Q_{H_2O} = 0$$

Desarrollando dicha expresión, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{\text{Condensación}} = n_{SO_2} * \int_{t_1}^{t_2} cp_{SO_2} dt - \text{Calor Latente}$$

$$Q_{\text{Condensación}} = 14,86 * \int_{294,69}^{293} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt - 24,92 * 14860$$

$$Q_{\text{Condensación}} = -3,713 * 10^5 [KJ]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Dado.

$$0 = 600 * \int_{283}^t 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) dt + Q_{\text{Condensación}}$$

Resolviendo Ecuación, se obtiene:

$$t = 291,219 \text{ } ^\circ K = 18,22 \text{ } ^\circ C$$

- **Cálculo de Dimensiones.**

<b>Q</b>	351909,8	[BTU/hr]
<b>LMTD</b>	11,07	[°F]

Agua:

<b>Masa</b>	23760	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	57,4	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	3,1218	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,342	[BTU/(hr pie °f)]

SO2:

<b>Masa</b>	2093,62	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	69,5	[°F]
<b>cp</b>	0,147	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	0,030008	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,126422835	[BTU/(hr pie °f)]
<b>Densidad</b>	141,1488	[lb/pie^3]
<b>gc</b>	4,18*10^8	

$$\text{Suponer } h_o = 200 \left[ \frac{BTU}{hr * pie * ^\circ F} \right]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

<b>tw</b>	57,5835	[°F]
<b>tf</b>	63,5417	[°F]

Suponer:

$$100 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * °F} \right]$$

$$\text{Área de Transferencia de Calor} = \frac{Q}{100 * LMTD} = 10,3138$$

<b>para tubos de 3/4 plg., BGW=16:</b>	<b>area de transf. por tubo:</b>	<b>0,1963</b>	<b>[pie^2/pie]</b>
	<b>DI(tubos):</b>	<b>0,052</b>	<b>[pie]</b>
	<b>area de flujo por tubo:</b>	<b>0,302</b>	<b>[plg^2]</b>

Suponer:

$$Largo = 16 \text{ [pie]}$$

$$\text{Número de Tubos} = \frac{\text{Área de Transferencia de Calor}}{\text{Área de Transferencia por tubo} * Largo} = 101,215 \rightarrow 102$$

<b>Buscar en tabla para tubos DE=3/4 [plg], arreglo en cuadro pt=1 [plg]</b>			
	<b>numero de tubos(st):</b>	<b>130</b>	
	<b>numero de pasos:</b>	<b>2</b>	
	<b>DI(carcaza):</b>	<b>1,4375</b>	<b>[pie]</b>
	<b>pt:</b>	<b>1</b>	<b>[plg]</b>

Recalculo:

$$\text{Área de Transferencia de Calor} =$$

$$\text{Número de Tubos(st)} * \text{Número de Pasos} * \text{Área de Transferencia por Tubo} * Largo = 816,608$$

**Tubo (agua):**

$$\text{Área de Flujo} = \text{Área Recomendada} = 0,136319444 \text{ [pie}^2\text{]}$$

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Velocidad de los Tubos} = \frac{\text{Masa(Agua)}}{\text{Área de Flujo}} = 174296,485 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \text{Velocidad de Tubos} * \left( \frac{\text{DI(tubos)}}{\text{Viscosidad}} \right) = 2903,2665$$

$$pr = cp * \left( \frac{\text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} \right) = 9,1281$$

$$hi = 0,027 * \frac{\text{Conductividad Térmica}}{\text{DI(tubos)}} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1 = 54,0238$$

$$\text{Coeficiente de Pelicula} = 44,9478$$

### **Carcaza (SO2):**

$$\text{Diámetro equivalente en cuadro} = \frac{4 * \frac{pt^2 - \left( 3,14 * \left( \frac{0,75}{2} \right)^2 \right)}{3,14 * 0,75}}{12} = 0,07904 \text{ [pie]}$$

$$c = pt - 0,75 = 0,25 \text{ [pulg]}$$

$$B = \text{DI(carcaza)} * 12 = 17,25 \text{ [pulg]} \text{ Se Asume máximo espaciamiento de deflectores.}$$

$$\text{DI(carcaza)} = \text{DI(carcaza)} * 12 = 17,25 \text{ [pulg]}$$

$$\text{Área de Flujo} = \text{DI(carcaza)} * C * \frac{B}{144 * pt} = 0,511660 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de Materia} = \frac{\text{masa(carcaza)}}{\text{Área de Flujo}} = 4052,6784 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$G'' = \frac{\text{masa}}{\text{Largo} * \text{Número de tubos}(\text{st})^{\frac{2}{3}}} = 5,0989$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de Película} &= \frac{0,027 * \text{Conductividad Térmica}}{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1} \\ &= 4557,4254 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**Global:**

$$U_c = \frac{\text{Coeficiente de Película(tubo)} * \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}{\text{Coeficiente de Película(tubo)} + \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}$$

$$= 44,5089 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * °F} \right]$$

$$U_d = \frac{Q}{\text{Área de Transferencia de Calor} * LMTD} = 38,9287 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * °F} \right]$$

$$\text{Factor de Obstrucción} = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} = 0,00322054$$

e) Compresores.

- Zona de Compresión I.

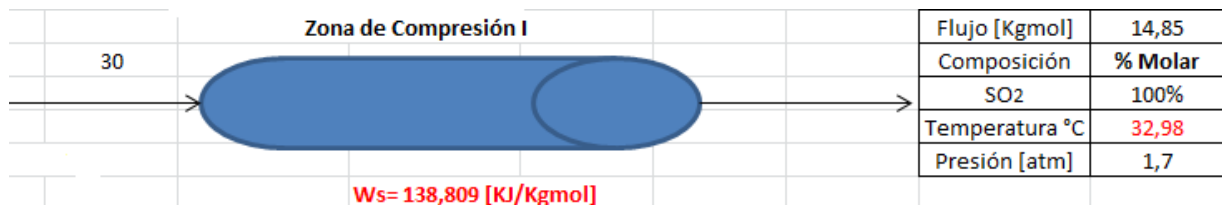


Figura 62. Compresor I

Inicialmente, se obtiene el siguiente trabajo:

$$CpSO_2 = 46,65 \left[ \frac{KJ}{Kmol * °K} \right]$$

$$T_2 = T_1 * \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{Cp}} = 32,976 °C$$

$$Ws = Cp * (T_2 - T_1) = 138,809 \left[ \frac{KJ}{Kgmol} \right]$$

$$\text{Potencia} = \frac{14,85 * 138,81 * 1000}{3600} = 572,6 \text{ [watt]} = 0,77 \text{ [hp]}$$

Al Eliminar el Intercambiador de calor, la temperatura inicial será más alta. Por lo tanto el trabajo a realizar será mayor. De esta forma se obtiene:

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$T2 = 41,692 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W_s = 545,436 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kgmol}} \right]$$

$$\text{Potencia} = 2249,94 \text{ [watt]} = 3,02 \text{ [hp]}$$

Por lo tanto el trabajo necesario a realizar, dependerá mucho de la temperatura inicial, si esta se logra enfriar antes de entrar a la zona de compresión. Es por esto que nuestro equipo debe de estar en el rango de 0,8 [hp] y 3 [hp].

- Zona Compresión II.

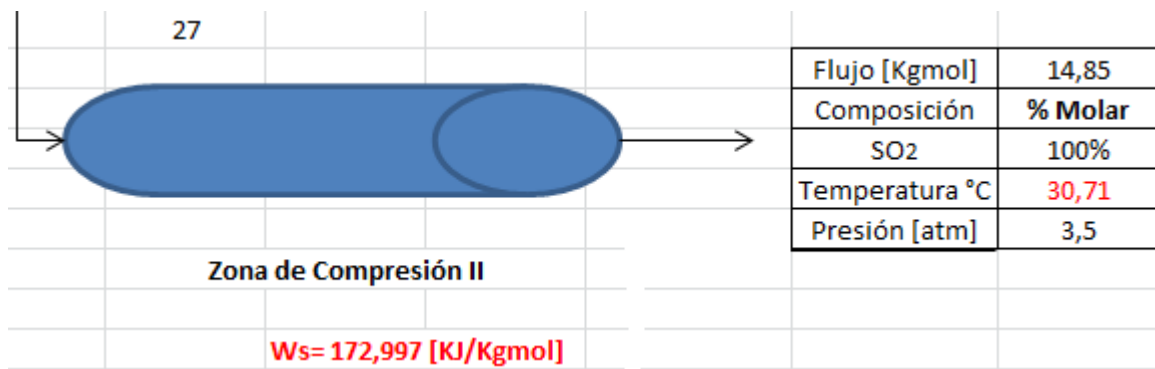


Figura 63. Compresor II.

De forma similar, se obtiene los siguientes resultados:

$$T2 = 30,708 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W_s = 172,997 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kgmol}} \right]$$

$$\text{Potencia} = 713,63 \text{ [watt]} = 0,96 \text{ [hp]}$$

Sin el Intercambiador de Calor, se obtiene:

$$T2 = 47,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W_s = 925,515 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{Kgmol}} \right]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Potencia = 3817,77 [watt] = 5,12 [hp]$$

Por lo tanto el trabajo necesario a realizar, dependerá mucho de la temperatura inicial, si esta se logra enfriar antes de entrar a la zona de compresión. Es por esto que nuestro equipo debe de estar en el rango de 1 [hp] y 5 [hp].

Para evitar mayor uso de energía en los compresores, se recomienda enfriar el gas con el medio externo, a medida que viaja hacia la zona de compresión.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## VIII. Resultados.

Para obtener distintos resultados, se simuló una semana de operación en la Planta de Fundición. Donde, por razones de procedencia de los concentrados, se obtienen distintos porcentajes de leyes. Obteniéndose lo siguiente:

Días		1	2	3	4	5	6	7				
entrado Pron	[t/h]	61,226	60	63	64	62	62,5	63,5				
Cu	%	24,108	27,119	28,029	26,562	28,452	26,642	27,443				
Fe	%	27,298	24,535	23,605	25,645	22,937	25,140	25,050				
S	%	29,309	29,056	29,081	28,504	29,321	28,932	28,215				
S/Cu		1,216	1,07	1,04	1,07	1,03	1,09	1,03				
Producto												
SO2 (liq.)	[Lt/h]	651,70	607,63	533,31	833,28	322,08	255,69	1173,27	Promedio día	625,28	[Lt/h]	
Producto de un Mes												
Producción	24	horas										
Volumen	15007	Lt										
En un mes	450	m <sup>3</sup>	SO2 (liq.)									
Nota: Va depender mucho de la Composición mineralógica.												
Días		1	2	3	4	5	6	7				
entrado Pron	[t/h]	61,226	60	63	64	62	62,5	63,5				
Cu	%	24,108	27,119	28,029	26,562	28,452	26,642	27,443				
Fe	%	27,298	24,535	23,605	25,645	22,937	25,140	25,050				
S	%	29,309	29,056	29,081	28,504	29,321	28,932	28,215				
S/Cu		1,216	1,07	1,04	1,07	1,03	1,09	1,03				

Gas Fugitivo												
Flujo	[Nm <sup>3</sup> /h]	13854,63	13795,75	13642,03	14256,85	13227,51	13059,31	14967,45	Promedio día Total	13829,08	[Nm <sup>3</sup> /h]	
SO2	%	2,67%	2,50%	2,22%	3,32%	1,38%	1,11%	4,45%				
N2	%	74,33%	74,43%	74,49%	74,23%	74,71%	74,71%	74,00%	Promedio SO2 día	355,10	[Nm <sup>3</sup> /h]	
O2	%	19,76%	19,82%	20,03%	19,25%	20,59%	20,84%	18,42%				
H2O	%	3,24%	3,25%	3,27%	3,20%	3,32%	3,33%	3,13%				
Producido en un Mes												
Producción	24	horas										
En un mes	255672,73	[Nm <sup>3</sup> /mes]										
Gas Limpio												
Flujo	[Nm <sup>3</sup> /h]	12890,57	12857,06	12748,59	13181,03	12461,67	12335,29	13684,29	Promedio día Total	12879,79	[Nm <sup>3</sup> /h]	
SO2	%	0,14%	0,13%	0,11%	0,17%	0,07%	0,06%	0,23%				
N2	%	76,27%	76,24%	76,09%	76,65%	75,70%	75,51%	77,27%	Promedio SO2 día	16,95	[Nm <sup>3</sup> /h]	
O2	%	20,27%	20,30%	20,46%	19,88%	20,87%	21,06%	19,24%				
H2O	%	3,32%	3,33%	3,34%	3,30%	3,36%	3,37%	3,26%				
Producido en un Mes												
Producción	24	horas										
En un mes	12203,81	[Nm <sup>3</sup> /mes]										

Figura 64. Operación de Fundición en una Semana.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

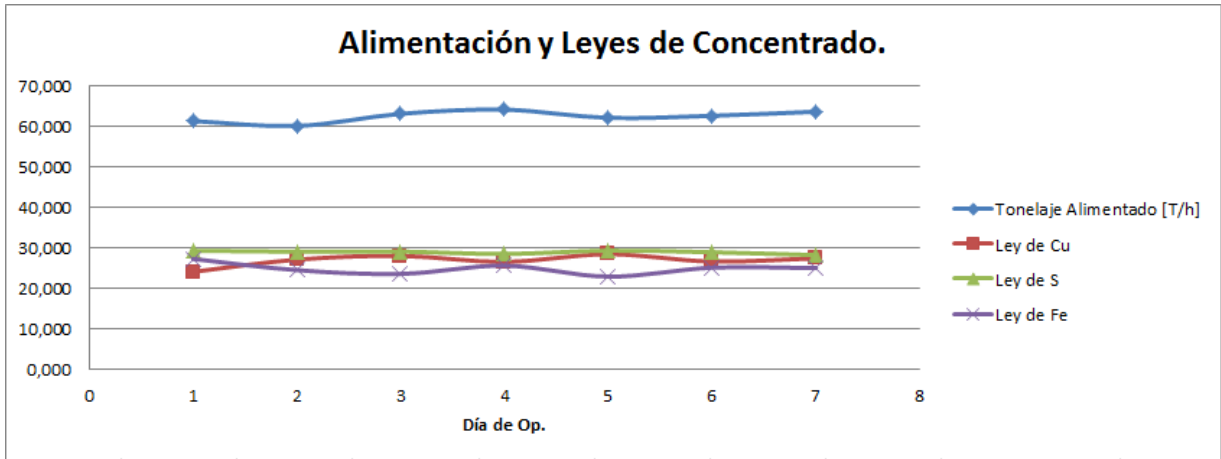


Figura 65. Tonelaje Promedio por día de Operación y sus respectivas leyes.



Figura 66. Correspondencia entre concentrado Alimentado y Gases Emitidos.

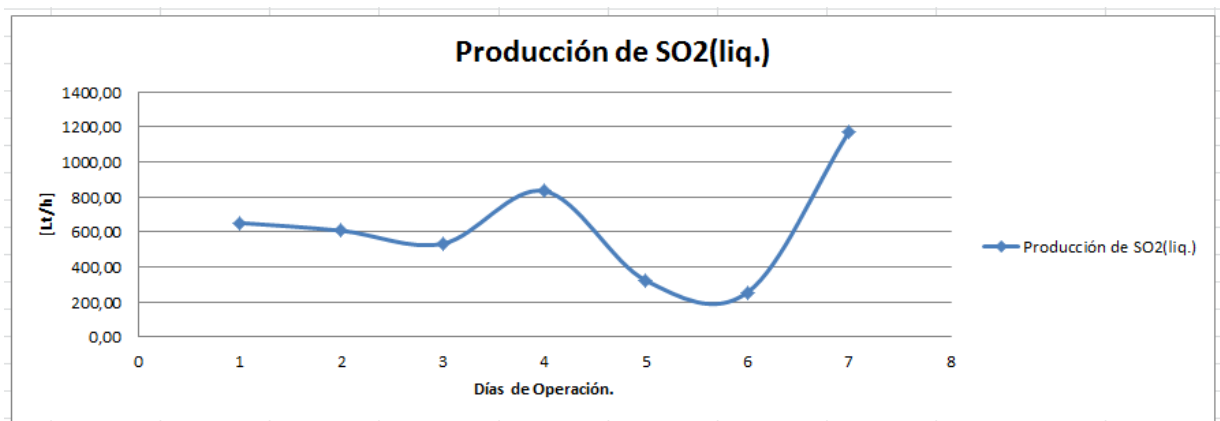


Figura 67. Producción de Dióxido de Azufre Líquido.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



La producción de Dióxido de Azufre líquido tiene directa relación con la producción de gases fugitivos.

Como se puede apreciar en la figura 65. Mientras mas tonelaje se alimente y las leyes de Cu, Fe y S converjan, más cantidad de Dióxido de azufre es producido y por ende mayor gas fugitivos liberado. Por lo tanto hay que tener muy presente la alimentación objetivo que se quiere lograr.

En la Figura 66. Se puede apreciar la diferencia entre la liberación de Gases fugitivos, Con y sin la Planta de Tratamiento. Demostrando claramente la gran diferencia que dicha planta puede llegar a lograr. Reduciendo los niveles de SO<sub>2</sub> prácticamente al mínimo, eliminando los malestares y problemas que este gas atrae.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## IX. Análisis Económico.

A continuación, se realizará un estudio económico. Indicando el Costo que involucra la implementación de la Planta.

Equipos Principales	Costo FOB US\$	Cantidad	Fuente	Material	Características de Diseño	Total
Ventiladores	\$ 1.975,98	4	Grandpa's Basement NY	Anticorrosivo	15 [Nm <sup>3</sup> /h]	\$ 7.903,92
Absorbedor Vertical	\$ 54.635,23	1	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	5,6 [m] de Altura y 1 [m] de diámetro	\$ 54.635,23
Eyectores	\$ 3.069,00	6	Matches	Carbon Steel	3 [hp]	\$ 18.414,00
Bombas	\$ 400,00	12	Costa Mesa, California, United States	Acero Inoxidable 316	1 [hp]	\$ 4.800,00
Intercambiadores de Calor	\$ 22.148,23	1	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	Área Transf. 79 m <sup>2</sup>	\$ 22.148,23
Separador Flash	\$ 87.535,94	1	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	34,13 [m <sup>3</sup> ]	\$ 87.535,94
Caldera	\$ 19.150,00	1	Matches	Carbon Steel	150 [psi] de Saturación	\$ 19.150,00
Torre de Relleno	\$ 75.751,85	1	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	10 [m] de Altura y 0,5 [m] de diámetro	\$ 75.751,85
Adsorvedores	\$ 32.413,60	2	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	4 [m] de Altura y 0,5 [m] de diámetro	\$ 64.827,20
Compresores	\$ 6.000,00	2	Matches	Carbon Steel	5 [hp]	\$ 12.000,00
Condensador	\$ 21.319,47	1	Peter and Timmerhaus	Acero Inoxidable 316	Área Transf. 76 m <sup>2</sup>	\$ 21.319,47
					<b>Total</b>	\$ 388.485,84
					<b>Costo CIF US\$</b>	\$ 485.607,30
				<b>Método de LANG</b>	<b>Coste de Planta</b>	<b>\$ 2.301.778,60</b>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

<b>Capital Fijo Directo</b>	%	
Costo CIF de Equipos Principales	100%	\$ 485.607,30
Instalación Equipos	47%	\$ 228.235,43
Instrumentación y Control	36%	\$ 174.818,63
Cañerías (Instaladas)	68%	\$ 330.212,96
Sistemas Eléctricos (Instalados)	11%	\$ 53.416,80
Construcciones	18%	\$ 87.409,31
Preparación de Terrenos	10%	\$ 48.560,73
Servicios (Instalados)	70%	\$ 339.925,11
<b>Total</b>		<b>\$ 1.748.186,28</b>
<b>Capital Fijo Indirecto</b>	%	
Ingeniería y Supervisión	33%	\$ 160.250,41
Gastos de Construcción	41%	\$ 199.098,99
Gastos Legales	4%	\$ 19.424,29
Honorario Contratista	22%	\$ 106.833,61
Contingencias	44%	\$ 213.667,21
<b>Total</b>		<b>\$ 699.274,51</b>
<b>Total Capital Fijo</b>		<b>\$ 2.447.460,79</b>
<b>Capital de Trabajo</b>		
<b>Total</b>		<b>\$ 367.119,12</b>
<b>Capital Total Inversión</b>		<b>\$ 2.814.579,91</b>
Factor Contingencia	10%	
<b>Capital Total</b>		<b>\$ 3.096.037,90</b>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## X. Conclusión.

Como se puede apreciar, los gases de Dióxido de Azufre, se ven disminuidos de forma dramática, a través de la tecnología elegida y desarrollada. Sin embargo, depende de cada uno de nosotros realizar un cambio profundo en las mentalidades de las personas. Esta memoria demuestra con datos tangibles una solución para los contaminantes enviados al medio ambiente. Sin embargo si nadie hace nada y no se toma en serio el daño que se hace ha dicho medio, simplemente queda como una buena idea.

Por otro lado las empresas poseen los medios suficientes, para poder implementar tecnologías capaces de solucionar los problemas. Sin embargo volvemos a caer en lo mismo. Si no existe una presión del medio, las compañías no cambian su pensamiento y simplemente desean ser el mayor productor sin importar las consecuencias no monetarias.

La idea de una Fundición limpia y transparente con su entorno, no es ciencia ficción como fue demostrada. Si no una realidad, que los futuros Ingenieros Civiles tienen que llevar a cabo.

Finalmente, la planta de Agua de Mar, nos permite limpiar los gases provenientes de fundición y así reducir en un 95 % los niveles presentes en la atmosfera. Sin embargo la tecnología avanza muy rápidamente, lo que hoy se considera como última tecnología, pasado un año ya podría ser fácilmente superado. Por lo tanto hay que estar investigando sobre los avances tecnológicos ocurridos en el mundo, quizás en un futuro no muy lejano, se invente tecnología similar a los haces de electrones, pero que no sea necesario utilizar amoniaco para su proceso. De esta manera convertirla apta para nuestro país y mejorar aun más el tratamiento de limpieza.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## XI. Bibliografía.

1. Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus and Ronalds E. West.  
“Plant Design and Economics for Chemical Engineers”.  
Fifth Edition.
2. David M. Himmelblau.  
1997  
“Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química”.  
Sexta Edición.
3. Smith, Van Ness y Abbott.  
“Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”.  
Quinta Edición.
4. Felder y Rousseau.  
“Principios elementales de los procesos químicos”.  
Tercera Edición.
5. C. J. Geankoplis.  
“Procesos de transporte y operaciones unitarias”.  
Tercera Edición.
6. Robert H. Perry and Don W. Green.  
“Chemical Engineers’ Handbook”.  
Virtual Edition.
7. G. V. Reklaitis.  
“Balances de Materia y Energía”.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

8. "Yacimientos de Cobre". Visitada 6 Agosto 2011  
[http://www.codelco.cl/cu\\_zonacobre/cobre.asp](http://www.codelco.cl/cu_zonacobre/cobre.asp)
9. "Historia del Cobre". Visitada 9 Mayo 2011  
<http://www.codelco.cl/coleccion/genesis.html>
10. "Procesos mineros en Chile". Visitada 14 Mayo 2011  
<http://mineriachilena-edodelabarra.blogspot.com/2009/09/pregunta-1.htmlert>
11. Albert Parker.  
"Contaminación del aire por la industria".  
Editorial reverté.
12. J. Glynn Henry y Gary W.Heinke.  
"Ingeniería Ambiental".  
Segunda Edición.
13. Patricia Luis Alconero.  
"Intensificación del proceso de absorción de dióxido de azufre mediante contacto no dispersivo y líquidos iónicos".  
Memoria de tesis doctoral presentada para optar al título de doctor por la universidad de Cantabria.
14. Norman W.Frank y Vitomir Markovic  
"Tratamiento de los gases de combustión por haces electrónicos: Purificación del aire".  
Crónicas.
15. "Información sobre Cal". Visitada 20 Agosto 2011.  
<http://www.cbb.cl/cementos/preguntasFrecuentes.aspx?Id=4>

---

"Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre."

16. "Minería en Chile". Visitada 13 Septiembre 2011.  
[http://www.mch.cl/revistas/index\\_neo.php?id=681](http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=681)
17. "Oxido de Calcio". Visitada 22 Agosto 2011.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Cal>
18. "Minerales y Productos Químicos para la Agricultura". 9 Septiembre 2011.  
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Enciclopedia OIT/tomo2/62.pdf>
19. Alain Bill, ALSTOM, Environmental Control Systems  
"Tecnologías de Desculturización de ALSTOM: Reduciendo emisiones de óxidos de azufre en plantas de generación de energía."  
Levallois-Perret (Paris), Francia.  
Svein-Ole Strommen, ALSTOM, Enviromental Control Systems Oslo, Noruega.
20. "Area Minera". Visitada 21 Agosto 2011.  
[http://www.aminera.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=10403&Itemid=2](http://www.aminera.com/index.php?option=com_content&task=view&id=10403&Itemid=2)
21. "Hoja de Seguridad". Visitada 23 Agosto 2011.  
<http://www.dalbertinternacional.com/adminweb/msds/MSDS%20CARBON%20ACTIV ADO.pdf>
22. "Ácido Sulfúrico". Visitada 23 Septiembre 2011.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido\\_sulf%C3%BArico](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_sulf%C3%BArico)
23. "Hoja de Seguridad: Citrato de Sodio". Visitada 20 Septiembre 2011.  
<http://www.ctr.com.mx/pdfcert/Citrato%20de%20Sodio%20Di-hidratado.pdf>
24. "Obtención y aplicaciones del Azufre". Visitada 27 Septiembre 2011.  
<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/azufre/obtencion-aplicaciones>

---

"Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre."

25. "Hoja Informativa sobre sustancias Peligrosas". Visitada 28 Septiembre 2011.  
<http://www2.udec.cl/matpel/sustanciaspdf/d/DIMETILANILINA.pdf>
26. "Hoja de Seguridad: NH<sub>2</sub>". Visitada 3 Octubre 2011.  
[http://www.e-seia.cl/archivos/A2.4.\\_NH3\\_Hoja\\_Seguridad.pdf](http://www.e-seia.cl/archivos/A2.4._NH3_Hoja_Seguridad.pdf)
27. "Las Zeolitas". Visitada 10 Octubre 2011.  
<http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=%20%20%3E%20%2050&tc=3&nc=5&art=1331>
28. "Hoja de Seguridad: Cal Viva". Visitada 5 Octubre 2011.  
[http://seia.sea.gob.cl/archivos/HDS\\_-\\_Cal.pdf](http://seia.sea.gob.cl/archivos/HDS_-_Cal.pdf)
29. "Dioxido de Azufre". Visitada 1 Agosto 2011.  
<http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180331&idsec=1573>
30. "Los Óxidos de Azufre y la Salud". Visitada 4 Septiembre 2011.  
[http://www.peruecologico.com.pe/lib\\_c24\\_t04.htm](http://www.peruecologico.com.pe/lib_c24_t04.htm)
31. "Revista Técnicos Mineros". Visitada 25 Septiembre 2011.  
[http://www.revistatecnicosmineros.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9124:-norma-de-emision-de-fundiciones-no-se-evaluara-hasta-marzo-&catid=17:noticias](http://www.revistatecnicosmineros.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9124:-norma-de-emision-de-fundiciones-no-se-evaluara-hasta-marzo-&catid=17:noticias)
32. "Environmental Protection Technologies". Visitada 2 Julio 2011.  
[http://www.brain-c-jcoal.info/cctinjapan-files/english/2\\_5B3.pdf](http://www.brain-c-jcoal.info/cctinjapan-files/english/2_5B3.pdf)
33. "Propiedades físicas de agua y agua de mar". Visitada 16 Mayo 2011.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/maru\\_j\\_ms/apendiceA.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/maru_j_ms/apendiceA.pdf)

---

"Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre."



34. "El agua de Mar". Visitada 4 Diciembre 2011.  
<http://www.hannachile.com/noticias-articulos-y-consejos/articulos/item/246-el-agua-de-mar>
  
35. "Dirección Meteorológica de Chile". Visitada 4 Enero 2012.  
<http://164.77.222.61/climatologia/>
  
36. "Gas Viscosity Calculator". Visitada 15 Enero 2012.  
<http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm>
  
37. "Journal of Chemical & Engineering data". Visitada 20 Enero 2012.  
<http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/je049833l>
  
38. "Hoja de Seguridad: Ácido Sulfúrico". Visitada 20 Enero 2012.  
[http://www.cisproquim.org.co/HOJAS\\_SEGURIDAD/Acido\\_sulfurico.pdf](http://www.cisproquim.org.co/HOJAS_SEGURIDAD/Acido_sulfurico.pdf)

---

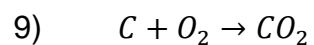
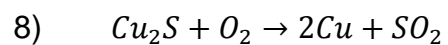
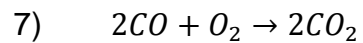
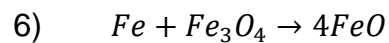
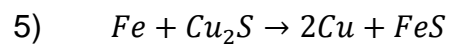
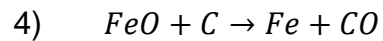
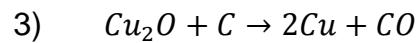
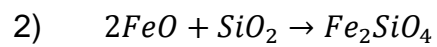
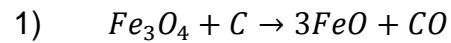
"Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre."

## XII. Anexo de Cálculos.

### 12.1 Horno Eléctrico

#### *Obtención de las Reacciones químicas involucradas*

Primordial, de aquí uno puede obtener toda la información.



---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### ✚ **Obtención de datos de Propiedades químicas de los diferentes compuestos**

Este punto fue extremadamente complicado de llevar a cabo, debido que propiedades químicas de compuestos metalúrgicos es extremadamente escasa. Luego de varios días navegando por la Red de Internet, debido que en Bibliografía física no bastaba, se encontró una base de datos, la cual posee información sobre entalpías de formación y energía libre de Gibbs para varios compuestos Inorgánicos.

### ✚ **Cálculo de constantes de equilibrio inicial de cada reacción química propuesta y llevarla a la temperatura a la cual estaría trabajando el Horno Eléctrico**

A continuación se escribirá la manera de cómo realizar los cálculos y los resultados de cada reacción.



i. Determinación de Constante de equilibrio inicial:

A continuación se presenta una tabla de Propiedades termodinámicas, Entalpía de Formación-Energía libre de Gibbs-Capacidad Calorífica, para cada compuesto respectivo:

Datos Propiedades	$Fe_3O_4$	$C$	$FeO$	$CO$
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-1119550,32	0	-270551,02	-110525
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-1014670,98	0	-248612,19	-137169
Cp.[J/mol*K]	A	B	C	D

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Por falta de espacio, las capacidades caloríficas de los distintos compuesto, son representadas por una letra, a continuación se muestra su representación.

$$A = 8,314 * (41,17 + 0,01882 * T - 979500 * T^{-2})$$

$$B = 8,314 * (2,673 + 0,002617 * T - 116900 * T^{-2})$$

$$C = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$D = 8,314 * (6,6 + 0,0012 * T)$$

Cálculo de la energía libre de Gibbs para la reacción 1.

$$\Delta G_1 = \sum (\gamma_i * \Delta G^{\circ}_i)$$

$$\Delta G_1 = 131665,41 \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (\text{No es favorable Naturalmente.})$$

Donde  $\gamma_i$  representa a la estequiometría de cada compuesto químico.

Si el valor del producto final es positivo, diremos que no es favorable naturalmente, o sea hay que entregar energía externa a dicha reacción para que se lleve a cabo. Y si da como producto final un valor negativo, diremos pues, que es favorable naturalmente. Sucediendo en forma casi espontanea.

Realizado el paso anterior, podemos proceder en calcular la constante de equilibrio inicial, a través de la siguiente fórmula:

$$\ln K_0 = - \frac{\Delta G_1}{R * T} = -53,14$$

$$K_{0_1} = 8,32 * 10^{-24}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Nota: Para este ejemplo en específico, se asumió que el Horno Eléctrico, opera a 1200°C.

ii. Determinación de Constante a 1200°C:

Debido, que se calculó la constante de equilibrio inicial, ahora debemos proceder a llevarla al punto de temperatura en el cual esta sucediendo dicha reacción. Para ellos se realiza lo siguiente:

$$\Delta H_r i = \Delta H_r^\circ i + \int_{298}^T \sum (\gamma_i * C_{pi}) dT$$

Donde:

$$\Delta H_r^\circ i = \sum (\gamma_i * \Delta H^\circ i) = 197372,26 \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (\text{Endotérmica})$$

$$\sum (\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (0,61 - 0,015761 * T + 867800 * T^{-2})$$

Por lo Tanto:

$$\Delta H_r i = 197372,26 + \int_{298}^T 8,314 * (0,61 - 0,015761 * T + 867800 * T^{-2}) dT$$

$$\Delta H_r i = 197372,26 + 8,314 * (-15,48 + 0,02524 * T - 41000 * T^{-2} - 0,00000249 * T^2) * (T - 298)$$

Finalmente para calcular  $K_i$ , se reemplaza  $\Delta H_r i$  y  $K_{01}$ , calculados anteriormente, en la siguiente ecuación, integrando hasta 1200 °C.

$$\ln K_i = \ln K_{0i} + \int_{298}^T \frac{\Delta H_r i}{8,314 * T^2} dT$$

$$\ln K_i = \ln K_{0i} + \int_{298}^{1200} \frac{(197372,26 + 8,314 * (-15,48 + 0,02524 * T - 41000 * T^{-2} - 0,00000249 * T^2) * (T - 298))}{8,314 * T^2} dT$$

Donde se obtiene, la constante de equilibrio a la temperatura deseada.

$$K_1 = 3,82$$

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Dichos pasos, mencionados anteriormente. Se repiten para todas las ecuaciones químicas propuestas.

• **Ecuación 2:**  $2FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$

Datos Propiedades	<i>FeO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub></i>
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-270551,02	-855677,25	-1145089,8
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-248612,19	-801353,52	-1046888,41
Cp.[J/mol*K]	C	E	F

$$C = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$E = 8,314 * (10,95 + 0,0055 * T)$$

$$F = 8,314 * (33,57 + 0,01907 * T - 879700 * T^{-2})$$

$$\Delta G_2 = 251689,49 \left[ \frac{J}{mol} \right]$$

$$\ln K_{O_2} = -\frac{\Delta G_2}{R * T} = -101,59$$

$$K_{O_2} = 7,59 * 10^{-45}$$

$$\Delta H_{r^{\circ 2}} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ i}) = 251689,49 \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (\text{Endotérmica})$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-2,62 + 0,010586 * T - 727300 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_2 = 7,03 * 10^{-8}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

• **Ecuación 3:**  $Cu_2O + C \rightarrow 2Cu + CO$

Datos Propiedades	$Cu_2O$	$C$	$Cu$	$CO$
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-166890	0	0	-110525
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-146360	0	0	-137169
Cp.[J/mol*K]	G	B	H	D

$$G = 63,6$$

$$B = 8,314 * (2,673 + 0,002617 * T - 116900 * T^{-2})$$

$$H = 8,314 * 7,5$$

$$D = 8,314 * (6,6 + 0,0012 * T)$$

$$\Delta G_3 = 9191 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{03} = -\frac{\Delta G_3}{R * T} = -3,71$$

$$K_{03} = 2,45 * 10^{-2}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}3} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = 56365 [\frac{J}{mol}] \quad (\text{Endotérmica})$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = -63,6 + 8,314 * (18,927 - 0,001417 * T + 116900 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_3 = 7005770475,14$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

• **Ecuación 4:**  $FeO + C \rightarrow Fe + CO$

Datos Propiedades	<i>FeO</i>	<i>C</i>	<i>Fe</i>	<i>CO</i>
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-270551,02	0	0	-110525
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-248612,19	0	0	-137169
Cp.[J/mol*K]	C	B	I	D

$$C = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$B = 8,314 * (2,673 + 0,002617 * T - 116900 * T^{-2})$$

$$I = 8,314 * 8,4$$

$$D = 8,314 * (6,6 + 0,0012 * T)$$

$$\Delta G_4 = 111443,19 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{04} = -\frac{\Delta G_4}{R * T} = -44,98$$

$$K_{04} = 2,92 * 10^{-20}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}4} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = 160026,02 [\frac{J}{mol}] \text{ (Endotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-0,293 - 0,002909 * T + 193100 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_4 = 99,48$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



• **Ecuación 5:**  $Fe + Cu_2S \rightarrow 2Cu + FeS$

Datos Propiedades	<i>Fe</i>	<i>Cu<sub>2</sub>S</i>	<i>Cu</i>	<i>FeS</i>
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	0	-79423,6	0	-94956,62
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	0	-86080,61	0	-97489,64
Cp.[J/mol*K]	I	J	H	K

$$I = 8,314 * 8,4$$

$$J = 8,314 * 20,9$$

$$H = 8,314 * 7,5$$

$$K = 8,314 * (12,05 + 0,00273 * T)$$

$$\Delta G_5 = -11409,03 [\frac{J}{mol}] \quad (\text{Favorable Naturalmente})$$

$$\ln K_{05} = -\frac{\Delta G_5}{R * T} = 4,6$$

$$K_{05} = 99,48$$

$$\Delta H_{r^{\circ}5} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = -15533,02 [\frac{J}{mol}] \quad (\text{Exotérmica})$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-2,25 + 0,00273 * T)$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_5 = 0,75$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

• **Ecuación 6:**  $Fe + Fe_3O_4 \rightarrow 4FeO$

Datos Propiedades	<i>Fe</i>	<i>Cu<sub>2</sub>S</i>	<i>Cu</i>	<i>FeS</i>
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	0	-79423,6	0	-94956,62
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	0	-86080,61	0	-97489,64
Cp.[J/mol*K]	I	J	H	K

$$I = 8,314 * 8,4$$

$$A = 8,314 * (41,17 + 0,01882 * T - 979500 * T^{-2})$$

$$C = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$\Delta G_6 = 20222,22 \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (\text{Favorable Naturalmente})$$

$$\ln K_{06} = -\frac{\Delta G_6}{R * T} = -8,16$$

$$K_{06} = 2,86 * 10^{-4}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}6} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = 37346,24 \left[ \frac{J}{mol} \right] \quad (\text{Exotérmica})$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (0,91 - 0,012852 * T + 674700 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_6 = 3,84 * 10^{-2}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Datos Propiedades	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-110525	0	-393509
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-137169	0	-394359
Cp.[J/mol*K]	D	L	M

$$D = 8,314 * (6,6 + 0,0012 * T)$$

$$L = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$M = 8,314 * (10,34 + 0,00274 * T - 195500 * T^{-2})$$

$$\Delta G7 = -514380 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K07 = -\frac{\Delta G7}{R * T} = 207,61$$

$$K0_7 = 1,46 * 10^{90}$$

$$\Delta Hr^{o7} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{oi}) = -565968 [\frac{J}{mol}] \text{ (Exotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * Cp_i) = 8,314 * (-1,24 + 0,002822 * T - 203300 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K7 = 201690463465$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

• **Ecuación 8:**  $Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$

Datos Propiedades	$Cu_2S$	$O_2$	$Cu$	$SO_2$
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-79423,6	0	0	-296830
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-86080,61	0	0	-300194
Cp.[J/mol*K]	J	L	H	N

$$J = 8,314 * 20,9$$

$$L = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$H = 8,314 * 7,5$$

$$N = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G_8 = -214113,39 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{08} = -\frac{\Delta G_8}{R * T} = 86,42$$

$$K_{08} = 3,4 * 10^{37}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}8} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = -217406,4 [\frac{J}{mol}] \text{ (Exotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-6,92 + 0,005042 * T + 187700 * T^{-2} - 0,00000083 * T^2)$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_8 = 1397226,84$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

• **Ecuación 9:**  $C + O_2 \rightarrow CO_2$

Datos Propiedades	C	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	0	0	-393509
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	0	0	-394359
Cp.[J/mol*K]	B	L	Ñ

$$B = 8,314 * (2,673 + 0,002617 * T - 116900 * T^{-2})$$

$$L = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$\tilde{N} = 8,314 * (10,34 + 0,00274 * T - 195500 * T^{-2})$$

$$\Delta G^0 = -394359 \left[ \frac{J}{mol} \right]$$

$$\ln K_{09} = - \frac{\Delta G^0}{R * T} = 159,17$$

$$K_{09} = 1,34 * 10^{69}$$

$$\Delta H_{r^09} = \sum(\gamma_i * \Delta H^0_i) = -393509 \left[ \frac{J}{mol} \right] \text{ (Exotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-1,052 - 0,000135 * T + 109100 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_9 = 5,96 * 10^{13}$$

---

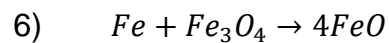
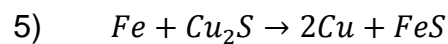
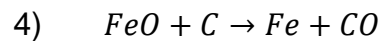
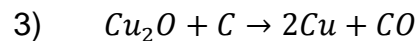
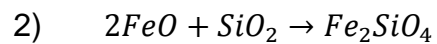
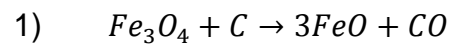
“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## **Identificación de reacciones dependientes**

Se debe realizar para que no se trabaje con reacciones dependientes de otras, puesto lleva como consecuencia cálculos erróneos cuando se realicen los métodos numéricos que correspondan. Para eliminar reacciones hay que realizar lo siguiente:

- ✓ Se debe tener presentes todas las reacciones principales que intervienen en el proceso.

Estas son:



---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

- ✓ Identificar los coeficientes estequiométricos de cada reacción e ir anotándolos en una matriz.

Compuestos	RXO 1	RXO2	RXO3	RXO4	RXO5	RXO6
<b>Fe3O4</b>	-1	0	0	0	0	-1
<b>C</b>	-1	0	-1	-1	0	0
<b>FeO</b>	3	-2	0	-1	0	4
<b>SiO2</b>	0	-1	0	0	0	0
<b>Cu2O</b>	0	0	-1	0	0	0
<b>Fe</b>	0	0	0	1	-1	-1
<b>Cu2S</b>	0	0	0	0	-1	0
<b>CO</b>	1	0	1	1	0	0
<b>Fe2SiO4</b>	0	1	0	0	0	0
<b>Cu</b>	0	0	2	0	2	0
<b>FeS</b>	0	0	0	0	1	0

- ✓ Una vez obtenida la matriz, hay que ir convirtiendo en 1 al primer número de la columna y los números que están en su fila hay que convertirlos en ceros. A continuación se mostrarán los dos primeros pasos, para finalmente mostrar el resultado final.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

PASO 1: Escribiendo matriz.

-1	0	0	0	0	-1
-1	0	-1	-1	0	0
3	-2	0	-1	0	4
0	-1	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0
0	0	0	1	-1	-1
0	0	0	0	-1	0
1	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	2	0	2	0
0	0	0	0	1	0

PASO 2: Convertir en 1, al primer número de la Columna.

1	0	0	0	0	-1
1	0	-1	-1	0	0
-3	-2	0	-1	0	4
0	-1	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0
0	0	0	1	-1	-1
0	0	0	0	-1	0
-1	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	2	0	2	0
0	0	0	0	1	0

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



*PASO 3: Convertir en ceros a los números que acompañan en la fila.*

1	0	0	0	0	0
1	0	-1	-1	0	1
-3	-2	0	-1	0	1
0	-1	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0
0	0	0	1	-1	-1
0	0	0	0	-1	0
-1	0	1	1	0	-1
0	1	0	0	0	0
0	0	2	0	2	0
0	0	0	0	1	0

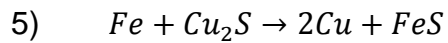
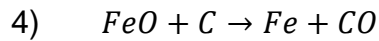
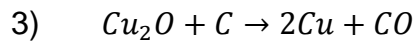
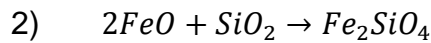
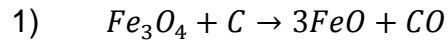
*PASO FINAL: Obtenemos la matriz calculada.*

1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0
-4	-1	1	2	0	0
0	0	0	0	1	0
3	1	0	-2	1	0
0	0	-1	0	0	0
0	0	0	-1	0	0
2	0	-2	0	-2	0
-3	-1	0	2	-1	0

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Como se puede apreciar, la última columna que corresponde a la reacción 6, da como resultado puros ceros. Esto nos señala que aquella reacción es dependiente de las demás reacciones y podemos eliminarla. Así finalmente nuestras reacciones principales que participan en la reacción son 5, las cuales son:



### **Formación del equilibrio químico**

Una vez obtenidas las reacciones independientes, damos paso a la formación de su equilibrio químico.

- ✓ *Nota: Se asume que las reacciones se llevan a cabo en un medio líquido, los equipos no son adiabáticos ni cerrados.*
- ✓ *Nota 2: Al ser no cerrados, las presiones se mantienen bajas. Si las presiones son bajas y existe una ausencia de datos para los coeficientes de actividad se supone que las especies que reaccionan forman una solución ideal.*

$$K_n = \frac{x_i * x_j}{x_h * x_k}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Dónde:  $x_{i,j,h,k} = \frac{n_{i,j,h,k}}{n_{Total}}$

$n_{i,j,h,k}$  = Moles finales de Compuesto i, j, h, k según sea el caso.

$n_{Total}$  = Moles Totales

- **Ecuación 1.**

$$K1 = \frac{x_{FeO^3} * x_{CO}}{x_{Fe_3O_4} * x_C}$$

- **Ecuación 2.**

$$K2 = \frac{x_{Fe_2SiO_4}}{x_{FeO^2} * x_{SiO_2}}$$

- **Ecuación 3.**

$$K3 = \frac{x_{Cu^2} * x_{CO}}{x_{Cu_2O} * x_C}$$

- **Ecuación 4.**

$$K4 = \frac{x_{Fe} * x_{CO}}{x_{FeO} * x_C}$$

- **Ecuación 5.**

$$K5 = \frac{x_{Cu^2} * x_{FeS}}{x_{Fe} * x_{Cu_2S}}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**✚ Tabla de entrada de moles de alimentación al Horno eléctrico**

Para poder plantear ecuaciones no lineales, que nos van a permitir poder obtener las coordenadas de extensión de cada reacción, es necesario tener presente la alimentación al equipo de cada compuesto involucrado en las reacciones químicas. Para ello se desarrolla una tabla de entrada. A modo de ejemplo, se harán los cálculos con una base de Alimentación.

Compuestos	RXO	RXO	RXO	RXO	RXO	Ni0	Ni
	1	2	3	4	5		
$Fe_3O_4$	-1	0	0	0	0	22,47	$22,47 - e1$
$C$	-1	0	-1	-1	0	48,33	$48,33 - e1 - e3 - e4$
$FeO$	3	0	0	-1	0	0	$3 * e3 - e4$
$CO$	1	0	1	1	0	0	$e1 + e3 + e4$
$Cu_2O$	0	0	-1	0	0	17,88	$17,88 - e3$
$Cu$	0	0	2	0	2	0	$2 * e3 + 2 * e5$
$Fe$	0	0	0	1	-1	0	$e4 - e5$
$Cu_2S$	0	0	0	0	-1	9,88	$9,88 - e5$
$FeS$	0	0	0	0	1	6,75	$6,75 + e5$
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>105,31</b>	<b><math>105,31 + 2 * e1 + e3 + e5</math></b>

✓ *Nota: La segunda reacción no se considera, puesto que tiene una constante de equilibrio pequeña y en la mayoría de los casos el producto se encuentra en exceso, debido que proviene del C.T.*

Entonces: 
$$xFe_3O_4 = \frac{22,47 - e1}{105,31 + 2 * e1 + e3 + e5}$$

De esta forma se van remplazando las ecuaciones de equilibrio hasta tener un sistema de Ecuaciones no Lineales, las cuales pueden ser resueltas utilizando algún método numérico.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## **Planteo del sistema de ecuaciones**

El método a utilizar para resolver dicho sistema es Newton Raphson en Multivariantes.

El método de Newton Raphson nos pide que se fabrique con las derivadas de las ecuaciones planteadas una matriz jacobiana.

### **i. Ecuaciones**

Arreglando un poco las ecuaciones de equilibrio, se obtiene:

- **Ecuación 1:**  $f(e1, e3, e4, e5) = K1 * [(n0Fe_3O_4 - e1) * (e1 - n0C + e3 + e4) * (n0Total + 2 * e1 + e3 + e5)^2] + (n0FeO + 3 * e1 - e4)^3 * (n0CO + e1 + e3 + e4)$
- **Ecuación 3:**  $h(e1, e3, e4, e5) = K3 * [(n0Cu_2O - e3) * (e1 - n0C + e3 + e4) * (n0Total + 2 * e1 + e3 + e5)] + (n0Cu + 2 * e3 + 2 * e5)^2 * (n0CO + e1 + e3 + e4)$
- **Ecuación 4:**  $i(e1, e3, e4, e5) = K4 * [(n0FeO + 3 * e1 - e4) * (e1 - n0C + e3 + e4)] + (n0Fe + e4 - e5) * (n0CO + e1 + e3 + e4)$
- **Ecuación 5:**  $j(e1, e3, e4, e5) = K5 * [(n0Cu_2S - e5) * (n0Fe + e4 - e5) * (2 * e1 + e3 + e5 + n0Total)] - [(n0FeS + e5) * (n0Cu + 2 * e3 + 2 * e5)^2]$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## ii. Matriz de ecuaciones:

Con las ecuaciones anteriores se forma una matriz:

$$ME = \begin{bmatrix} f(e1, e3, e4, e5) \\ h(e1, e3, e4, e5) \\ i(e1, e3, e4, e5) \\ j(e1, e3, e4, e5) \end{bmatrix}$$

## iii. Matriz negativa:

Se debe formar una matriz negativas, con la matriz ME.

$$MNE = \begin{bmatrix} f(e1, e3, e4, e5) \\ h(e1, e3, e4, e5) \\ i(e1, e3, e4, e5) \\ j(e1, e3, e4, e5) \end{bmatrix} * -1 = \begin{bmatrix} -f \\ -h \\ -i \\ -j \end{bmatrix}$$

## iv. Derivadas

Las Derivadas que conforman la matriz jacobiana serían:

### a) Derivadas de la ecuación 1:

$$\frac{\partial}{\partial e1} (f(e1, e3, e4, e5)) = (n0FeO + 3 * e1 - e4)^3 + 9 * (n0FeO + 3 * e1 - e4)^2 * (n0CO + e1 + e3 + e4) - K1 * (e1 - n0C + e3 + e4) * (noTotal + 2 * e1 + e3 + e5)^2 + K1 * (n0Fe3O4 - e1)^1 * (noTotal + 2 * e1 + e3 + e5)^2 + K1 * (n0Fe3O4 - e1) * (4 * n0Total + 8 * e1 + 4 * e3 + 4 * e5) * (e1 - n0C + e3 + e4)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\frac{\partial}{\partial e_3}(f(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)^3 + K1 * (n0Fe3O4 - e_1)^1 * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total)^2 + K1 * (n0Fe3O4 - e_1) * (4 * e_1 + 2 * e_3 + 2 * e_5 + 2 * n0Total) * (e_1 - n0C + e_3 + e_4)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_4}(f(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)^3 - 3 * (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)^2 * (n0CO + e_1 + e_3 + e_4) + K1 * (n0Fe3O4 - e_1) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total)^2$$

$$\frac{\partial}{\partial e_5}(f(e_1, e_3, e_4, e_5)) = K1 * (n0Fe3O4 - e_1)^1 * (4 * e_1 + 2 * e_3 + 2 * e_5 + 2 * n0Total) * (e_1 - n0C + e_3 + e_4)$$

**b) Derivadas de la ecuación 3:**

$$\frac{\partial}{\partial e_1}(h(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (2 * e_3 + 2 * e_5 + n0Cu)^2 + 2 * K3 * (n0Cu2O - e_3) * (e_1 - n0C + e_3 + e_4) + K3 * (n0Cu2O - e_3) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_3}(h(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (2 * e_3 + 2 * e_5 + n0Cu)^2 + (8 * e_3 + 8 * e_5 + 4 * n0Cu) * (n0CO + e_1 + e_3 + e_4) - K3 * (e_1 - n0C + e_3 + e_4) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total) + K3 * (n0Cu2O - e_3) * (e_1 - n0C + e_3 + e_4) + K3 * (n0Cu2O - e_3) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_4}(h(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (2 * e_3 + 2 * e_5 + n0Cu)^2 + K3 * (n0Cu2O - e_3) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + n0Total)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\frac{\partial}{\partial e_5}(h(e_1, e_3, e_4, e_5)) = (8 * e_3 + 8 * e_5 + 4 * n0Cu) * (n0CO + e_1 + e_3 + e_4) + K3 * (n0Cu2O - e_3) * (e_1 - n0C + e_3 + e_4)$$

**c) Derivadas de la ecuación 4:**

$$\frac{\partial}{\partial e_1}(i(e_1, e_3, e_4, e_5)) = e_4 - e_5 + n0Fe + 3 * K4 * (e_1 - n0C + e_3 + e_4) + K4 * (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_3}(i(e_1, e_3, e_4, e_5)) = e_4 - e_5 + n0Fe + K4 * (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_4}(i(e_1, e_3, e_4, e_5)) = n0CO + e_1 + e_3 + 2 * e_4 - e_5 + n0Fe - K4 * (e_1 - n0C + e_3 + e_4) + K4 * (n0FeO + 3 * e_1 - e_4)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_5}(i(e_1, e_3, e_4, e_5)) = -n0CO - e_1 - e_3 - e_4$$

**d) Derivadas de la ecuación 5:**

$$\frac{\partial}{\partial e_1}(j(e_1, e_3, e_4, e_5)) = -2 * k5 * (e_4 - e_5 + n0Fe) * (e_5 - noCu2S)$$

$$\frac{\partial}{\partial e_3}(j(e_1, e_3, e_4, e_5)) = -(e_5 + noFeS) * (8 * e_3 + 8 * e_5 + 4 * n0Cu) - k5 * (e_4 - e_5 + n0Fe) * (e_5 - noCu2S)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



$$\frac{\partial}{\partial e_4}(j(e_1, e_3, e_4, e_5)) = -k_5 * (e_5 - noCu_2S) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + noTotal)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial e_5}(j(e_1, e_3, e_4, e_5)) &= k_5 * (e_5 - noCu_2S) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + noTotal) - (2 * e_3 + 2 * e_5 + \\ &n0Cu)^2 - k_5 * (e_5 - noCu_2S) * (e_4 - e_5 + n0Fe) - (e_5 - n0Cu_2S) * (8 * e_3 + 8 * e_5 + 4 * \\ &n0Cu) - k_5 * (e_4 - e_5 + n0Fe) * (2 * e_1 + e_3 + e_5 + noTotal) \end{aligned}$$

**v. Matriz Jacobiana:**

La matriz jacobiana con las derivadas seria:

$$MJ = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial e_1} & \frac{\partial f}{\partial e_3} & \frac{\partial f}{\partial e_4} & \frac{\partial f}{\partial e_5} \\ \frac{\partial h}{\partial e_1} & \frac{\partial h}{\partial e_3} & \frac{\partial h}{\partial e_4} & \frac{\partial h}{\partial e_5} \\ \frac{\partial i}{\partial e_1} & \frac{\partial i}{\partial e_3} & \frac{\partial i}{\partial e_4} & \frac{\partial i}{\partial e_5} \\ \frac{\partial j}{\partial e_1} & \frac{\partial j}{\partial e_3} & \frac{\partial j}{\partial e_4} & \frac{\partial j}{\partial e_5} \end{bmatrix}$$

**vi. Valores iniciales:**

Se debe empezar a tantear los posibles valores que adopten las ecuaciones, sin embargo un buen punto para empezar en la reacción 3 es asumir que por tener una constante de equilibrio tan grande se llevara a cabo al 100%. Por ende, se asume que de aquella conversión se obtiene la siguiente extensión.

$$E(nl_0, f, est) := \frac{-nl_0f}{est}$$

$$e_3 = \frac{-n0Cu_2O * 1}{-1}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Finalmente, al ir resolviendo el sistemas de ecuaciones, se verá si e3 cambio de valor o no.

**vii. Operación de matrices:**

Se multiplica la matriz negativa (MNE) con la matriz inversa de la matriz jacobiana ( $MJ^{-1}$ ) y como resultado se obtendrá una nueva matriz (ROM).

$$ROM = MNE * MJ^{-1} = \begin{bmatrix} -f \\ -h \\ -i \\ -j \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial e1} & \frac{\partial f}{\partial e3} & \frac{\partial f}{\partial e4} & \frac{\partial f}{\partial e5} \\ \frac{\partial h}{\partial e1} & \frac{\partial h}{\partial e3} & \frac{\partial h}{\partial e4} & \frac{\partial h}{\partial e5} \\ \frac{\partial i}{\partial e1} & \frac{\partial i}{\partial e3} & \frac{\partial i}{\partial e4} & \frac{\partial i}{\partial e5} \\ \frac{\partial j}{\partial e1} & \frac{\partial j}{\partial e3} & \frac{\partial j}{\partial e4} & \frac{\partial j}{\partial e5} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix}$$

**viii. Resultados:**

Al comenzar la iteración, se evalúa con los valores iniciales, luego los resultados que se obtendrán de la operación de matrices se van a sumar a los valores iniciales. Ahora con estos nuevos puntos, se volverá a realizar una nueva operación obteniendo nuevos resultados. La iteración se acaba cuando los números obtenidos en la Operación de matrices sea menor a +-1.

 **Programación en Excel**

Debido que Newton Raphson es un método numérico, se puede programar usando Excel, las ecuaciones están listas para ser utilizadas.

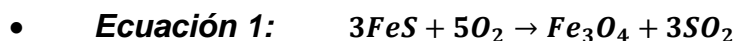
---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

✚ **Calculo de constantes de equilibrio inicial de cada reacción química propuesta y llevarla a la temperatura a la cual estaría trabajando el Convertidor Pierce Smith.**

Procedimiento explicado en Horno eléctrico. También se asume que opera a 1200°C.

**I. Etapa Formación de Escoria.**



Datos Propiedades	FeS	O <sub>2</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-94956,62	0	-1119550,32	-296830
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-97489,64	0	-1014670,98	-300194
Cp.[J/mol*K]	A	B	C	D

$$A = 8,314 * (12,05 + 0,00273 * T)$$

$$B = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$C = 8,314 * (41,17 + 0,01882 * T - 979500 * T^{-2})$$

$$D = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G1 = -1622784,06 \left[ \frac{J}{mol} \right]$$

$$\ln K01 = -\frac{\Delta G1}{R * T} = 654,99$$

$$K0_1 = 2,87 * 10^{284}$$

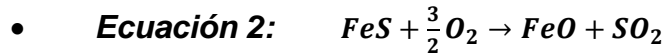
$$\Delta Hr^\circ 1 = \sum(\gamma_i * \Delta H^\circ i) = -1725170,46 \left[ \frac{J}{mol} \right] \text{ (Exotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-15,48 + 0,02524 * T - 41000 * T^{-2} - 0,00000249 * T^2)$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K1 = 5,45 * 10^{44}$$

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Datos Propiedades	<i>FeS</i>	<i>O<sub>2</sub></i>	<i>FeO</i>	<i>SO<sub>2</sub></i>
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-94956,62	0	-270551,02	-296830
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-97489,64	0	-248612,19	-300194
Cp.[J/mol*K]	A	B	E	D

$$A = 8,314 * (12,05 + 0,00273 * T)$$

$$B = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$E = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$D = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G_2 = -451316,55 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{O_2} = -\frac{\Delta G_2}{R * T} = 182,16$$

$$K_{O_2} = 1,29 * 10^{79}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}2} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = -472424,4 [\frac{J}{mol}] \text{ (Exotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-4,81 + 0,003675 * T + 205350 * T^{-2} - 0,00000083 * T^2)$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_2 = 2,51 * 10^{12}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

- **Ecuación 3:**  $2FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$

Datos Propiedades	<i>FeO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub></i>
$\Delta H^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-270551,02	-855677,25	-1145089,8
$\Delta G^\circ \left[ \frac{J}{mol} \right]$	-248612,19	-801353,52	-1046888,41
Cp.[J/mol*K]	E	F	G

$$E = 8,314 * (12,62 + 0,001492 * T - 76200 * T^{-2})$$

$$F = 8,314 * (10,95 + 0,0055 * T)$$

$$G = 8,314 * (33,57 + 0,01907 * T - 879700 * T^{-2})$$

$$\Delta G_3 = 251689,49 \left[ \frac{J}{mol} \right]$$

$$\ln K_{03} = -\frac{\Delta G_3}{R * T} = -101,59$$

$$K_{03} = 7,59 * 10^{-45}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}3} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = 251689,49 \left[ \frac{J}{mol} \right] \text{ (Endotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-2,62 + 0,010586 * T - 727300 * T^{-2})$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_3 = 7,03 * 10^{-8}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## II. Etapa Formación de Cobre.



Datos Propiedades	$Cu_2S$	$O_2$	$Cu$	$SO_2$
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-79423,6	0	0	-296830
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-86080,61	0	0	-300194
Cp.[J/mol*K]	H	B	I	D

$$H = 8,314 * 20,9$$

$$B = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$I = 8,314 * 7,5$$

$$D = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G1 = -214113,39 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K01 = -\frac{\Delta G1}{R * T} = 86,42$$

$$K0_1 = 3,4 * 10^{37}$$

$$\Delta Hr^\circ 1 = \sum(\gamma_i * \Delta H^\circ i) = -217406,4 [\frac{J}{mol}] \text{ (Exotérmica)}$$

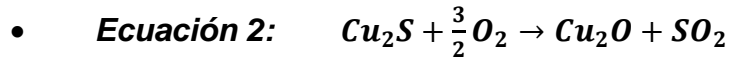
$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-6,92 + 0,005042 * T + 187700 * T^{-2} - 0,00000083 * T^2)$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K1' = 1397226,84$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Datos Propiedades	$Cu_2S$	$O_2$	$Cu_2O$	$SO_2$
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-79423,6	0	-166890	-296830
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-86080,61	0	-146360	-300194
Cp.[J/mol*K]	H	B	J	D

$$H = 8,314 * 20,9$$

$$B = 8,314 * (8,72 + 0,000258 * T - 187700 * T^{-2})$$

$$J = 63,6$$

$$D = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G_2 = -360473,4 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{O_2} = -\frac{\Delta G_2}{R * T} = 145,49$$

$$K_{O_2} = 1,54 * 10^{63}$$

$$\Delta H_{r^\circ 2} = \sum(\gamma_i * \Delta H^\circ_i) = -384296,4 [\frac{J}{mol}] \text{ (Exotérmica)}$$

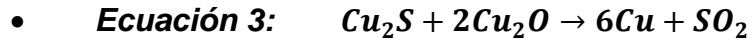
$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (-21,92 + 0,005042 * T + 187700 * T^{-2} - 0,00000083 * T^2) + 63,6$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_2' = 814231,5$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Datos Propiedades	$Cu_2S$	$Cu_2O$	$Cu$	$SO_2$
$\Delta H^\circ [\frac{J}{mol}]$	-79423,6	-166890	0	-296830
$\Delta G^\circ [\frac{J}{mol}]$	-86080,61	-146360	0	-300194
$Cp.[J/mol*K]$	H	J	I	D

$$H = 8,314 * 20,9$$

$$J = 63,6$$

$$I = 8,314 * 7,5$$

$$D = 8,314 * (7,7 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2)$$

$$\Delta G_3 = 78606,61 [\frac{J}{mol}]$$

$$\ln K_{03} = -\frac{\Delta G_3}{R * T} = -31,73$$

$$K_{03} = 1,66 * 10^{-14}$$

$$\Delta H_{r^{\circ}3} = \sum(\gamma_i * \Delta H^{\circ}i) = 116373,6 [\frac{J}{mol}] \text{ (Endotérmica)}$$

$$\sum(\gamma_i * C_{pi}) = 8,314 * (31,8 + 0,0053 * T - 0,00000083 * T^2) - 127,2$$

Finalmente reemplazando todo se obtiene:

$$K_{3'} = 3844848356,56$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



## **Formación de Equilibrio Químico.**

### **I. Etapa Formación de Escoria.**

En la Etapa de formación de Escoria, se estudia principalmente la interacción entre las reacciones 1 y 2. La reacción 3 se asume que se lleva a cabo en un 100%.

$$K1 = \frac{xFe_3O_4 * xSO_2^3}{xFeS^3 * xO_2^5}$$

$$K2 = \frac{xFeO^2 * xSO_2^2}{xFeS^2 * xO_2^3}$$

### **II. Etapa Formación de Cobre.**

En la Etapa de formación de Cobre, se estudian las dos primeras reacciones, puesto que la tercera depende de las dos primeras.

$$K1' = \frac{xCu^2 * xSO_2}{xCu_2S * xO_2}$$

$$K2' = \frac{xCu_2O^2 * xSO_2^2}{xCu_2S^2 * xO_2^3}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

✚ **Tabla de Entrada de moles de alimentación al Convertidor Pierce Smith.**

**I. Etapa Formación de Escoria.**

Compuestos	RXO1	RXO2	NiO	Ni
$FeS$	-3	-2	$n0FeS$	$n0FeS - 3 * e1 - 2 * e2$
$O_2$	-5	-3	$n0O_2$	$n0O_2 - 5 * e1 - 3 * e2$
$FeO$	0	2	$n0FeO$	$n0FeO + 2 * e2$
$Fe_3O_4$	1	0	$n0Fe_3O_4$	$n0Fe_3O_4 + e1$
$SO_2$	3	2	$n0SO_2$	$n0SO_2 + 3 * e1 + 2 * e2$
<b>Total</b>	<b>-4</b>	<b>-1</b>	<b><math>n0Total</math></b>	<b><math>n0Total - 4 * e1 - e2</math></b>

**II. Etapa Formación de Cobre.**

Compuestos	RXO1	RXO2	NiO	Ni
$Cu_2S$	-1	-2	$n0Cu_2S$	$n0Cu_2S - e1 - 2 * e2$
$O_2$	-1	-3	$n0'O_2$	$n0'O_2 - e1 - 3 * e2$
$Cu$	2	0	$n0Cu$	$n0Cu + 2 * e1$
$SO_2$	1	2	$n0SO_2$	$n0SO_2 + e1 + 2 * e2$
$Cu_2O$	0	2	$n0Cu_2O$	$n0Cu_2O + 2 * e2$
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b><math>n0Total'</math></b>	<b><math>n0Total' + e1 - e2</math></b>

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

## ✚ Planteo del sistema de ecuaciones

### i. Ecuaciones

Arreglando un poco las ecuaciones de equilibrio, se obtiene:

#### I. Etapa Formación de Escoria.

- **Ecuación 1:**  $f(e1, e2) = k1 * [(3 * e1 + 2 * e2 - noFeS)^3 * (5 * e1 + 3 * e2 - noO2)^5] - (e1 + noFe3O4) * (3 * e1 + 2 * e2 + n0SO2)^3 * (4 * e1 + e2 - noTotal)^4$
- **Ecuación 2:**  $g(e1, e2) = k2 * [(3 * e1 + 2 * e2 - noFeS)^2 * (5 * e1 + 3 * e2 - noO2)^3] - (2 * e2 + n0FeO)^2 * (3 * e1 + 2 * e2 + n0SO2)^2 * (4 * e1 + e2 - noTotal)$

#### II. Etapa Formación de Cobre.

- **Ecuación 1':**  $h(e1, e2) = k1' * [(e1 + 3 * e2 - no'O2) * (e1 + 2 * e2 - noCu2S) * (e1 - e2 + noTotal)] - (noCu + 2 * e1)^2 * (n0SO2 + e1 + 2 * e2)$
- **Ecuación 2':**  $i(e1, e2) = k2' * [(e1 + 3 * e2 - no'O2)^3 * (e1 + 2 * e2 - noCu2S)^2] + (n0SO2 + e1 + 2 * e2)^2 * (2 * e2 + noCu2O)^2 * (e1 - e2 + noTotal)$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**ii. Matriz de ecuaciones:**

Con las ecuaciones anteriores se forma una matriz:

**I. Etapa Formación de Escoria.**

$$MEE = \begin{bmatrix} f(e1, e2) \\ g(e1, e2) \end{bmatrix}$$

**II. Etapa Formación de Cobre.**

$$MEC = \begin{bmatrix} h(e1, e2) \\ i(e1, e2) \end{bmatrix}$$

**iii. Matriz negativa:**

Se debe formar una matriz negativas con la matriz ME y otra con MEC.

**a. Etapa Formación de Escoria.**

$$MNEE = \begin{bmatrix} f(e1, e2) \\ g(e1, e2) \end{bmatrix} * -1 = \begin{bmatrix} -f \\ -g \end{bmatrix}$$

**b. Etapa Formación de Cobre.**

$$MNEC = \begin{bmatrix} h(e1, e2) \\ i(e1, e2) \end{bmatrix} * -1 = \begin{bmatrix} -h \\ -i \end{bmatrix}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

#### iv. Derivadas

Las Derivadas que conforman la matriz jacobiana serían:

##### I. Etapa Formación de Escoria.

##### e) Derivadas de la ecuación 1:

$$\frac{\partial}{\partial e_1}(f(e_1, e_2)) = 9 * k_1 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^2 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^5 * -(4 * e_1 + e_2 - noTotal)^4 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^3 + 25 * k_1 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^3 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^4 * -16 * (e_1 + noFe_3O_4) * (4 * e_1 + e_2 - noTotal)^3 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^3 - 9 * (e_1 + noFe_3O_4) * (4 * e_1 + e_2 - noTotal)^4 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^2$$

$$\frac{\partial}{\partial e_2}(f(e_1, e_2)) = 6 * k_1 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^5 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^2 + 15 * k_1 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^4 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^3 - 4 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^3 * (e_1 + noFe_3O_4) * (4 * e_1 + e_2 - noTotal)^3 - 6 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^2 * (e_1 + noFe_3O_4) * (4 * e_1 + e_2 - noTotal)^4$$

##### f) Derivadas de la ecuación 2:

$$\frac{\partial}{\partial e_1}(g(e_1, e_2)) = 15 * k_2 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^2 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^2 * -4 * (2 * e_2 + nOFeO)^2 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^2 - (nOFeO + 2 * e_2)^2 * (4 * e_1 + e_2 - noTotal) * (6 * nOSO_2 + 18 * e_1 + 12 * e_2) + K_3 * (18 * e_1 - 6 * noFeS + 12 * e_2) * (5 * e_1 - noO_2 + 3 * e_2)^3$$

$$\frac{\partial}{\partial e_2}(g(e_1, e_2)) = 9 * k_2 * (3 * e_1 + 2 * e_2 - noFeS)^2 * (5 * e_1 + 3 * e_2 - noO_2)^2 - (2 * e_2 + nOFeO)^2 * (nOSO_2 + 3 * e_1 + 2 * e_2)^2 - (4 * nOFeO + 8 * e_2)^1 * (4 * e_1 + e_2 - noTotal) *$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$(n0SO_2 + 3 * e1 + 2 * e2)^2 - (2 * e2 + n0FeO)^2 * (4 * e1 + e2 - n0Total) * (4 * n0SO_2 + 12 * e1 + 8 * e2) + K3 * (12 * e1 + 8 * e2 - 4 * noFeS) * (5 * e1 - n0O_2 + 3 * e2)^3$$

## II. Etapa Formación de Cobre.

### g) Derivadas de la ecuación 1' :

$$\frac{\partial}{\partial e1}(h(e1, e2)) = k1' * (e1 + 2 * e2 - noCu2S) * (e1 + 3 * e2 - n'O2) * -(4 * n0Cu + 8 * e1) * (n0SO_2 + e1 + 2 * e2) - (noCu + 2 * e1)^2 + k1' * (e1 - e2 + noTotal) * (e1 + 2 * e2 - noCu2S) + k1' * (e1 + 3 * e2 - n'O2) * (e1 - e2 + noTotal)$$

$$\frac{\partial}{\partial e2}(h(e1, e2)) = 3 * k1' * (e1 - e2 + noTotal) * (e1 + 2 * e2 - noCu2S) - k1' * (e1 + 2 * e2 - noCu2S) * (e1 + 3 * e2 - n'O2) - 2 * (noCu + 2 * e1)^2 + 2 * k1' * (e1 - e2 + noTotal) * (e1 + 3 * e2 - n'O2)$$

### h) Derivadas de la ecuación 2' :

$$\frac{\partial}{\partial e1}(i(e1, e2)) = (2 * e2 + noCu2O)^2 * (n0SO_2 + e1 + 2 * e2)^2 * +k2' * (2 * e1 + 4 * e2 - 2 * noCu2S) * (e1 + 3 * e2 - n'O2)^3 + 3 * k2' * (e1 + 2 * e2 - noCu2S)^2 * (e1 + 3 * e2 - n'O2)^2 + (2 * e2 + noCu2O)^2 * (2 * n0SO_2 + 2 * e1 + 4 * e2) * (e1 - e2 + n0Total)$$

$$\frac{\partial}{\partial e2}(i(e1, e2)) = k2' * (4 * e1 + 8 * e2 - 4 * noCu2S) * (e1 + 3 * e2 - n'O2)^3 - (2 * e2 + noCu2O)^2 * (n0SO_2 + e1 + 2 * e2)^2 + 9 * k2' * (e1 + 2 * e2 - noCu2S)^2 * (e1 + 3 * e2 - n'O2)^2 + (4 * noCu2O + 8 * e2) * (n0SO_2 + e1 + 2 * e2)^2 * (e1 - e2 + n0Total) + (noCu2O + 2 * e2)^2 * (4 * n0SO_2 + 4 * e1 + 8 * e2) * (e1 - e2 + n0Total)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**v. Matriz Jacobiana:**

La matriz jacobiana con las derivadas sería:

**ii. Etapa Formación de Escoria.**

$$MJE = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial e1} & \frac{\partial f}{\partial e2} \\ \frac{\partial g}{\partial e1} & \frac{\partial g}{\partial e2} \end{bmatrix}$$

**iii. Etapa Formación de Cobre.**

$$MJC = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial e1} & \frac{\partial h}{\partial e2} \\ \frac{\partial i}{\partial e1} & \frac{\partial i}{\partial e2} \end{bmatrix}$$

**vi. Valores iniciales:**

Debemos empezar a tantear los posibles valores que adopten las ecuaciones.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

**vii. Operación de matrices:**

**I. Etapa Formación de Escoria.**

$$ROME = MNEE * MJE^{-1} = \begin{bmatrix} -f \\ -g \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial e1} & \frac{\partial f}{\partial e2} \\ \frac{\partial g}{\partial e1} & \frac{\partial g}{\partial e2} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

**II. Etapa Formación de Cobre.**

$$ROMC = MNEC * MJC^{-1} = \begin{bmatrix} -h \\ -i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial e1} & \frac{\partial h}{\partial e2} \\ \frac{\partial i}{\partial e1} & \frac{\partial i}{\partial e2} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$$

**ii. Resultados:**

Los resultados se obtienen realizando el mismo procedimiento que en el Horno eléctrico.



### XIII. Anexo de Códigos Visual Basic.

#### 13.1 Código que permite constantes de Equilibrio a una temperatura dada.

##### **Horno Eléctrico**

Sub Botón1\_Haga\_clic\_en()

a = 298

b = Val(InputBox("Ingrese temperatura de operación (°C)"))

b = b + 273.15

n = 220

h = (b - a) / n

Rem k1

fa1 = (197372.25 + (8.314 \* (0.61 - 0.015761 \* a + 867800 \* (a ^ (-2)))) \* (a - 298)) / (8.314 \* (a ^ (2)))

fb1 = (197372.25 + (8.314 \* (0.61 - 0.015761 \* b + 867800 \* (b ^ (-2)))) \* (b - 298)) / (8.314 \* (b ^ (2)))

ap = fa1 + fb1

For i = 1 To n - 1

x = a + i \* h

dH = 197372.25 + (8.314 \* (0.61 - 0.015761 \* x + 867800 \* (x ^ (-2)))) \* (x - 298)

fu = dH / (8.314 \* (x ^ (2)))

aprox = aprox + 2 \* fu

Next i

c = h / 2 \* (ap + aprox)

c = -53.140979 + c

c = Exp(c)

Cells(2, 6) = c

Cells(2, 5) = "k1 = "

Rem k3

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$fa2 = (56365 + (-63.6 + 8.314 * (18.927 - 0.001417 * a + 116900 * a ^ (-2))) * (a - 298)) / (8.314 * (a ^ (2)))$$

$$fb2 = (56365 + (-63.6 + 8.314 * (18.927 - 0.001417 * b + 116900 * b ^ (-2))) * (b - 298)) / (8.314 * (b ^ (2)))$$

$$ap2 = fa2 + fb2$$

$$aprox = 0$$

For i = 1 To n - 1

$$x = a + i * h$$

---

$$dH = 56365 + (-63.6 + 8.314 * (18.927 - 0.001417 * x + 116900 * x ^ (-2))) * (x - 298)$$

$$fu = dH / (8.314 * (x ^ (2)))$$

$$aprox = aprox + 2 * fu$$

Next i

$$c = h / 2 * (ap2 + aprox)$$

$$c = -3.70908216 + c$$

$$c = \text{Exp}(c)$$

$$\text{Cells}(4, 6) = c$$

$$\text{Cells}(4, 5) = "k3 = "$$

Rem k4

$$fa3 = (160026.02 + (8.314 * (-0.293 - 0.002909 * a + 193100 * a ^ (-2))) * (a - 298)) / (8.314 * (a ^ (2)))$$

$$fb3 = (160026.02 + (8.314 * (-0.293 - 0.002909 * b + 193100 * b ^ (-2))) * (b - 298)) / (8.314 * (b ^ (2)))$$

$$ap3 = fa3 + fb3$$

$$aprox = 0$$

For i = 1 To n - 1

$$x = a + i * h$$

$$dH = 160026.02 + (8.314 * (-0.293 - 0.002909 * x + 193100 * x ^ (-2))) * (x - 298)$$

$$fu = dH / (8.314 * (x ^ (2)))$$

$$aprox = aprox + 2 * fu$$

Next i

$$c = h / 2 * (ap3 + aprox)$$

$$c = -44.9801182 + c$$

$$c = \text{Exp}(c)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Cells(6, 6) = c

Cells(6, 5) = "k4 = "

Rem k5

fa4 = (-15533.02 + (8.314 \* (-2.25 + 0.00273 \* a)) \* (a - 298)) / (8.314 \* (a ^ (2)))

fb4 = (-15533.02 + (8.314 \* (-2.25 + 0.00273 \* b)) \* (b - 298)) / (8.314 \* (b ^ (2)))

ap4 = fa4 + fb4

aprox = 0

For i = 1 To n - 1

x = a + i \* h

dH = -15533.02 + (8.314 \* (-2.25 + 0.00273 \* x)) \* (x - 298)

fu = dH / (8.314 \* (x ^ (2)))

aprox = aprox + 2 \* fu

Next i

c = h / 2 \* (ap4 + aprox)

c = 4.5995662 + c

c = Exp(c)

Cells(8, 6) = c

Cells(8, 5) = "k5 = "

End Sub

---

 **C.P.S.**

Sub Botón4\_Haga\_clic\_en()

a = 298

b = Val(InputBox("Ingrese temperatura de operación (°C)"))

b = b + 273.15

n = 220

h = (b - a) / n

Rem etapa de formacion de escoria

Rem k1

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$fa1 = (-1725170.46 + (8.314 * (-15.48 + 0.02524 * a - 41000 * (a ^ (-2)) - 0.00000249 * (a ^ (2)))) * (a - 298)) / (8.314 * (a ^ (2)))$$

$$fb1 = (-1725170.46 + (8.314 * (-15.48 + 0.02524 * b - 41000 * (b ^ (-2)) - 0.00000249 * (b ^ (2)))) * (b - 298)) / (8.314 * (b ^ (2)))$$

$$ap = fa1 + fb1$$

$$aprox = 0$$

For i = 1 To n - 1

$$x = a + i * h$$

$$dH = (-1725170.46 + (8.314 * (-15.48 + 0.02524 * x - 41000 * (x ^ (-2)) - 0.00000249 * (x ^ (2)))) * (x - 298))$$

$$fu = dH / (8.314 * (x ^ (2)))$$

$$aprox = aprox + 2 * fu$$

Next i

$$c = h / 2 * (ap + aprox)$$

$$c = 654.988478 + c$$

$$c = \text{Exp}(c)$$

$$\text{Cells}(13, 6) = c$$

$$\text{Cells}(13, 5) = "k1 = "$$

Rem k2

$$fa2 = (-472424.4 + (8.314 * (-4.81 + 0.003675 * a + 205350 * a ^ (-2) - 0.00000083 * a ^ 2)) * (a - 298)) / (8.314 * (a ^ (2)))$$

$$fb2 = (-472424.4 + (8.314 * (-4.81 + 0.003675 * b + 205350 * b ^ (-2) - 0.00000083 * b ^ 2)) * (b - 298)) / (8.314 * (b ^ (2)))$$

$$ap2 = fa2 + fb2$$

$$aprox = 0$$

For i = 1 To n - 1

$$x = a + i * h$$

$$dH = -472424.4 + (8.314 * (-4.81 + 0.003675 * x + 205350 * x ^ (-2) - 0.00000083 * x ^ 2)) * (x - 298)$$

$$fu = dH / (8.314 * (x ^ (2)))$$

$$aprox = aprox + 2 * fu$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Next i

$$c = h / 2 * (ap2 + aprox)$$

$$c = 182.158865 + c$$

$$c = \text{Exp}(c)$$

$$\text{Cells}(15, 6) = c$$

$$\text{Cells}(15, 5) = "k2 = "$$

Rem etapa de formacion de cobre

Rem k4

$$fa4 = (-217406.4 + 8.314 * (-6.92 + 0.005042 * a + 187700 * a^{(-2)} - 8.3 * 10^{(-7)} * a^2) * (a - 298)) / (8.314 * (a^{(2)}))$$

$$fb4 = (-217406.4 + 8.314 * (-6.92 + 0.005042 * b + 187700 * b^{(-2)} - 8.3 * 10^{(-7)} * b^2) * (b - 298)) / (8.314 * (b^{(2)}))$$

$$ap = fa4 + fb4$$

aprox = 0

For i = 1 To n - 1

$$x = a + i * h$$

$$dH = -217406.4 + 8.314 * (-6.92 + 0.005042 * b + 187700 * b^{(-2)} - 8.3 * 10^{(-7)} * b^2) * (b - 298)$$

$$fu = dH / (8.314 * (x^{(2)}))$$

$$aprox = aprox + 2 * fu$$

Next i

$$c = h / 2 * (ap + aprox)$$

$$c = 86.4194239 + c$$

$$c = \text{Exp}(c)$$

$$\text{Cells}(20, 6) = c$$

$$\text{Cells}(20, 5) = "k4 = "$$

Rem k5

$$fa1 = (-384296.4 + (63.6 + 8.314 * (-21.92 + 0.005042 * a + 187700 * a^{(-2)} - 0.00000083 * a^2)) * (a - 298)) / (8.314 * (a^{(2)}))$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

```

fb1 = (-384296.4 + (63.6 + 8.314 * (-21.92 + 0.005042 * b + 187700 * b ^ (-2) - 0.00000083 * b ^ 2)) * (b - 298)) / (8.314 * (b
^ (2)))

ap = fa1 + fb1

aprox = 0

For i = 1 To n - 1

x = a + i * h

dH = -384296.4 + (63.6 + 8.314 * (-21.92 + 0.005042 * x + 187700 * x ^ (-2) - 0.00000083 * x ^ 2)) * (x - 298)

fu = dH / (8.314 * (x ^ (2)))

aprox = aprox + 2 * fu

Next i

c = h / 2 * (ap + aprox)

c = 145.494643 + c

c = Exp(c)

Cells(22, 6) = c

Cells(22, 5) = "k5 ="

End Sub

```

---

## 13.2 Código Cálculo de Extensiones.

### **Horno Eléctrico.**

Sub CálculodeExtensiones\_Botón1\_Haga\_clic\_en()

Rem lectura de celdas

a = Cells(8, 3)

b = Cells(9, 3)

c = Cells(10, 3)

d = Cells(11, 3)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

e = Cells(12, 3)

f = Cells(13, 3)

g = Cells(14, 3)

h = Cells(15, 3)

p = Cells(16, 3)

K1 = Cells(19, 3)

K3 = Cells(20, 3)

K4 = Cells(21, 3)

K5 = Cells(22, 3)

e1 = 0

e3 = 17.88

e4 = 0

e5 = 0

O = 5

Rem sumador de celdas

For i = 8 To 16

j = Cells(i, 3)

k = k + j

Next i

Do While O > 1

Rem funciones

fu = K1 \* ((a - e1) \* (e1 - b + e3 + e4) \* (k + 2 \* e1 + e3 + e5) ^ 2) + (c + 3 \* e1 - e4) ^ 3 \* (d + e1 + e3 + e4)

hu = K3 \* ((e - e3) \* (e1 - b + e3 + e4) \* (k + 2 \* e1 + e3 + e5)) + (f + 2 \* e3 + 2 \* e5) ^ 2 \* (d + e1 + e3 + e4)

iu = K4 \* ((c + 3 \* e1 - e4) \* (e1 - b + e3 + e4)) + (g + e4 - e5) \* (d + e1 + e3 + e4)

ju = K5 \* ((h - e5) \* (g + e4 - e5) \* (2 \* e1 + e3 + e5 + k)) - ((p + e5) \* (f + 2 \* e3 + 2 \* e5) ^ 2)

Rem matriz negativa

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$fu = fu * -1$$

$$\text{Cells}(8, 5) = fu$$

$$hu = hu * -1$$

$$\text{Cells}(9, 5) = hu$$

$$iu = iu * -1$$

$$\text{Cells}(10, 5) = iu$$

$$ju = ju * -1$$

$$\text{Cells}(11, 5) = ju$$

Rem derivadas de la matriz

$$\text{dfue1} = (c + 3 * e1 - e4) ^ 3 + 9 * (c + 3 * e1 - e4) ^ 2 * (d + e1 + e3 + e4) - K1 * (e1 - b + e3 + e4) * (k + 2 * e1 + e3 + e5) ^ 2 + K1 * (a - e1) * (k + 2 * e1 + e3 + e5) ^ 2 + K1 * (a - e1) * (4 * k + 8 * e1 + 4 * e3 + 4 * e5) * (e1 - b + e3 + e4)$$

$$\text{Cells}(14, 5) = \text{dfue1}$$

$$\text{dfue3} = (c + 3 * e1 - e4) ^ 3 + K1 * (a - e1) * (2 * e1 + e3 + e5 + k) ^ 2 + K1 * (a - e1) * (4 * e1 + 2 * e3 + 2 * e5 + 2 * k) * (e1 - b + e3 + e4)$$

$$\text{Cells}(14, 6) = \text{dfue3}$$

$$\text{dfue4} = (c + 3 * e1 - e4) ^ 3 - 3 * (c + 3 * e1 - e4) ^ 2 * (d + e1 + e3 + e4) + K1 * (a - e1) * (2 * e1 + e3 + e5 + k) ^ 2$$

$$\text{Cells}(14, 7) = \text{dfue4}$$

$$\text{dfue5} = K1 * (a - e1) * (4 * e1 + 2 * e3 + 2 * e5 + 2 * k) * (e1 - b + e3 + e4)$$

$$\text{Cells}(14, 8) = \text{dfue5}$$

$$\text{dhue1} = (2 * e3 + 2 * e5 + f) ^ 2 + 2 * K3 * (e - e3) * (e1 - b + e3 + e4) + K3 * (e - e3) * (2 * e1 + e3 + e5 + k)$$

$$\text{Cells}(15, 5) = \text{dhue1}$$

$$\text{dhue3} = (2 * e3 + 2 * e5 + f) ^ 2 + (8 * e3 + 8 * e5 + 4 * f) * (d + e1 + e3 + e4) - K3 * (e1 - b + e3 + e4) * (2 * e1 + e3 + e5 + k) + K3 * (e - e3) * (e1 - b + e3 + e4) + K3 * (e - e3) * (2 * e1 + e3 + e5 + k)$$

$$\text{Cells}(15, 6) = \text{dhue3}$$

$$\text{dhue4} = (2 * e3 + 2 * e5 + f) ^ 2 + K3 * (e - e3) * (2 * e1 + e3 + e5 + k)$$

$$\text{Cells}(15, 7) = \text{dhue4}$$

$$\text{dhue5} = (8 * e3 + 8 * e5 + 4 * f) * (d + e1 + e3 + e4) + K3 * (e - e3) * (e1 - b + e3 + e4)$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



$$\text{Cells}(15, 8) = \text{dhue5}$$

$$\text{iue1} = e4 - e5 + g + 3 * K4 * (e1 - b + e3 + e4) + K4 * (c + 3 * e1 - e4)$$

$$\text{Cells}(16, 5) = \text{iue1}$$

$$\text{iue3} = e4 - e5 + g + K4 * (c + 3 * e1 - e4)$$

$$\text{Cells}(16, 6) = \text{iue3}$$

$$\text{iue4} = d + e1 + e3 + 2 * e4 - e5 + g - K4 * (e1 - b + e3 + e4) + K4 * (c + 3 * e1 - e4)$$

$$\text{Cells}(16, 7) = \text{iue4}$$

$$\text{iue5} = -d - e1 - e3 - e4$$

$$\text{Cells}(16, 8) = \text{iue5}$$

$$\text{djue1} = -2 * K5 * (e5 - h) * (e4 - e5 + g)$$

$$\text{Cells}(17, 5) = \text{djue1}$$

$$\text{djue3} = -(e5 + p) * (8 * e3 + 8 * e5 + 4 * f) - K5 * (e5 - h) * (e4 - e5 + g)$$

$$\text{Cells}(17, 6) = \text{djue3}$$

$$\text{djue4} = -K5 * (e5 - h) * (2 * e1 + e3 + e5 + k)$$

$$\text{Cells}(17, 7) = \text{djue4}$$

$$\text{djue5} = K5 * (e5 - h) * (2 * e1 + e3 + e5 + k) - (2 * e3 + 2 * e5 + f) ^ 2 - K5 * (e5 - h) * (e4 - e5 + g) - (e5 + p) * (8 * e3 + 8 * e5 + 4 * f) - K5 * (e4 - e5 + g) * (2 * e1 + e3 + e5 + k)$$

$$\text{Cells}(17, 8) = \text{djue5}$$

Rem lectura de matriz

$$e12 = \text{Cells}(27, 5)$$

$$e11 = e12 + e1$$

$$O = \text{Abs}(e1 - e11)$$

$$e1 = e11$$

$$e32 = \text{Cells}(28, 5)$$

$$e31 = e32 + e3$$

$$e3 = e31$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

e42 = Cells(29, 5)

e41 = e42 + e4

e4 = e41

e52 = Cells(30, 5)

e51 = e52 + e5

e5 = e51

[Exit Do]

Loop

Cells(8, 10) = e11

Cells(9, 10) = e31

Cells(10, 10) = e41

Cells(11, 10) = e51

End Sub

---

## **C.P.S.**

Sub Botón2\_Haga\_clic\_en()

Rem Formacion de escoria

Rem lectura de celdas

a = Cells(38, 3)

b = Cells(39, 3)

c = Cells(40, 3)

d = Cells(41, 3)

e = Cells(42, 3)

K1 = Cells(45, 3)

K3 = Cells(46, 3)

e1 = 4.13

e2 = 6.195

O = 5

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Rem sumador de celdas

For i = 38 To 42

j = Cells(i, 3)

k = k + j

Next i

Do While O > 0.05

Rem funciones

fu = K1 \* ((3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 3 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 5) - (d + e1) \* (4 \* e1 + e2 - k) ^ 4 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 3

gu = K3 \* ((3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 2 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 3) - (c + 2 \* e2) ^ 2 \* (4 \* e1 + e2 - k) \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2

Rem matriz negativa

fu = fu \* -1

Cells(38, 5) = fu

gu = gu \* -1

Cells(39, 5) = gu

Rem derivadas de la matriz

dfue1 = 9 \* K1 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 2 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 5 - (4 \* e1 + e2 - k) ^ 4 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 3 + 25 \* K1 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 3 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 4 - 16 \* (d + e1) \* (4 \* e1 + e2 - k) ^ 3 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 3 - 9 \* (d + e1) \* (4 \* e1 + e2 - k) ^ 4 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2

Cells(43, 5) = dfue1

dfue2 = 6 \* K1 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 2 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 5 + 15 \* K1 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 3 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 4 - 4 \* (d + e1) \* (4 \* e1 + e2 - k) ^ 3 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 3 - 6 \* (d + e1) \* (4 \* e1 + e2 - k) ^ 4 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2

Cells(43, 6) = dfue2

dgue1 = 15 \* K3 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 2 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 2 - 4 \* (c + 2 \* e2) ^ 2 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2 - (c + 2 \* e2) ^ 2 \* (4 \* e1 + e2 - k) \* (6 \* e + 18 \* e1 + 12 \* e2) + K3 \* (18 \* e1 - 6 \* a + 12 \* e2) \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 3

Cells(44, 5) = dgue1

dgue3 = 9 \* K3 \* (3 \* e1 - a + 2 \* e2) ^ 2 \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 2 - (c + 2 \* e2) ^ 2 \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2 - (4 \* c + 8 \* e2) \* (4 \* e1 + e2 - k) \* (e + 3 \* e1 + 2 \* e2) ^ 2 - (c + 2 \* e2) ^ 2 \* (4 \* e1 + e2 - k) \* (4 \* e + 12 \* e1 + 8 \* e2) + K3 \* (12 \* e1 - 4 \* a + 8 \* e2) \* (5 \* e1 - b + 3 \* e2) ^ 3

Cells(44, 6) = dgue3

Rem lectura de matriz

e12 = Cells(52, 5)

e11 = e12 + e1

O = Abs(e1 - e11)

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

e1 = e11

e32 = Cells(53, 5)

e31 = e32 + e2

e2 = e31

[Exit Do]

Loop

Cells(37, 10) = e11

Cells(38, 10) = e31

Rem Formacion de cobre

Rem lectura de celdas

a = Cells(58, 3)

b = Cells(59, 3)

c = Cells(60, 3)

d = Cells(61, 3)

e = Cells(62, 3)

K4 = Cells(65, 3)

K5 = Cells(66, 3)

e4 = 84.869

e5 = 0.5105

O = 5

k = 0

j = 0

fu = 0

gu = 0

Rem sumador de celdas

For i = 58 To 62

j = Cells(i, 3)

k = k + j

Next i

Do While O > 1

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### Rem funciones

$$fu = K4 * ((e4 - e5 + k) * (e4 - a + 2 * e5) * (e4 - b + 3 * e5)) - (c + 2 * e4) ^ 2 * (e + e4 + 2 * e5)$$

$$gu = K5 * ((e4 - a + 2 * e5) ^ 2 * (e4 - b + 3 * e5) ^ 3) + (d + 2 * e5) ^ 2 * (e + e4 + 2 * e5) ^ 2 * (e4 - e5 + k)$$

### Rem matriz negativa

$$fu = fu * -1$$

$$\text{Cells}(58, 5) = fu$$

$$gu = gu * -1$$

$$\text{Cells}(59, 5) = gu$$

### Rem derivadas de la matriz

$$dfue1 = K4 * (e4 - a + 2 * e5) * (e4 - b + 3 * e5) - (4 * c + 8 * e4) * (e + e4 + 2 * e5) - (c + 2 * e4) ^ 2 + K4 * (e4 - e5 + k) * (e4 - a + 2 * e5) + K4 * (e4 - e5 + k) * (e4 - b + 3 * e5)$$

$$\text{Cells}(63, 5) = dfue1$$

$$dfue3 = 3 * K4 * (e4 - e5 + k) * (e4 - a + 2 * e5) - K4 * (e4 - a + 2 * e5) * (e4 - b + 3 * e5) - 2 * (c + 2 * e4) ^ 2 + 2 * K4 * (e4 - e5 + k) * (e4 - b + 3 * e5)$$

$$\text{Cells}(63, 6) = dfue3$$

$$dgue1 = (d + 2 * e5) ^ 2 * (e + e4 + 2 * e5) ^ 2 + K5 * (2 * e4 - 2 * a + 4 * e5) * (e4 - b + 3 * e5) ^ 3 + 3 * K5 * (e4 - a + 2 * e5) ^ 2 * (e4 - b + 3 * e5) ^ 2 + (d + 2 * e5) ^ 2 * (2 * e + 2 * e4 + 4 * e5) * (e4 - e5 + k)$$

$$\text{Cells}(64, 5) = dgue1$$

$$dgue3 = K5 * (4 * e4 - 4 * a + 8 * e5) * (e4 - b + 3 * e5) ^ 3 - (d + 2 * e5) ^ 2 * (e + e4 + 2 * e5) ^ 2 + 9 * K5 * (e4 - a + 2 * e5) ^ 2 * (e4 - b + 3 * e5) ^ 2 + (4 * d + 8 * e5) * (e + e4 + 2 * e5) ^ 2 * (e4 - e5 + k) + (d + 2 * e5) ^ 2 * (4 * e + 4 * e4 + 8 * e5) * (e4 - e5 + k)$$

$$\text{Cells}(64, 6) = dgue3$$

### Rem lectura de matriz

$$e42 = \text{Cells}(72, 5)$$

$$e41 = e42 + e4$$

$$O = \text{Abs}(e4 - e41)$$

$$e4 = e41$$

$$e52 = \text{Cells}(73, 5)$$

$$e51 = e52 + e5$$

$$e5 = e51$$

[Exit Do]

Loop

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Cells(57, 10) = e41

Cells(58, 10) = e51 End Sub

## XIV. Anexo Cálculo de Intercambiadores de Calor.

### 14.1 Intercambiador 2.

- Balance de Energía.

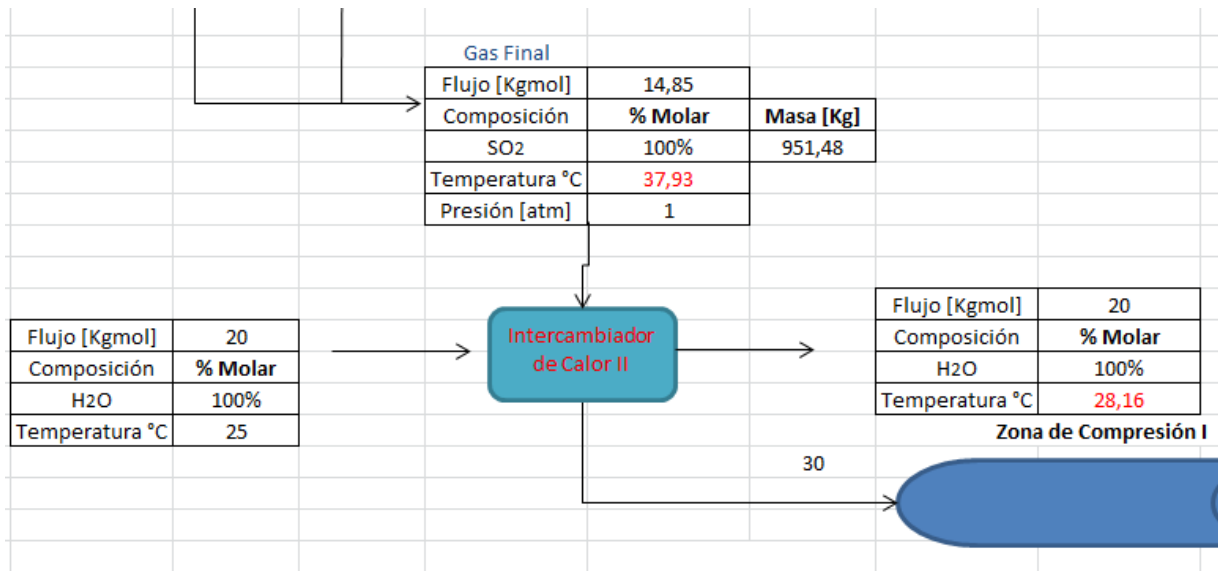


Figura 60. Datos sobre Intercambiador de Calor.

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, la temperaturas de salida es fijada a 30°C y base de entalpia es a la entrada.

$$Q_{SO_2} + Q_{H_2O} = 0$$

Desarrollando dicha expresión, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{SO_2} = n_{SO_2} * \int_{t_1}^{t_2} cp_{SO_2} dt$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Q_{SO_2} = 14,86 * \int_{310,93}^{303} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt$$

$$Q_{SO_2} = -4,769 * 10^3 [KJ]$$

Dado.

$$0 = 20 * \int_{298}^t 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) dt + Q_{SO_2}$$

Resolviendo Ecuación, se obtiene:

$$t = 301,162 \text{ } ^\circ K = 28,16 \text{ } ^\circ C$$

- **Cálculo de Dimensiones.**

<b>Q</b>	4519,95	[BTU/hr]
<b>LMTD</b>	12,82	[°F]

Agua:

<b>Masa</b>	792	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	79,84	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	2,178	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,353	[BTU/(hr pie °f)]
<b>Flujo Volumétrico</b>	0,003525641	[pie^3/s]

SO2:

<b>Masa</b>	2093,62	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	93,137	[°F]
<b>cp</b>	0,15	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	0,031944	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,110013289	[BTU/(hr pie °f)]

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Velocidad Recomendada} = 6 \left[ \frac{\text{pie}}{\text{s}} \right]$$

$$\text{Área Recomendada} = \frac{\text{Flujo Volumétrico}}{6} = 0,000587607 \text{ [pie}^2\text{]}$$

Suponer:

$$100 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$\text{Área de Transferencia de Calor} = \frac{Q}{100 * \text{LMTD}} = 3,52702028$$

<b>para tubos de 3/4 plg., BGW=16:</b>	<b>area de transf. por tubo:</b>	<b>0,1963</b>	<b>[pie<sup>2</sup>/pie]</b>
	<b>DI(tubos):</b>	<b>0,052</b>	<b>[pie]</b>
	<b>area de flujo por tubo:</b>	<b>0,302</b>	<b>[plg<sup>2</sup>]</b>

Suponer:

$$\text{Largo} = 4 \text{ [pie]}$$

$$\text{Número de Tubos} = \frac{\text{Área de Transferencia de Calor}}{\text{Área de Transferencia por tubo} * \text{Largo}} = 4,490 \rightarrow 5$$

<b>Buscar en tabla para tubos DE=3/4 [plg], arreglo en cuadro pt=1 [plg]</b>			
	<b>numero de tubos(st):</b>	<b>8</b>	
	<b>numero de pasos:</b>	<b>1</b>	
	<b>DI(carcaza):</b>	<b>0,666666667</b>	<b>[pie]</b>
	<b>pt:</b>	<b>1</b>	<b>[plg]</b>

Recalculo:

$$\text{Área de Transferencia de Calor} =$$

$$\text{Número de Tubos(st)} * \text{Número de Pasos} * \text{Área de Tranferencia por Tubo} * \text{Largo} = 6,2816$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



**Tubo (agua):**

$$\text{Área de Flujo} = \text{Área Recomendada} = 0,000587607 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de los Tubos} = \frac{\text{Masa(Agua)}}{\text{Área de Flujo}} = 1347840 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \text{Velocidad de Tubos} * \left( \frac{\text{DI(tubos)}}{\text{Viscosidad}} \right) = 32179,83$$

$$pr = cp * \left( \frac{\text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} \right) = 6,1699$$

$$hi = 0,027 * \frac{\text{Conductividad Térmica}}{\text{DI(tubos)}} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1 = 1357,1563$$

$$\text{Coeficiente de Pelicula} = 1129,1541$$

**Carcaza (SO2):**

$$\text{Diámetro equivalente en cuadro} = \frac{4 * \frac{pt^2 - \left( 3,14 * \left( \frac{0,75}{2} \right)^2 \right)}{3,14 * 0,75}}{12} = 0,07904 \text{ [pie]}$$

$$c = pt - 0,75 = 0,25 \text{ [pulg]}$$

$$B = \text{DI(carcaza)} * 12 = 8 \text{ [pulg]} \text{ Se Asume máximo espaciamiento de deflectores.}$$

$$\text{DI(carcaza)} = \text{DI(carcaza)} * 12 = 8 \text{ [pulg]}$$

$$\text{Área de Flujo} = \text{DI(carcaza)} * C * \frac{B}{144 * pt} = 0,11 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de Materia} = \frac{\text{masa(carcaza)}}{\text{Área de Flujo}} = 18842,58 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \frac{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Velocidad de Materia}}{\text{Viscosidad(carcaza)}} = 46624,42$$

$$pr = \frac{cp * \text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} = 0,04359$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\text{Coeficiente de Película} = \frac{0,027 * \text{Conductividad Térmica}}{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Reynolds}^{0,8} * \text{pr}^{\frac{1}{3}} * 1}$$

$$= 71,8290 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

**Global:**

$$U_c = \frac{\text{Coeficiente de Película(tubo)} * \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}{\text{Coeficiente de Película(tubo)} + \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}$$

$$= 67,5330 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$U_d = \frac{Q}{\text{Área de Transferencia de Calor} * \text{LMTD}} = 56,1274 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$\text{Factor de Obstrucción} = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} = 0,00300$$

## 14.2 Intercambiador 3:

- Balance de Energía.

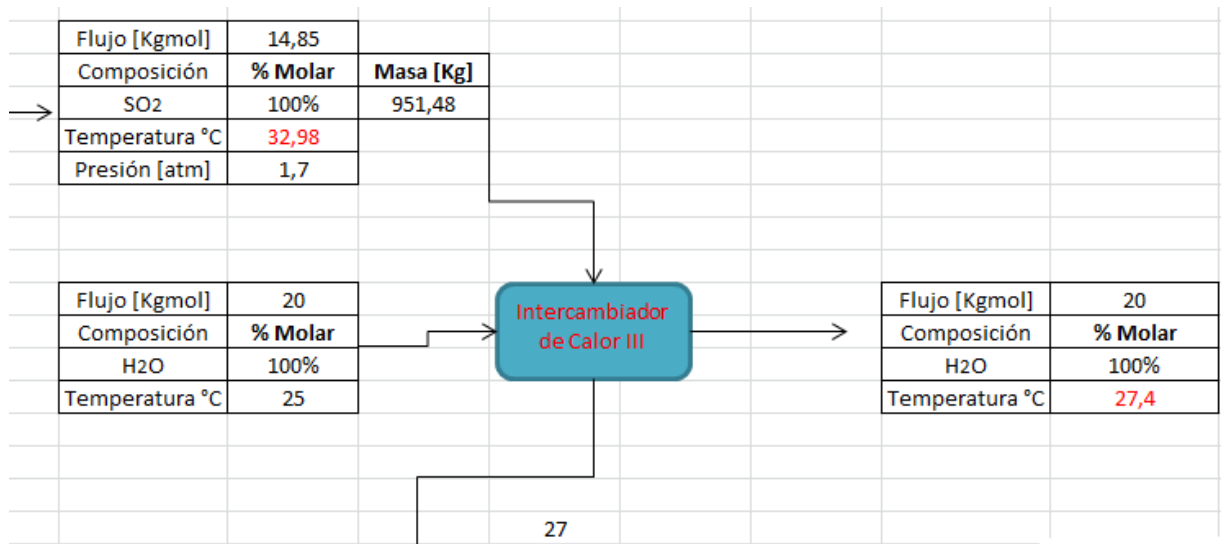


Figura 61. Datos sobre Intercambiador de Calor.

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, la temperaturas de salida es fijada a 27°C y base de entalpia es a la entrada.

$$QSO_2 + QH_2O = 0$$

Desarrollando dicha expresión, se obtiene lo siguiente:

$$QSO_2 = nSO_2 * \int_{t_1}^{t_2} cpSO_2 dt$$

$$QSO_2 = 14,86 * \int_{305,98}^{300} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt$$

$$QSO_2 = -3,573 * 10^3 [KJ]$$

Dado.

$$0 = 20 * \int_{298}^t 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) dt + QSO_2$$

Resolviendo Ecuación, se obtiene:

$$t = 300,369 \text{ } ^\circ K = 27,4 \text{ } ^\circ C$$

- **Cálculo de Dimensiones.**

<b>Q</b>	3386,41	[BTU/hr]
<b>LMTD</b>	4,69	[°F]

Agua:

<b>Masa</b>	792	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	79,16	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	2,27	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,353	[BTU/(hr pie °f)]
<b>Flujo Volumétrico</b>	0,003525641	[pie^3/s]

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

SO2:

<b>Masa</b>	2093,62	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	85,982	[°F]
<b>cp</b>	0,15	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	0,031218	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,111515572	[BTU/(hr pie °f)]

$$Velocidad\ Recomendada = 6 \left[ \frac{pie}{s} \right]$$

$$\text{Área Recomendada} = \frac{\text{Flujo Volumétrico}}{6} = 0,000587607 \text{ [pie}^2\text{]}$$

Suponer:

$$100 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * °F} \right]$$

$$\text{Área de Transferencia de Calor} = \frac{Q}{100 * LMTD} = 7,2205$$

<b>para tubos de 3/4 plg., BGW=16:</b>	<b>area de transf. por tubo:</b>	<b>0,1963</b>	<b>[pie^2/pie]</b>
	<b>DI(tubos):</b>	<b>0,052</b>	<b>[pie]</b>
	<b>area de flujo por tubo:</b>	<b>0,302</b>	<b>[plg^2]</b>

Suponer:

$$Largo = 6 \text{ [pie]}$$

$$\text{Número de Tubos} = \frac{\text{Área de Transferencia de Calor}}{\text{Área de Transferencia por tubo} * Largo} = 6,130 \rightarrow 7$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Buscar en tabla para tubos DE=3/4 [plg], arreglo en cuadro pt=1 [plg]			
	numero de tubos(st):	11	
	numero de pasos:	1	
	DI(carcaza):	0,666666667	[pie]
	pt:	1	[plg]

Recalculo:

Área de Transferencia de Calor =

Número de Tubos(st) \* Número de Pasos \* Área de Transferencia por Tubo \* Largo =  
12,9558

**Tubo (agua):**

Área de Flujo = Área Recomendada = 0,000587607 [pie<sup>2</sup>]

$$\text{Velocidad de los Tubos} = \frac{\text{Masa(Agua)}}{\text{Área de Flujo}} = 1347840 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \text{Velocidad de Tubos} * \left( \frac{\text{DI(tubos)}}{\text{Viscosidad}} \right) = 30875,63$$

$$pr = cp * \left( \frac{\text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} \right) = 6,4306$$

$$hi = 0,027 * \frac{\text{Conductividad Térmica}}{\text{DI(tubos)}} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1 = 1331,20$$

Coefficiente de Pelicula = 1107,56

**Carcaza (SO2):**

$$\text{Diámetro equivalente en cuadro} = \frac{4 * \frac{pt^2 - \left( 3,14 * \left( \frac{0,75}{2} \right)^2 \right)}{3,14 * 0,75}}{12} = 0,07904 \text{ [pie]}$$

$$c = pt - 0,75 = 0,25 \text{ [pulg]}$$

$B = \text{DI(carcaza)} * 12 = 8 \text{ [pulg]}$  Se Asume máximo espaciamiento de deflectores.

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$DI(\text{carcaza}) = DI(\text{carcaza}) * 12 = 8 \text{ [pulg]}$$

$$\text{Área de Flujo} = DI(\text{carcaza}) * C * \frac{B}{144 * pt} = 0,11 \text{ [pie}^2\text{]}$$

$$\text{Velocidad de Materia} = \frac{\text{masa}(\text{carcaza})}{\text{Área de Flujo}} = 18842,58 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2 * \text{hr}} \right]$$

$$\text{Reynolds} = \frac{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Velocidad de Materia}}{\text{Viscosidad}(\text{carcaza})} = 47708,71$$

$$pr = \frac{cp * \text{Viscosidad}}{\text{Conductividad Térmica}} = 0,042025$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de Película} &= \frac{0,027 * \text{Conductividad Térmica}}{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Reynolds}^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1} \\ &= 73,2632 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

**Global:**

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{\text{Coeficiente de Película}(\text{tubo}) * \text{Coeficiente de Película}(\text{carcaza})}{\text{Coeficiente de Película}(\text{tubo}) + \text{Coeficiente de Película}(\text{carcaza})} \\ &= 68,7177 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

$$U_d = \frac{Q}{\text{Área de Transferencia de Calor} * \text{LMTD}} = 55,7317 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$\text{Factor de Obstrucción} = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} = 0,003390$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

### 14.3 Intercambiador 4:

- Balance de Energía.

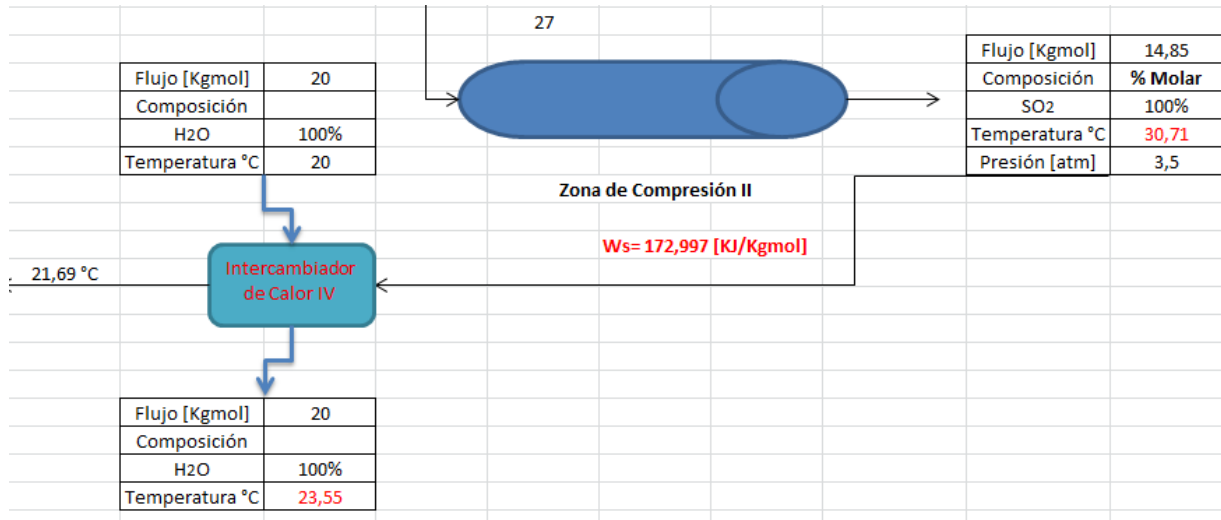


Figura 62. Datos sobre Intercambiador de Calor.

Para realizar dicho balance se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: Los equipos son adiabáticos, la temperaturas de salida es fijada a 21,69°C y base de entalpia es a la entrada.

$$Q_{SO_2} + Q_{H_2O} = 0$$

Desarrollando dicha expresión, se obtiene lo siguiente:

$$Q_{SO_2} = n_{SO_2} * \int_{t_1}^{t_2} cp_{SO_2} dt$$

$$Q_{SO_2} = 14,86 * \int_{303,71}^{294,69} 8,314 * (5,699 + 0,000801 * t - 101500 * t^{-2}) dt$$

$$Q_{SO_2} = -5,354 * 10^3 [KJ]$$

Dado.

$$0 = 20 * \int_{298}^t 8,314 * (8,712 + 0,00125 * t - 1,8 * 10^{-7} * t^2) dt + Q_{SO_2}$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

Resolviendo Ecuación, se obtiene:

$$t = 296,552 \text{ } ^\circ K = 23,55 \text{ } ^\circ C$$

- **Cálculo de Dimensiones.**

<b>Q</b>	5074,4	[BTU/hr]
<b>LMTD</b>	4,92	[°F]

Agua:

<b>Masa</b>	792	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	71,195	[°F]
<b>cp</b>	1	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	2,178	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,348	[BTU/(hr pie °f)]
<b>Flujo Volumétrico</b>	0,003525641	[pie <sup>3</sup> /s]

SO<sub>2</sub>:

<b>Masa</b>	2093,62	[lb/hr]
<b>T Promedio</b>	79,13	[°F]
<b>cp</b>	0,15	[BTU/(lb °F)]
<b>Viscosidad</b>	0,03097	[lb/(pie hr)]
<b>Conductividad Térmica</b>	0,1128	[BTU/(hr pie °f)]

$$Velocidad\ Recomendada = 6 \left[ \frac{pie}{s} \right]$$

$$\acute{A}rea\ Recomendada = \frac{Flujo\ Volum\acute{e}trico}{6} = 0,000587607 \text{ } [pie^2]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”



Suponer:

$$100 \left[ \frac{BTU}{h * pie^2 * ^\circ F} \right]$$

$$\text{Área de Transferencia de Calor} = \frac{Q}{100 * LMTD} = 10,3138$$

para tubos de 3/4 plg., BGW=16:	area de transf. por tubo:	0,1963	[pie^2/pie]
	DI(tubos):	0,052	[pie]
	area de flujo por tubo:	0,302	[plg^2]

Suponer:

$$Largo = 4 [pie]$$

$$\text{Número de Tubos} = \frac{\text{Área de Transferencia de Calor}}{\text{Área de Transferencia por tubo} * Largo} = 13,135 \rightarrow 14$$

Buscar en tabla para tubos DE=3/4 [plg], arreglo en cuadro pt=1 [plg]			
	numero de tubos(st):	12	
	numero de pasos:	2	
	DI(carcaza):	0,666666667	[pie]
	pt:	1	[plg]

Recalculo:

$$\text{Área de Transferencia de Calor} =$$

$$\text{Número de Tubos(st)} * \text{Número de Pasos} * \text{Área de Tranferencia por Tubo} * Largo = 18,8448$$

**Tubo (agua):**

$$\text{Área de Flujo} = \text{Área Recomendada} = 0,000587607 [pie^2]$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$Velocidad\ de\ los\ Tubos = \frac{Masa(Agua)}{\text{Área de Flujo}} = 1347840 \left[ \frac{lb}{pie^2 * hr} \right]$$

$$Reynolds = Velocidad\ de\ Tubos * \left( \frac{DI(tubos)}{Viscosidad} \right) = 32179,83$$

$$pr = cp * \left( \frac{Viscosidad}{Conductividad\ Térmica} \right) = 6,2586$$

$$hi = 0,027 * \frac{Conductividad\ Térmica}{DI(tubos)} * Reynolds^{0,8} * pr^{\frac{1}{3}} * 1 = 1344,31$$

$$Coeficiente\ de\ Pelicula = 1118,47$$

### **Carcaza (SO2):**

$$Diámetro\ equivalente\ en\ cuadro = \frac{4 * \frac{pt^2 - \left( 3,14 * \left( \frac{0,75}{2} \right)^2 \right)}{3,14 * 0,75}}{12} = 0,07904 \ [pie]$$

$$c = pt - 0,75 = 0,25 \ [pulg]$$

$$B = DI(carcaza) * 12 = 8 \ [pulg] \ Se\ Asume\ máximo\ espaciamiento\ de\ deflectores.$$

$$DI(carcaza) = DI(carcaza) * 12 = 8 \ [pulg]$$

$$Área\ de\ Flujo = DI(carcaza) * C * \frac{B}{144 * pt} = 0,11 \ [pie^2]$$

$$Velocidad\ de\ Materia = \frac{masa(carcaza)}{\text{Área de Flujo}} = 18842,58 \left[ \frac{lb}{pie^2 * hr} \right]$$

$$Reynolds = \frac{Diámetro\ equivalente\ en\ cuadro * Velocidad\ de\ Materia}{Viscosidad(carcaza)} = 48090,75$$

$$pr = \frac{cp * Viscosidad}{Conductividad\ Térmica} = 0,04032$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de Película} &= \frac{0,027 * \text{Conductividad Térmica}}{\text{Diámetro equivalente en cuadro} * \text{Reynolds}^{0,8} * \text{pr}^{\frac{1}{3}} * 1} \\ &= 73,5591 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

**Global:**

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{\text{Coeficiente de Película(tubo)} * \text{Coeficiente de Película(carcaza)}}{\text{Coeficiente de Película(tubo)} + \text{Coeficiente de Película(carcaza)}} \\ &= 69,0197 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right] \end{aligned}$$

$$U_d = \frac{Q}{\text{Área de Transferencia de Calor} * \text{LMTD}} = 54,7303 \left[ \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^\circ\text{F}} \right]$$

$$\text{Factor de Obstrucción} = \frac{U_c - U_d}{U_c * U_d} = 0,0037828$$

---

“Pre factibilidad técnico económica para el abatimiento de gases fugitivos en una fundición de cobre.”