

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

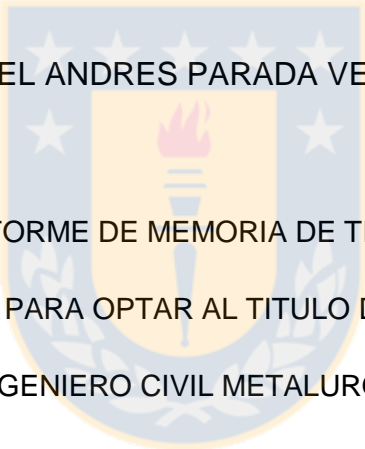
Profesor Patrocinante: Roberto Parra F.

Facultad de Ingeniería

Ingeniero Supervisor: Roberto Parada A.

EFFECTO DE LA RAZON S/Cu EN LA ALIMENTACION DE CONCENTRADO
A UN PROCESO RESTRINGIDO DE FUSION-CONVERSION EN LA
FUNDICION CHAGRES

DANIEL ANDRES PARADA VERGARA

The logo of the University of Concepción is a shield-shaped emblem. It features a central torch with a flame, set against a yellow background. The shield is surrounded by a blue border with white stars. The text 'UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN' is written around the perimeter of the shield.

INFORME DE MEMORIA DE TITULO
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL METALURGICO

DICIEMBRE

2017



INDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	5
2.- ANTECEDENTES.....	8
3.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE MASA Y ENERGÍA.....	17
4.- VALIDACIÓN.....	29
5.- SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	38
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	54
ANEXOS.....	55





1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se da la presentación del tema y como éste es analizado mediante la teoría de restricciones. Siguiendo con la presentación del problema que se da en la fundición Chagres, donde la existencia de múltiples equipos interconectados en el proceso impide en determinadas ocasiones operar a la máxima capacidad de tasa de fusión que permite el horno flash. Se plantea el desarrollo de un balance de masa y energía, que permita observar como la variación de la razón S/Cu en el concentrado afecta la tasa de fusión debido a restricciones existentes en los subprocesos de fusión y conversión.

1.1.- Presentación del tema

La teoría de restricciones, creada por el doctor en Física Eliyahu Goldratt ^[1], presenta como un proceso multitarea va siendo limitado en su velocidad debido a restricciones existentes, y finalmente, como una de ellas restringe globalmente el proceso. Su trabajo se basa en cinco puntos principales para así poder maximizar la tarea del proceso, estos son:

- Identificar las restricciones del sistema,
- Decidir cómo explotarlos,
- Subordinar todo a la decisión anterior,
- Superar la restricción del sistema para elevar la capacidad,
- Si se ha roto la restricción, identificar nuevas que puedan aparecer.

En una fundición de cobre se encuentran diversas restricciones que limitan la finalidad que posee la empresa, ya sea por limitaciones tecnológicas respecto a sus capacidades de los equipos, limitaciones debido a políticas laborales o ambientales, o limitaciones del mercado.

El modelo de fundición desarrollado corresponde al de la fundición Chagres perteneciente a la compañía Anglo American, y consta de una línea de producción desde el secado de concentrados hasta la formación de ánodos y con operaciones de suministros adyacentes a la línea productiva. La línea de producción se conforma de secador de concentrado, horno de fusión flash, convertidores Pierce-Smith, horno de limpieza de escorias, planta de ácido y rueda de moldeo. Las operaciones de suministros cuentan con la planta de oxígeno.

Así, de la descripción anterior, se toma la línea de producción separada en dos grandes procesos, uno correspondiente a la fusión y el otro a la conversión. Así, a su vez estos dos están

subdivididos en sub-procesos, que corresponden a las etapas de transformación del concentrado donde dependen de un equipo de operación en particular.

De acuerdo a la calidad de los concentrados (mineralogía) y sus leyes, se utiliza la variable razón S/Cu como la principal característica del concentrado que permite observar cuando la tasa de fusión estará restringida por el proceso de fusión o por el proceso de conversión:

- Proceso de fusión (S/Cu >1)
- Proceso de conversión (S/Cu <1)

Los valores antes señalados fueron definidos a partir de un estudio previo en que son estudiadas las restricciones existentes de los equipos ^[2]. Es necesario destacar que las restricciones asociadas a los equipos no son necesariamente cuellos de botella, ya que ésta última denominación es utilizada para la restricción principal, o sea, que restringe globalmente a la línea de producción según la razón S/Cu del concentrado.

1.2.- Planteamiento del problema

Un concentrado de cualquier mineralogía se transformara en la fundición siguiendo el mismo esquema de proceso: concentrado -> eje -> metal blanco -> cobre blíster -> ánodo, sin embargo, según su composición generará una cantidad mayor o menor de alguno de éstos productos, y mayor o menor cantidad de algún subproducto: escoria y gases. Estos productos y subproductos dependen directamente de la composición mineralógica. Un concentrado alto en azufre producirá mayores cantidades de SO₂ en los gases de salida, y uno de bajo azufre menores.

Las restricciones utilizadas en este trabajo corresponden a: la capacidad de insuflar oxígeno al HFF y a los convertidores, la capacidad de producción en la rueda de moldeo para formar ánodos, el azufre que puede procesar la planta de ácido, el volumen de gases que puede soportar la caldera a la salida del HFF y la capacidad de los HLE de tratar las escorias producidas. Estas restricciones poseen una capacidad máxima de procesamiento, y cuando estos valores son alcanzados, debido a características químicas de los concentrados, es que restringen la tasa de fusión del HFF.

Finalmente, si se considera que la principal característica de negocio de una fundición es su capacidad para procesar concentrado, se observa que las restricciones existentes limitan ésta capacidad y por tanto impiden que el proceso de purificación sea llevado a su máxima capacidad.

1.3.- Propuesta de trabajo

Se propone utilizar y validar con datos operacionales medidos un balance de masa y energía, ya desarrollado sobre los procesos de fusión y conversión, para determinar cuál es el subproceso que limita maximizar la tasa de alimentación al HFF. Esto en función de características mineralógicas de un concentrado.

La metodología consistirá en realizar cálculos de balance de masa y energía para diferentes características mineralógicas del concentrado alimentado. Como resultado se analizará el efecto de estos diferentes concentrados en alcanzar o no las restricciones de capacidad de tratamiento de los diferentes equipos que conforman cada subproceso. Cuando ésta condición se establece la capacidad de tratamiento se ve limitada, pudiendo así, cada restricción, convertirse en un cuello de botella.

De los resultados de los cuellos de botella encontrados se analiza el problema y se propone una metodología de operación que maximice la tasa de fusión.

1.4.- Objetivos

El objetivo principal del trabajo es realizar un estudio sobre el efecto de la variabilidad de los concentrados de cobre existentes en un proceso de fusión-conversión sobre la capacidad de la fundición, para encontrar la forma de maximizar la fusión de éstos.

Los objetivos secundarios de este trabajo son:

- Utilización de un modelo de balance de masa y energía para el proceso de fusión conversión para determinación de cuellos de botella del proceso de producción,
- Validación del modelo con datos operacionales,
- Determinación de la curva optima de alimentación para diferentes tipos de concentrado de cobre de acuerdo a una ley objetivo de eje,
- Evaluación con el modelo de la fundición para casos de concentrados de cobre altos en razón S/Cu.

2.- ANTECEDENTES

El presente capítulo describe los antecedentes generales del proceso, considerando la descripción del concentrado y su análisis químico y luego la descripción de cada subproceso en la fundición Chagres. Posteriormente se describen los equipos y hornos que utiliza Chagres, y cuáles son sus principales características que restringen los procesos productivos.

2.1.- Descripción de los concentrados de cobre

Los concentrados de cobre provienen de las concentradoras y son el resultado de una serie de operaciones: trituración, chancado y molienda de los minerales sulfurados para pasar posteriormente al circuito de flotación obteniendo finalmente el concentrado y un residuo que constituye los relaves o colas. Es importante recalcar que la composición química de los concentrados suele ser muy distinta de una muestra a otra, ya que el contenido del yacimiento no es homogéneo y por consiguiente los valores resultantes deben ser distintos. El concentrado va a la fundición y luego a refinamiento para obtener el metal principal y los otros metales que se encuentran en menores proporciones, como son los metales nobles, el molibdeno, el selenio y otros en menor proporción que presenten un interés económico. Generalmente el contenido de cobre de un concentrado calcopirítico seco es del orden de 30%, y su tamaño de partícula varía entre 10 μm y 200 μm , lo que es considerado óptimo para una liberación máxima^[3].

- 2.1.1.- Concentrados de cobre en la fundición Chagres^[4]

En el proceso Outokumpu de fusión flash el concentrado seco es alimentado al quemador junto a aire enriquecido en oxígeno y se procede a la fusión. La combustión en la torre es casi autógena ya que solo por un leve déficit se combustiona fuelóleo o gas para mantener una temperatura en el baño fundido.

Los concentrados llegan a la fundición Chagres en camiones, luego de ser pesados, descargan en la tolva de recepción de concentrado. Desde este lugar son transportados hasta el edificio de almacenamiento mediante una correa transportadora con capacidad de 120 t/h. En la parte superior del edificio se ubica el carro distribuidor de concentrado, que permite el

almacenamiento en diversas tolvas, dieciséis en total, quince para el almacenamiento de concentrado y una para la sílice, con una capacidad de 1.000 toneladas cada tolva. Por lo tanto, existe una capacidad de almacenamiento de concentrado de 15.000 toneladas que se distribuirá entre los que provengan de las minas Los Bronces, El Soldado y terceros, a quienes se puede comprar dependiendo de las necesidades, sin embargo, predomina una proporción 60% y 30% y 10% de almacenamiento de concentrado, respectivamente.

Los minerales predominantes en los concentrados utilizados en la fundición son los sulfuros primarios y secundarios de cobre, la pirita (FeS_2) está presente en la totalidad de los concentrados, la calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S) y bornita (Cu_5FeS_4) se distribuyen en mayor o menor medida en los concentrados provenientes de diferentes proveedores.

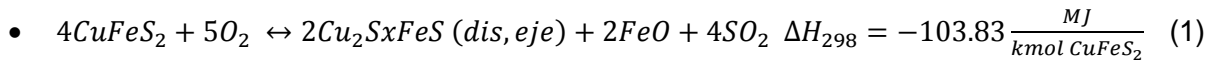
Para el proceso previo a la fusión, el secado de concentrado, éste y el fundente se extraen de cada una de las tolvas mediante un cargador frontal cuyo balde posee una capacidad que fluctúa entre 5 y 6 ton de concentrado dependiendo de las características del material (humedad, densidad, composición química, etc.). El cargador frontal deposita el material en una correa transportadora de 120 t/h de capacidad que lo conduce hacia el edificio de almacenamiento de carga. El Secado de la mezcla se realiza en dos secadores a vapor, después de los secadores la mezcla debe poseer una humedad máxima de 0,2%. Desde este punto la mezcla es enviada hacia un estanque de expansión, para ser transportada en forma neumática hacia la tolva de carga seca previa a la entrada al HFF.

2.2.- Descripción fusión-conversión

El proceso de fusión tiene por objetivo la formación de eje o mata desde una alimentación de concentrados de sulfuros, fundente o mezcla de ellos según se requiera. Este proceso crea dos fases fundidas inmiscibles, una fase más pesada que contiene la mayoría de los sulfuros, eje, y una fase oxidada ferrosa, la escoria. ^[5]

Las reacciones de oxidación del azufre de los sulfuros y el hierro son exotérmicas y permiten alcanzar los niveles adecuados de la composición del eje y aprovechar el calor generado. La formación de la escoria, por la reacción del hierro con la sílice del fundente, forma la fayalita (2FeOxSiO_2), y separa hierro de la mata en un proceso también exotérmico.

Las reacciones principales de la fusión para el eje son ^[6]:



Ambas reacciones son exotérmicas.

El equilibrio más importante se da entre las fases de eje y escoria, el cual es:



Finalmente la presencia de sulfuro de hierro en el eje sirve para reducir el óxido de hierro (III) en óxido de hierro (II) de la siguiente manera:



La reacción anterior sirve para eliminar parte de la magnetita, pues complica las operaciones en el horno debido a su alto punto de fusión ($> 1500^\circ\text{C}$) lo que hace que cristalice en el proceso y eleve la viscosidad de la escoria reteniendo, de esa forma, cobre en ella.

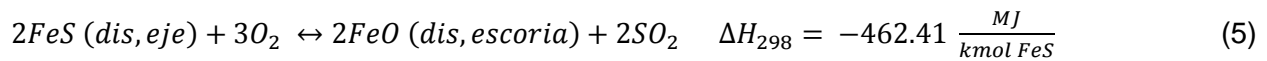
Los otros metales que acompañan al cobre se reducen en mayor o menor grado. Así elementos como el calcio, magnesio o aluminio pasan a la escoria directamente sin reducirse. Los metales preciosos quedan disueltos en el eje y los demás metales como Ni, Co, Pb, Zn, As, Sb, Bi, etc., se distribuyen entre las dos condensadas y la fase gas.

Para éste proceso los hornos empleados pueden ser de fusión continua o fusión flash. En actual funcionamiento en Chile existen los reactores “Reactor Noranda”, “Convertidor Teniente” y “Horno de fusión flash”, éste último en cual está desarrollado el actual trabajo.

La fase posterior a la fusión se denomina conversión, y es el proceso en que el eje es tratado en estado fundido por soplado con aire. En un principio, el azufre del eje se oxida a la vez que el hierro, para producir el metal blanco, el cual es soplado nuevamente para producir el cobre blíster. La escoria ferrosa de la primera fase se separa y forma por adición de sílice, mientras que en la segunda parte no existe casi producción de escoria. Los gases del convertidor salen con alto contenido de SO_2 y arrastran vapores de algunos de los metales más volátiles.

El primer paso de la conversión, denominado escorificación, produce el metal blanco en el que no se deja más que un 1% de sulfuro de hierro. Por lo general el reactor donde se realiza este

proceso es vuelto a cargar con eje y vuelto a soplar para así quedar finalmente cargado con sulfuro de cobre. Las reacciones en ésta etapa son:



Y también la reacción [2].

En la segunda etapa, mediante un nuevo soplado, se oxida el azufre del sulfuro produciéndose cobre blíster. La reacción es:



Debido al alto potencial oxidante de ambas etapas es que se forma magnetita, la cual forma la escoria más viscosa y origina un arrastre elevado de cobre en ella, la que puede ser del orden de 15% o más, es por esto que la escoria producida es siempre enviada a los hornos de limpieza de escoria (HLE).

El cobre blíster finalmente contiene cerca de 1% de S, 0,5% - 0,6% de O y trazas de otros metales. También sus gases de salida tienen cerca de 8% de SO₂ los cuales pueden ser tratados en las plantas de ácido.

- 2.2.1.- Fusión en la fundición Chagres

El proceso de fusión y conversión de concentrados de cobre es el principal método empleado actualmente para la recuperación de cobre de minerales sulfurados. Se basa en la eliminación del Fe por medio de una escoria oxidada teniendo el control de la variable de oxígeno inyectado para controlar la ley del eje.

El proceso de fusión en la fundición Chagres parte con la alimentación del concentrado seco al HFF, la que es realizada mediante correas transportadoras que llevan el concentrado de la tolva de mezcla al secador de concentrado y finalmente a la tolva de alimentación del horno. Ya en el horno el concentrado es combustionado y por sus propiedades fisicoquímicas es separado en dos fases inmiscibles en el settler del horno, las cuales son eje y escoria. Principalmente mediante la diferencia de densidades es que puede ser extraída cada una por canales separados, de ésta forma la escoria es depositada en el HLE y después de su limpieza es llevada en cargadores hasta el botadero de escorias. El eje por su parte es trasladado en cucharas hacia los convertidores.

Como subproducto también se tiene en el HFF los gases metalúrgicos (que poseen entre 30% y 70% de SO_2), los cuales son tomados por la Caldera Mitsubishi Heavy Industries y enfriados en las zonas de radiación y convección. Ya más fríos los gases son pasados por un precipitador electrostático para eliminar las partículas más finas que son arrastradas por los gases y previo a la planta de ácido pasa por un mezclador de gases en donde se juntan con los gases provenientes de la conversión.

- 2.2.2.- Conversión en la fundición Chagres

En la conversión son alimentados los convertidores Peirce-Smith mediante las cucharas que cargan el eje proveniente del HFF mediante las bocas que tienen un área de $2,4 \text{ m}^2$, estas cargas son entre 4 o 5 que contienen 4m^3 de eje cada una. En total son 4 los convertidores que operan bajo un esquema secuencial que permite disponer de tres equipos en caliente y uno frío o en reparación. Los tres convertidores en caliente operan cíclicamente con máximo de dos en chimenea y el resto en preparación o en espera de su siguiente carrera alcanzándose un máximo de 16 ciclos/día, lo que se traduce en que la capacidad máxima de eje que se puede procesar queda en función del oxígeno que finalmente puede ser insuflado siendo un total de 9072 kg de O_2/h .

Las escorias producidas son con alto contenido de cobre por lo que son llevadas al HLE para su posterior limpieza.

Los sopladores de los convertidores que se ocupan para las etapas de soplado a escoria y soplado a cobre, permiten que se disminuya el nivel de SO_2 , el cual es detectado en las casetas de monitoreo ambiental. Además regulan la carga térmica de los convertidores que tienen una pérdida de calor en torno a 714 Mcal/h.

A diferencia del tren de gases del HFF, el tren de gases de la conversión es un sistema abierto y se conforma de una campana captadora de gases refrigerada con agua y una cámara de enfriamiento radiativo. Las cámaras convergen en un único ducto por donde circulan los gases hacia la planta de ácido gracias a un ventilador de tiro inducido.

En la operación normal los gases generados por el horno flash son impulsados hacia la cámara de mezcla por un ventilador de tiro inducido aportando entre 25.000 a 35.000 Nm^3/h con un contenido entre 40 y 50% de SO_2 a una temperatura aproximada de 300 a 400 °C. Los gases del proceso de conversión también son impulsados hasta la cámara de mezcla por un ventilador

de tiro inducido, el caudal de gases de conversión varía desde 90.000 a 120.000 Nm³/h aproximadamente y con un contenido entre 6 y 8% de SO₂, dependiendo ambas variables de si se sopla con uno o dos convertidores, respectivamente. Los gases de conversión llegan a la cámara de mezcla a temperaturas entre 250 y 350 °C en función del aire de dilución succionado por los ventiladores.

En la etapa final de la conversión encontramos los hornos de ánodos para refinación, dos en total, y la rueda de moldeo. Los primeros poseen una capacidad de 180 ton/ciclo, se cargan con un mínimo de cobre blíster equivalente al producto de tres carreras de convertidor para dar inicio a la etapa de oxidación que finaliza aproximadamente 20 minutos después de la recepción de la quinta y última carga. El objetivo es disminuir el contenido de azufre en el cobre blíster de 350 ppm a 70 ppm a través de la inyección de aire por toberas con un caudal de diseño de 1.500 Nm³/h/tobera y una eficiencia de oxígeno de 50% en la oxidación.

La rueda de moldeo que posee la Fundición es de marca Wenmec con capacidad para 16 moldes y se ha diseñado para asegurar una tasa de moldeo instantánea de 40 ton/h, con ánodos que fluctúan su peso entre 278 kg y 420 kg dependiendo de los requerimientos del cliente. Moldear ánodos de mayor peso significa que la rueda de moldeo debe hacer menor cantidad de giros, por lo tanto es más rápido que moldear ánodos con menor peso, pudiendo requerir hasta un 20% menos de tiempo para una masa equivalente. La rapidez de generación de piezas anódicas presenta un comportamiento inverso.

La figura 2.1 representa un esquema general de la fundición, donde se muestra la línea principal de producción y los equipos auxiliares. Como se señaló anteriormente se divide en dos procesos: la fusión y la conversión. A su vez éstos están divididos en sub-procesos en los cuales operan los equipos auxiliares. La descripción y capacidades de cada uno de ellos están descritas en el punto 2.3.

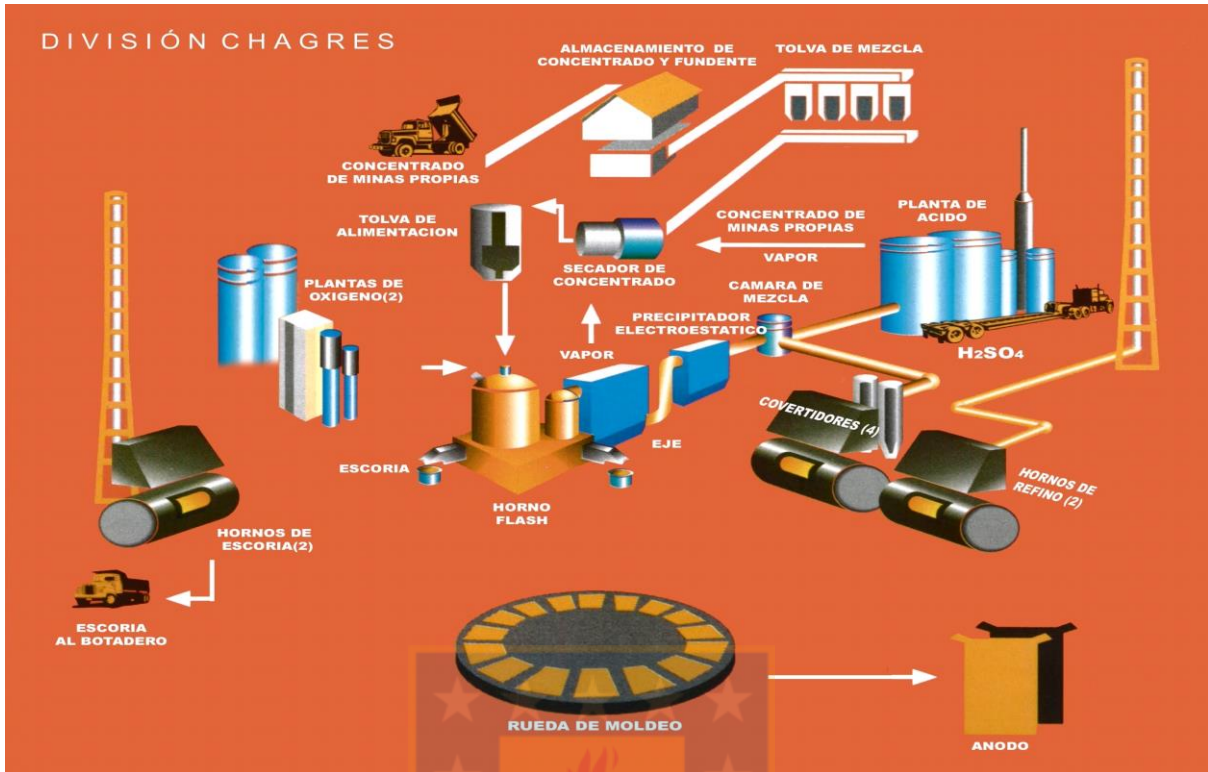


Figura 2.1 Esquema general de la fundición Chagres

2.3.- Caracterización de los equipos de la fundición Chagres y sus restricciones

• 2.3.1.- Horno de Fusión Flash

El horno empleado en la fundición Chagres fue puesto en funcionamiento el año 1995 y repotenciado por Outokumpu el año 2005, tiene 5 metros de alto con un diámetro de 4,2 – 4,6 metros en su torre de reacción, el crisol es de 5 metro de ancho, 1,9 metros de alto y 19 metro de largo, la torre de salida tiene 6,5 metro de alto. Posee un quemador que permite una combustión de 130 ton/h de concentrado seco, la temperatura que alcanzan los líquidos, eje y escoria, en su interior son de 1.260 y 1.300 °C para el eje y la escoria, respectivamente, con un margen aceptado de variabilidad de ± 20 °C para cada fase. Actualmente el suministro de oxígeno se encuentra limitado a la capacidad de producción de las plantas existentes que en total corresponde a 480 t/d de O₂.

- 2.3.2.- Caldera y precipitador electrostático

La Caldera Mitsubishi Heavy Industries posee paneles de tubos omega, dividida en secciones de radiación y convección. Permite una tasa de flujo de gases de 27.000 Nm³/h de diseño con una producción de vapor de 24 t/h. Por su parte el precipitador electroestático permite un flujo de gas de 30.000 Nm³/h a una temperatura entre 350°C – 420°C.

- 2.3.3.- Convertidor Peirce-Smith

En la zona de conversión de la fundición se emplean cuatro convertidores Peirce-Smith, de 7,32 metros (24 ft) de longitud y 3,05 metros (10 ft) de diámetro, son 3 los convertidores en caliente ya sea soplando o descargando y el cuarto en frío. La capacidad de soplado de los convertidores es de 9.072 kg de O₂/h que ingresan mediante 34 toberas de 0,6 metros (2 ft) cada una.

- 2.3.4.- Rueda de moldeo

La rueda de moldeo instalada posee 16 módulos, con un sistema hidráulico de rotación y un sistema de enfriamiento mediante spray. Ha sido diseñado para asegurar una tasa instantánea de 24 ton/h. Durante una operación normal se originan tres moldeos de aproximadamente 180 t/ciclo.

- 2.3.5.- Planta de ácido

La planta de ácido recibe los gases provenientes de la fusión y la conversión. La capacidad volumétrica de la planta de ácido según diseño es de 150.000 Nm³/h con 12% de SO₂. Los gases provenientes de conversión ocupan aproximadamente el 80% de este volumen. Tiene una eficiencia cercana al 99,70%, en que su emisión de SO₂ es menor a 500 ppm y de SO₃ menor a 75 g/ton de ácido producido. Según diseño, la entrada de azufre no debe superar la cantidad de 23,5 t/h.

- 2.3.6.- Horno de limpieza de escoria

Son 2 los hornos rotativos de limpieza de escorias. Reciben la escoria del HFF y los convertidores Peirce-Smith. Poseen un tamaño de 13' de diámetro y 26' de largo, y una capacidad de 60 t por fusión batch. Según diseño tiene una capacidad de 48 t/h. ^[7]

2.4.- Eventos de alto S/Cu

Entre los meses de enero y marzo del año 2017, la fundición se vio enfrentada a varios casos de concentrados que ingresaron con una S/Cu superior a 1.3, lo que fue producto de que los concentrados que llegaron eran altos en pirita y no se tuvo la opción de preparar una mezcla con menor razón S/Cu. Estos tipos de concentrados generan la activación de diversas restricciones de los equipos e impiden un funcionamiento óptimo del proceso. La generación de gases en estos casos puede sobrepasar la capacidad de la caldera a la salida del HFF. Además, la alta cantidad de azufre puede hacer sobrepasar el límite permitido de emisiones de SO₂ acorde al límite que permite la legislación fijada en 600 ppm. Al mismo tiempo, la temperatura en el proceso se eleva. Por estas y otras consideraciones la alimentación de concentrado debió ser restringida en aquellos casos. Estos casos “anómalos” muestran como estas “perturbaciones” en las características del concentrado cambian las respuestas en la operación. Éstas respuestas son analizadas tomando como referencia resultados con el BMyE, para evaluar si la respuesta operacional a estos eventos fue o no acertada. Estos eventos fueron un total de 24, teniendo más de un 30% de ellos una razón S/Cu superior a 1.4 ^[8].

3.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

El presente capítulo entrega los antecedentes del BMyE disponible en la fundición y que fue utilizado. Éste es considerado como una caja negra con los ingresos al HFF y la etapa de conversión, y sus salidas de gases y escorias.

En principio se tiene la representación de los concentrados de cobre, y luego el desarrollo para la representación de 34 casos de distinta razón S/Cu. Luego se describe el funcionamiento del modelo de BMyE, sus características y correlaciones.

3.1.- Representación de los concentrados de cobre y principales consideraciones de cálculo

Para la representación de los concentrados de cobre se realiza de una forma que imite el método que se utiliza en la fundición. En ella se tienen tres concentrados iniciales, los cuales por provenir de distintas faenas mineras poseen mineralogías distintas, así ellos se mezclan en proporción para que el concentrado a ser alimentado al HFF tenga la razón S/Cu deseada.

Primero se tienen los “concentrados iniciales”, de los cuales respecto a su análisis químico se puede establecer una caracterización mineralógica en función del parámetro S/Cu.

Tabla 3.1 Análisis químico para cada concentrado inicial caso S/Cu 1.22.

	C1	C2	C3
TPH	41.29	20.65	6.88
factor de alimentación	0.6	0.3	0.1
Cu	27.8	28	29.1
Fe	28.284	27.84	25.398
S	33.916	34.16	35.502
S/Cu	1.22	1.22	1.22
Total Cu,Fe,S	90	90	90
SiO ₂	5	5	5
Otros	5	5	5

La tabla 3.1 muestra un ejemplo del análisis químico de los tres concentrados iniciales. Se observa que los tres elementos principales (cobre, hierro y azufre) conforman el 90% de cada concentrado, por lo que siempre tendremos un 10% correspondiente a la ganga. Además, el

parámetro S/Cu se fija a un valor deseado, y de él se desprende cuánto es lo que corresponde a cada uno de los tres elementos.

El segundo paso es asociar a cada concentrado inicial una mineralogía definida y una proporción fija de 6:3:1 para la conformación del concentrado final. El primer concentrado inicial (C1) se compone de: calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S) y pirita (FeS_2). El segundo concentrado inicial (C2) se compone de: calcopirita, bornita (Cu_5FeS_4) y pirita. El tercer concentrado inicial (C3) se compone de: calcosina, bornita y pirita.

Tabla 3.2 Ponderación mineralógica para el primer concentrado inicial caso S/Cu 1.22

	%
CuFeS_2	63.8
Cu_2S	7.2
FeS_2	19.1

Tabla 3.3 Ponderación mineralógica para el segundo concentrado inicial caso S/Cu 1.22.

	%
CuFeS_2	49.4
Cu_5FeS_4	17.2
FeS_2	23.4

Tabla 3.4 Ponderación mineralógica para el tercer concentrado inicial caso S/Cu 1.22.

	%
Cu_5FeS_4	31.3
Cu_2S	11.6
FeS_2	47.1

Las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 corresponden a cada concentrado inicial, y muestran el resultado de la distribución mineralógica de cada uno de ellos.

El tercer paso es obtener la representación mineralógica del concentrado final mediante la mezcla de los concentrados iniciales según la proporción 6:3:1 fijada anteriormente.

Tabla 3.5 Mineralogía para el concentrado caso S/Cu 1.22

	BC: (tph)	68.82		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS ₂	53.1		Cu	19.3
Cu ₂ S	5.5		Fe	19.2
Cu ₅ FeS ₄	8.3		S	23.5
FeS ₂	23.2		S/Cu	1.22

La tabla 3.5 es la caracterización mineralógica final para el concentrado con una razón S/Cu de 1.22.

Realizando el mismo procedimiento 34 veces, en que la razón S/Cu del concentrado final va disminuyendo 0.3 unidades, se obtiene una representación teórica de como varía la mineralogía desde una razón S/Cu = 1.7 hasta una razón S/Cu = 0.7.

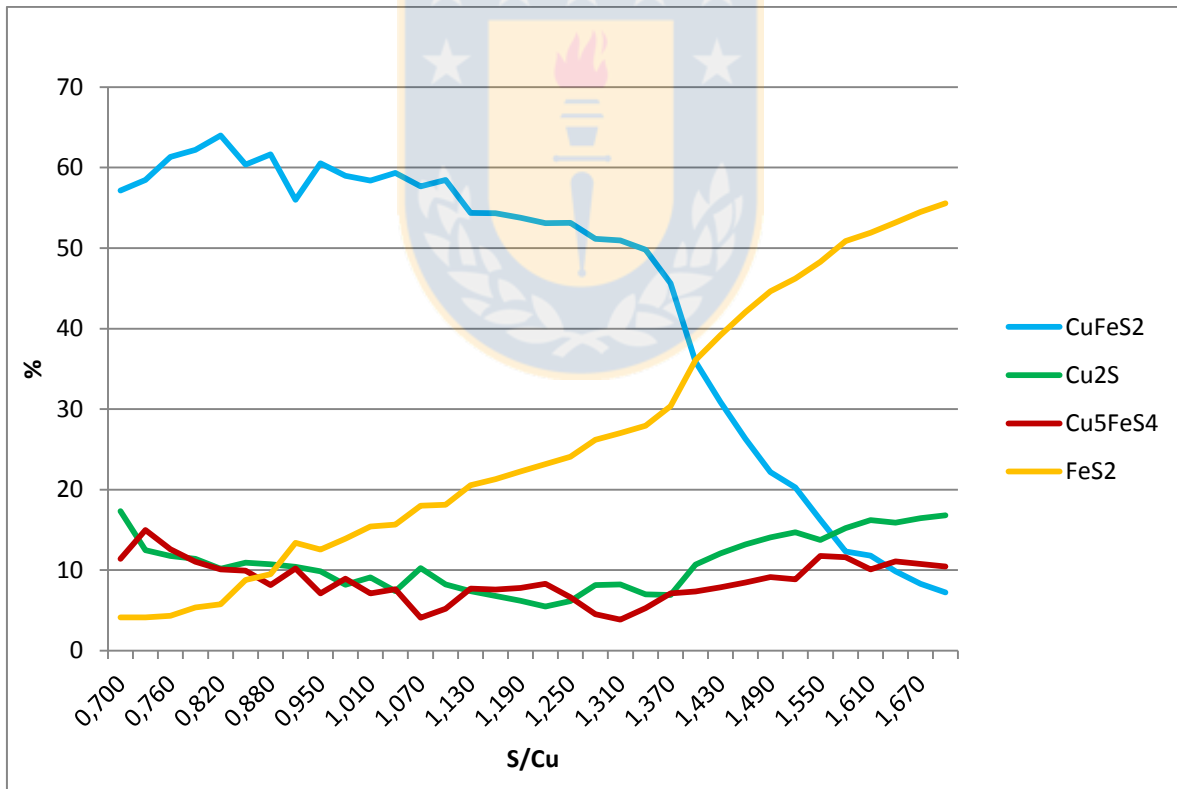


Figura 3.1 Caracterización mineralógica en relación a la variación de S/Cu en el concentrado

El gráfico mostrado (es el utilizado para realizar el BMyE), es una representación de la composición mineralógica de la mezcla de los tres concentrados iniciales en función de la razón S/Cu. En él se observa un pequeño incremento de la calcopirita al inicio y desde el punto S/Cu =

1.34 una fuerte caída producida por el cálculo matemático, ya que a razones altas de S/Cu pequeñas variaciones en la ley de cobre de los concentrados iniciales inciden de gran forma en la mineralogía final. De forma contraria la pirita muestra un aumento constante hasta una mayor pendiente desde el punto S/Cu = 1.37 y la bornita y calcosina una curva en forma de U tomando relevante su contribución al cobre en el concentrado al punto S/Cu = 1.58, éste gráfico se utilizó ya que se trató de representar lo más fielmente como se comportaría la mineralogía con los datos utilizados de las planillas de control de Chagres.

- 3.1.1.- Sensibilidad del análisis de la mineralogía

La metodología anterior para la formación de una caracterización mineralógica permite obtener el gráfico 3.1, sin embargo, se tiene que al variar la ley de cobre de los concentrados iniciales, la caracterización mineralógica final varía respecto a la figura 3.1.

Por esto se conforman tres gráficos respecto a la caracterización mineralógica. Se forman variando la ley de cobre de cada uno de los concentrados iniciales para los 34 tipos de concentrado.

La variación de la ley de cobre en los concentrados iniciales, puede ocasionar que se establezca una incongruencia matemática, mostrando algún mineral en valor negativo. Es por ésta razón, que se tiene un valor mínimo y un valor máximo, que se puede dar a la ley de cobre en los concentrados iniciales para cada uno de los 34 concentrados finales.

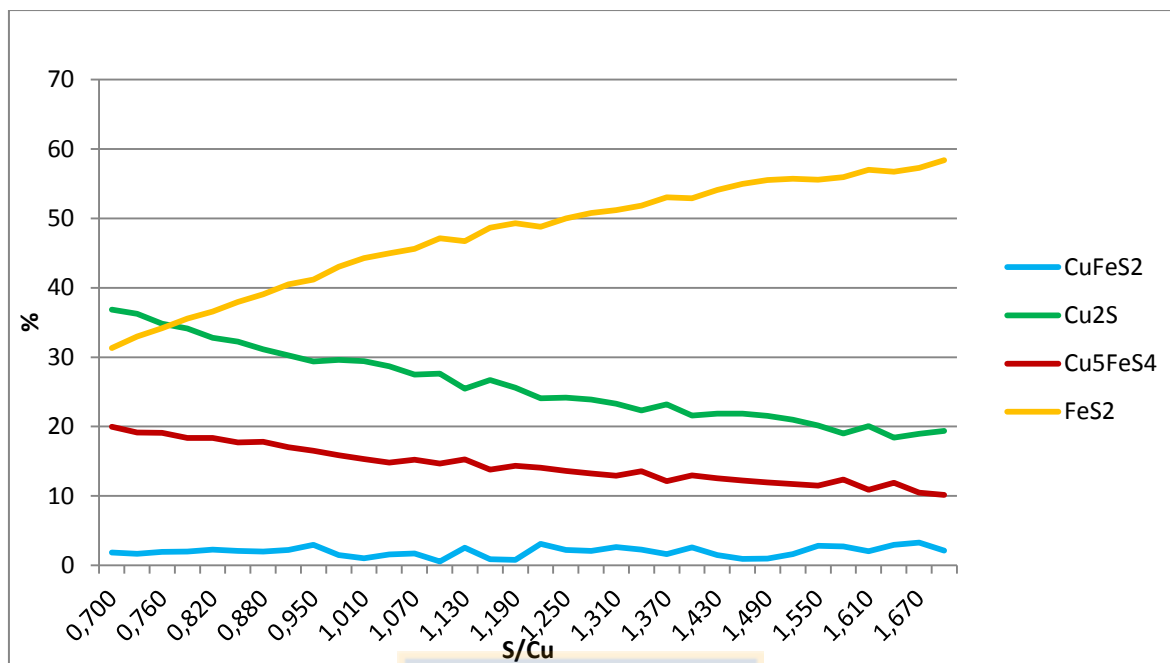


Figura 3.2 Caracterización mineralógica para una ley mínima de cobre en relación a la variación de S/Cu en el concentrado.

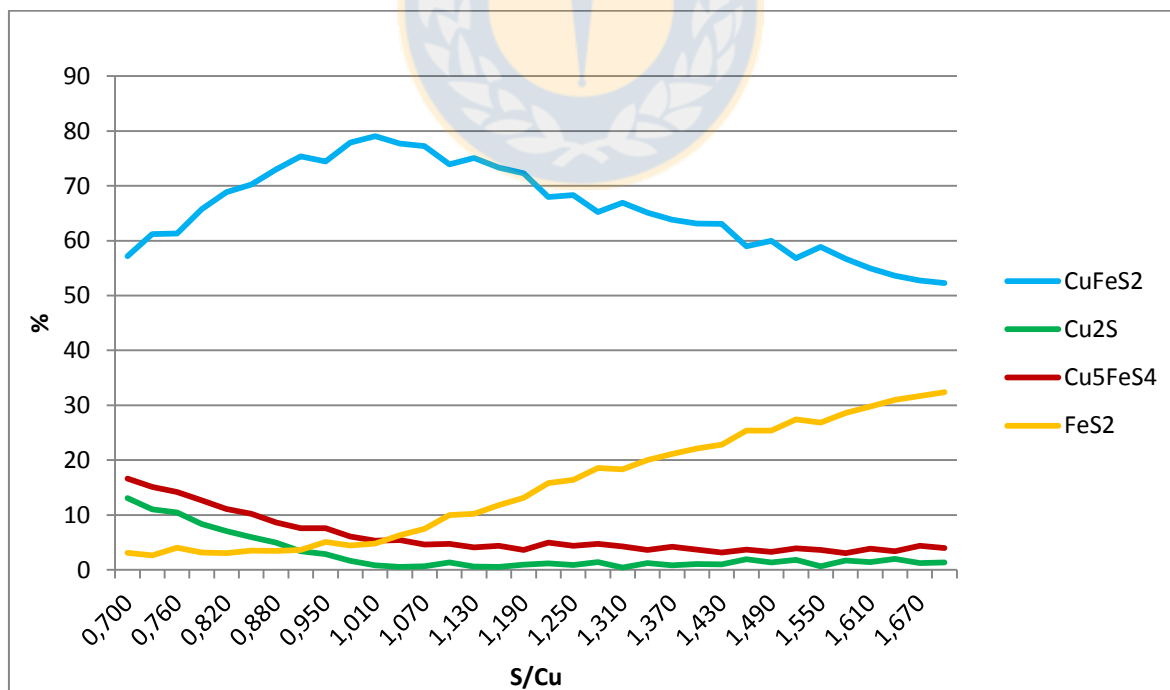


Figura 3.3 Caracterización mineralógica para una ley máxima de cobre en relación a la variación de S/Cu en el concentrado.

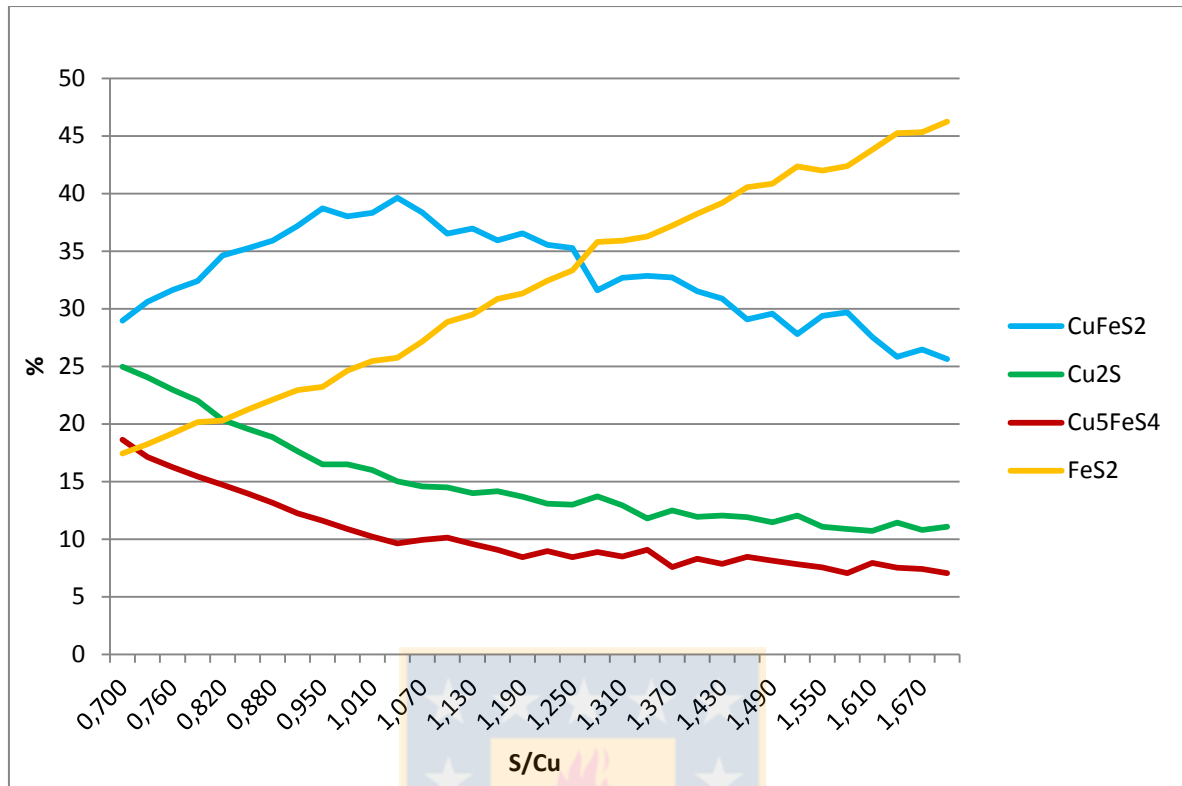


Figura 3.4 Caracterización mineralógica para una ley promedio de cobre en relación a la variación de S/Cu en el concentrado.

Los dos primeros gráficos mostrados representan los extremos posibles de tener la ley de Cu al mínimo y al máximo respectivamente en los concentrados iniciales, el tercer gráfico es la representación del promedio de la ley de Cu entre ambas.

3.2.- Balance de Masa y Energía (BMyE) en la Fusión-Conversion

Se utilizó un balance de masa y energía ya desarrollado en la fundición, y respecto del cual se describirán las consideraciones que permiten “cerrarlo”, para su descripción se dan a conocer ejemplos de cálculos para un concentrado de razón S/Cu = 1.22.

• 3.2.1.- Fusión

El balance de masa del proceso del HFF establece las ecuaciones de conservación para cada elemento y agrega 17 consideraciones para “cerrar” apropiadamente el cálculo en las fases que caracterizan la operación del HFF. Estas consideraciones son las siguientes:

- 1) Ley del eje. Se fija la ley del eje deseada, ésta varió entre 56% y 66%, con 2% de variación entre cada uno de los 34 casos, esto da un total de 204 casos de estudio.

- 2) SiO₂ en la escoria. Un valor constante de 30%, promedio de la operación en Chagres.
- 3) Cobre en la escoria. El Cu total en la escoria se distribuyó en un 20% como Cu₂S y un 80% como Cu₂O.

Tabla 3.6 Análisis químico y parámetros fijados para concentrado.

Concentrado	68.82	[t/h]		Concentrado	Mezcla
Ley de eje	58	[%]	Análisis	%	ton
% SiO ₂ escoria	30	[%]	Cu	27.99	19.26
Mineralogía			Fe	27.86	19.17
CuFeS ₂	53.10	[%]	S	34.15	23.50
Cu ₂ S	5.46	[%]	Otros	5.00	3.44
Cu ₅ FeS ₄	8.28	[%]	SiO ₂ concentrado	5.00	3.44
FeS ₂	23.16	[%]	Total	100	68.82
Cobre en escoria			SiO ₂ adicional	8.34	5.74
Cu oxidado como Cu ₂ O	80	[%]			
Cu sulfurado como Cu ₂ S	20	[%]	concentrado + SiO ₂		74.56

La tabla 3.6 muestra el análisis químico del concentrado, se señalan las 3 primeras consideraciones a fijar, ley deseada del eje, %SiO₂ que debe tener la escoria y la distribución del cobre que se pierde en la escoria.

- 4) Fe₃O₄ en el eje. Correlación utilizada en la fundición con datos de operación, fija una cantidad de magnetita que se forma en la escoria en función de la ley de eje objetivo. (ANEXO B)

Tabla 3.7 Caracterización del eje formado por el concentrado

	Cu	Fe	S	O	%
Cu ₂ S	58.0		14.6		72.6
FeS		14.1	8.1		22.2
Fe ₃ O ₄		3.7		1.4	5.2
Total	58.0	17.8	22.7	1.4	100.0

La tabla de la formación del eje muestra el porcentaje de cada elemento o compuesto, está señalado el dato de ley de eje fijado previamente, y se remarca el valor que dio la formación de Fe₃O₄.

- 5) Cu en la escoria en función del eje. Según correlación utilizada en la fundición obtenida con datos operacionales, existe un porcentaje de Cu que es arrastrado por la escoria. (ANEXO B)
- 6) Magnetita en la escoria. En función de la ley de eje, mediante correlación utilizada en la fundición con datos obtenidos operacionalmente. (ANEXO B)
- 7) FeO en la escoria. Se calcula como la diferencia del total de la suma de porcentajes en la escoria.
- 8) Azufre en la escoria. En función de la ley de eje mediante correlación utilizada en la fundición obtenida de datos operacionales. (ANEXO B)
- 9) Otros. Corresponden a los elementos que ingresan en el concentrado pero que no interactúan químicamente en las reacciones. Se toma el total de ellos como componentes de la escoria. Se calculan igualando las masas de escoria calculadas por medio de la matriz de cálculo y, la suma que da por el total los elementos, esto ya que este último cálculo se desbalancea con la adición de sílice que se realiza para la formación del porcentaje de SiO₂ deseado en la escoria, que se tiene como dato previamente fijado.

Tabla 3.8 Caracterización de la escoria formado por el concentrado

	Cu	Fe	S	O	Si	%
Cu₂S	0.2		0.1			0.3
Cu₂O	0.9			0.1		1.0
FeS		1.6	0.9			2.5
Fe₃O₄		9.7		3.7		13.4
FeO		32.3		9.2		41.5
SiO₂				16.0	14.0	30.0
Otros						11.2
Total	1.1	43.6	1.0	29.0	14.0	100

Tabla 3.9 Masa de la escoria formada por el concentrado [kg]

Cu	Fe	S	O	Si	Otros	Masa
332	13350	299	8889	4292	3441	30603

La tabla 3.8 muestra la caracterización de la escoria, donde se señalan las correlaciones antes señaladas, el ítem “Otros” que representan a los compuestos que no reaccionan en

el proceso son tomados como un dato común que varía y sirve para igualar, la masa calculada de la tabla 3.9 que muestra los valores másicos de la caracterización de la escoria y el valor encontrado de la masa de escoria por la matriz de la Tabla 3.10.

- 10) Masas de eje y escoria producida. Se forma una matriz que tenga el cobre total que se distribuye al eje y la escoria mediante las correlaciones y ecuaciones anteriores. Para el hierro se realiza la misma metodología. A la matriz se calcula su inversa, y finalmente ésta es multiplicada con el vector de entrada, que corresponde a la masa de cobre y hierro que ingresa en el concentrado y da el resultado másico de eje y escoria producida.

Tabla 3.10 Resultados de matriz de cálculo de masas de eje y escoria [t].

	Masas
Eje	32.64
Escoria	30.60

La tabla 3.10 da los valores obtenidos para el cálculo de las masas de eje y escoria, así por diferencia con el valor obtenido en la tabla 3.9 se obtiene el valor de los elementos “otros” que no intervienen en el balance.

- 11) Para el cálculo de los gases, primeramente el azufre que sale como gas es la diferencia del azufre que entra en el concentrado y el que sale en el eje y la escoria.
- 12) El oxígeno que sale en el gas es igual a la misma cantidad másica de azufre que sale como gas, el resultado de 11).
- 13) El oxígeno técnico necesario para el balance de entrada de oxígeno, es la diferencia de la salida del oxígeno y cuanto entra en el concentrado.

Tabla 3.11 Balance de elementos a la entrada y salida del proceso de fusión

	Azufre kg/h	Oxígeno kg/h	Si kg/h	Fierro Oxido kg/h	Fierro Sulfuro kg/h	Cobre Oxido kg/h	Cobre Sulfuro kg/h	Masa Total kg/h
Entradas								
Concentrado	23500	4889	4292	0	19174	0	19262	71117
Oxígeno técnico		20248						20248
Sub-total	23500	25136	4292	0	19174	0	19262	91365
Salidas								
eje	7419	465		1219	4605		18930	32638
escoria	299	8889	4292	12859	491	265	66	27162
gases	15782	15782						31564
Sub-total	23500	25136	4292	14078	5096	265	18997	91365

La tabla muestra los valores másicos de las entradas y salidas del sistema, marcados están los datos de entrada de azufre y salida como gas, así como el oxígeno necesario para la formación de SO_2 y da el oxígeno técnico necesario a introducir para el balance.

- 14) El SiO_2 que se requiere para formar la fayalita, que viene dada por la cantidad másica de FeO que se forma en la escoria.
- 15) La fayalita total que se forma viene dada por la masa de sílice requerida para captar todo el FeO en la escoria, del resultado de 14)

Tabla 3.12 Resultados de fayalita formada y SiO_2 necesaria y libre [kg].

$\text{SiO}_2(\text{FeO})$	5315
Fayalita	18026
SiO_2 libre	3866

La tabla 3.12 señala el SiO_2 requerido para formar la fayalita con el FeO que está en la escoria, el siguiente valor señala la cantidad másica en kg de la fayalita formada y finalmente el SiO_2 libre que queda, luego que del total de SiO_2 que ingresa al HFF una parte forma fayalita.

- 16) Con los cálculos másicos podemos obtener la cantidad de nitrógeno necesaria, realizando un balance de calor, que permita cuantificar el delta requerido para balancear el calor (Q) generado con las pérdidas por los productos de la fusión. El calor final es calculado de los

deltas de formación de las especies, la fusión de las especies, las pérdidas en el gas, la escoria y los gases. (ANEXO C)

- 17) Al tener las dos ecuaciones que muestran la producción de calor. La masa de Nitrógeno se calcula del calor (Q) total producido, del punto 16), sobre su fórmula integral para calcular el calor, de ello despejamos la masa del nitrógeno requerida para equilibrar el balance. (ANEXO C)

- 3.2.2.- Conversión

En la conversión se utilizan dos ecuaciones para realizar el balance de materia, sin embargo, se apoyan también en supuestos que simplifican la resolución del problema considerando condiciones específicas de la operación. Uno de las suposiciones es la formación completa del cobre proveniente en el eje hacia cobre blíster, con una escoria sin cobre, esto formula que toda la escoria que llega a los HLE proviene del HFF. Las siguientes son la correlación y ecuación ocupadas.

- 1) Magnetita en la escoria está en función del porcentaje de cobre que forma el cobre blíster, donde se asume un 100% de conversión, mediante correlación utilizada en la fundición con datos obtenidos operacionalmente, también utilizada en el balance del HFF.
- 2) La sílice necesaria a agregar para formar SiO_2 con el FeO en la escoria. Al igual que en el balance del HFF, se toma el balance de FeO para tener la masa necesaria para la formación de todo él en fayalita.

Tabla 3.13 Caracterización de escoria formada en la conversión

	Fe	O	SiO ₂	%
Fe ₃ O ₄	18.4	7.0		25.4
FeO	58.0	16.6		74.6
Sub Total	76.4	23.6		100
SiO ₂			100.0	23.8
Fe ₃ O ₄	72.4	27.6		19.4
FeO	77.7	22.3		56.9
Total	150.1	49.9	100.0	100

La tabla 3.14 muestra la caracterización de la escoria de los convertidores, donde se marca la magnetita formada la cual está en función de una conversión de 100% del cobre que

proviene del eje, y el SiO_2 añadido en base al FeO existente para formar la escoria fayalítica. La tabla está dividida en dos, donde la parte superior señala el sub total de la escoria antes de añadir el SiO_2 necesario que transforme todo el FeO en fayalita.

Se muestra un diagrama de flujo que señala los pasos realizados durante el desarrollo del BMyE

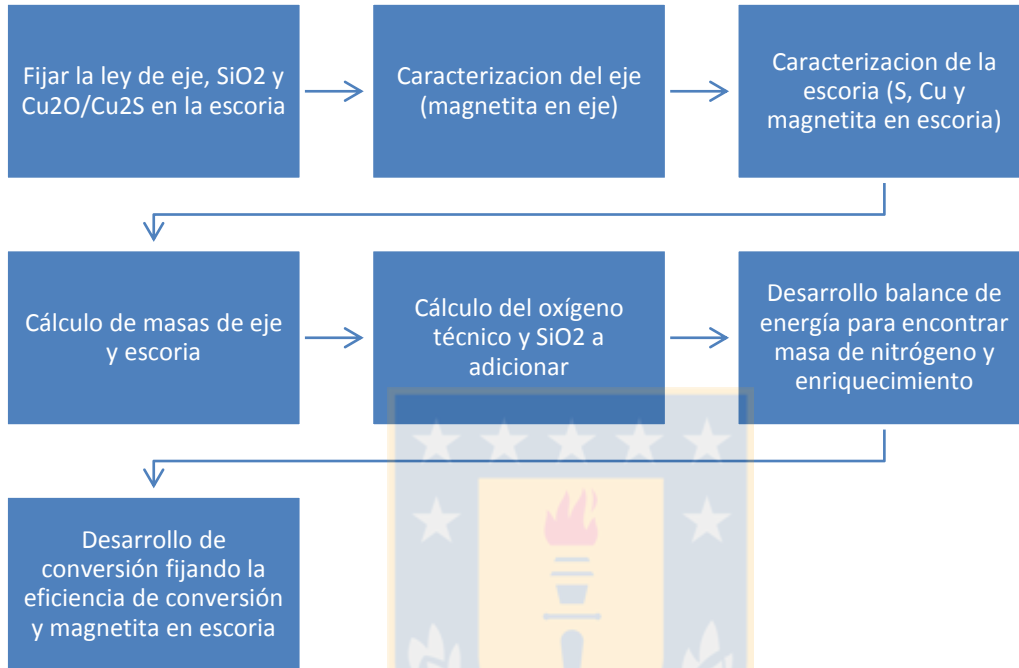


Figura 3.5 Diagrama de flujo de BMyE.

4.- VALIDACIÓN

El presente capítulo muestra cómo fue validado el balance de masa y energía. Seleccionando 30 simulaciones de casos reportados en las planillas de operación comparando los valores calculados con estos valores medidos. Así se puede encontrar un error asociado respecto del valor simulado en el BMyE y el valor medido en las planillas de operación. Los parámetros que se comparan son los que se muestran en la Tabla 4.1

4.1.- Validación del modelo con datos operacionales

La fundición Chagres utiliza para sus controles operacionales planillas de reportes de control de procesos, los cuales informan los datos diarios de cada etapa de operación. Estas planillas PI entregan 126 datos de control, sin embargo, muchos de ellos no están relacionados al modelo, ya que hay que definir parámetros de procesos que no están analizados en el BMyE, por lo que solo se utilizan seis datos, los que sí están representados en el BMyE y pueden ser comparados.

Al ocupar las planillas PI de control de procesos de la fundición Chagres, se obtienen de ella los valores medidos de cada una de las variables a ocupar, los cuales son: el oxígeno a ocupar en la fusión y en conversión, la capacidad de producción de ánodos de la rueda de moldeo y el coeficiente de oxígeno utilizado en el HFF. Además, la restricción correspondiente a la cantidad de azufre que ingresa la planta de ácido también es ocupada. Estos valores se comparan con los obtenidos mediante el BMyE para su verificación. La cantidad de escoria procesada en el horno de limpieza de escorias y los volúmenes de gases que permite la captación de la campana de gases, si bien están dentro de los balances de masa y energía, no son medidos en las planillas de control, por lo que aquellas variables son las únicas que no pudieron ser comparadas en los casos analizados, aunque sus resultados teóricos están dentro de los rangos que aceptan las restricciones de los equipos.

Por último del BMyE obtenemos el enriquecimiento de O_2 y el coeficiente de oxígeno utilizados en el HFF y que son comparados con los valores de las planillas de control.

Tabla 4.1 Comparativa de análisis teórico mediante BMyE y datos medidos de control para S/Cu 1.07.

S/Cu	1.07	Variables para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Simulado	Medido	
Oxígeno técnico en conversión (kg/h)		9072	8735	8538	2.25
Rueda de Moldeo (kg/h)		24000	19844	18833	5.09
S que ingresa a planta de ácido (kg/h)		23500	21558	21000	2.59
Oxígeno técnico en fusión (kg/h)		20500	17891	15303	14.47
%Enriquecimiento O ₂			61.97%	60.00%	3.19
Coefficiente de oxígeno (Nm ³ / t concentrado)			142	141	0.55
Volumen gases de salida (Nm ³ /h)		27000	18186		
Capacidad del HLE (kg/h)		48000	44106		

La tabla 4.1 muestra un ejemplo de cálculo de la comparación de datos para un caso de concentrado con razón S/Cu = 1.07, la columna “Max” señala los valores límites permitidos que se obtienen de las restricciones estudiadas, el valor “Simulado” es el obtenido del BMyE y el valor “Medido” es el obtenido de las planillas de control.

4.2.- Validación del modelo de balance de masa y energía

El modelo de BMyE, que abarca desde la caracterización del concentrado hasta la formación de cobre blíster, es utilizado con los datos operacionales de la fundición Chagres encontrados en las planillas PI, permite comparar seis variables distintas las cuales son tomadas como variables de control en la fundición. En estas planillas encontramos los valores de operación de las siguientes variables: oxígeno técnico utilizado en la conversión el cual se toma como O₂/ton concentrado al HFF, producción de ánodos en la rueda de moldeo la cual representa la formación total de cobre ánodo/h que puede realizar la rueda de moldeo, azufre que ingresa en el concentrado que es capaz de soportar la planta de ácido, capacidad de insuflar oxígeno al HFF, enriquecimiento de O₂ en el proceso de fusión y el coeficiente de oxígeno utilizado en fusión. Esos valores están señalados en las planillas PI y comparadas con los resultados obtenidos del modelo de BMyE obtenemos un error bajo con su desviación estándar correspondiente en los distintos análisis.

Tabla 4.2 Validación del error para el modelo de BMyE.

Variable	%Error	Desviación estándar
Oxígeno técnico en conversión	8.29	5.83
Rueda de Moldeo	13.82	11.00
S que ingresa a planta de ácido	2.84	1.75
Oxígeno técnico en fusión	15.24	4.83
%Enriquecimiento O2	6.09	4.01
Coefficiente de oxígeno	4.02	2.68

La Tabla 4.2 muestra los errores promedio de los seis datos comparables por las restricciones estudiadas, se observa que solo los cálculos de la producción en la rueda de moldeo y el oxígeno utilizado en el HFF poseen un error mayor a 10%. El primero además presenta una desviación estándar de 11 puntos. Por otro lado, los cálculos del coeficiente de oxígeno sobre la alimentación del flash y el azufre que ingresa a la planta de ácido son los datos que tienen el menor error y desviación estándar.

El error y la desviación estándar están calculados de las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Error} = \text{Abs} \left(\frac{\text{valor real} - \text{valor simulado}}{\text{valor simulado}} \right) * 100 \quad \text{Ec 4.1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec 4.2}$$

A continuación se muestran los resultados de las comparaciones de los diversos parámetros analizados.

La figura 4.1 muestra la distribución de los valores obtenidos en la simulación y el valor medido obtenido de las planillas de control.

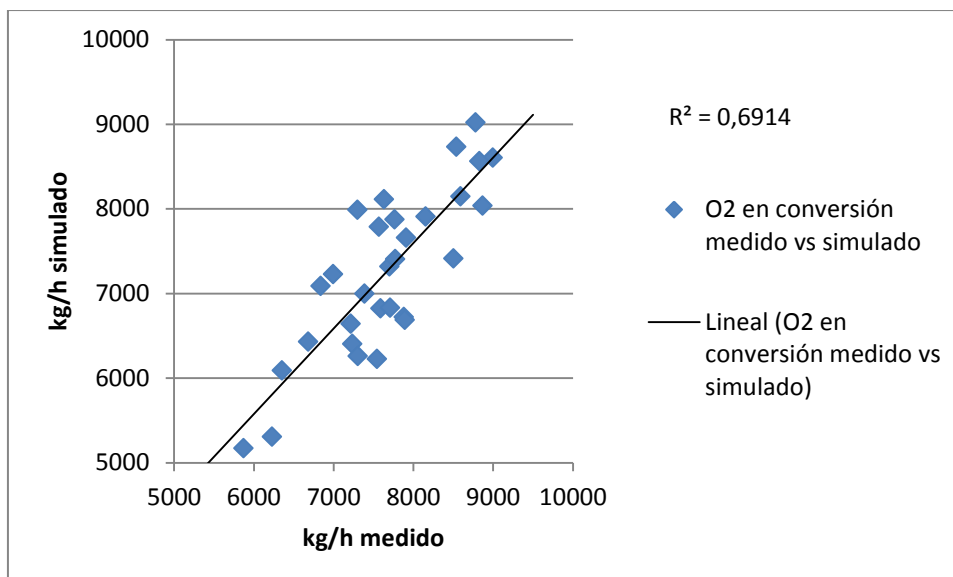


Figura 4.1 Gráfico comparativo O₂ técnico utilizado en conversión medido vs simulado.

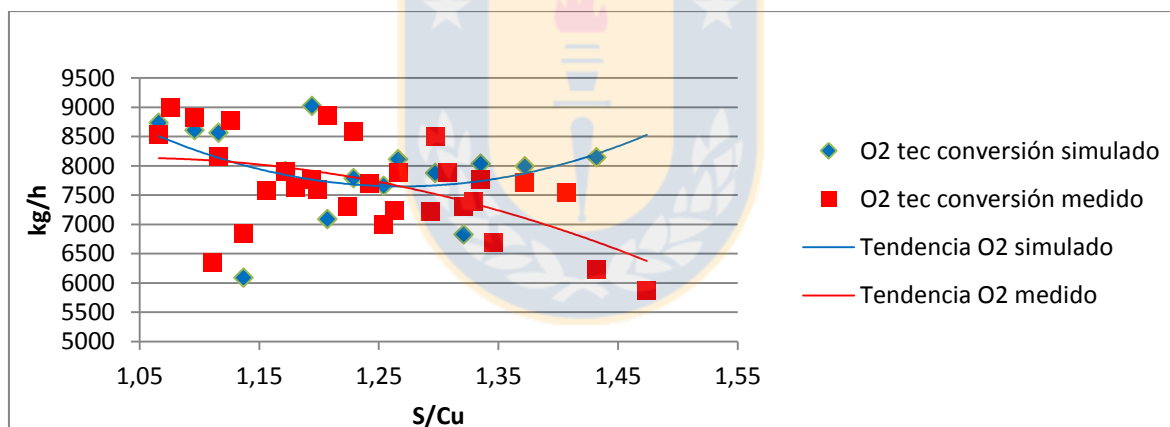


Figura 4.2 Gráfico comparativo O₂ técnico utilizado en conversión medido vs simulado en función del S/Cu.

La figura 4.2 muestra la distribución de los resultados obtenidos por el BMyE comparados a los valores medidos en las planillas de control, de esa forma se observa que a razones S/Cu superiores a 1.20 los valores simulados son ligeramente superiores a los valores medidos en las planillas de control.

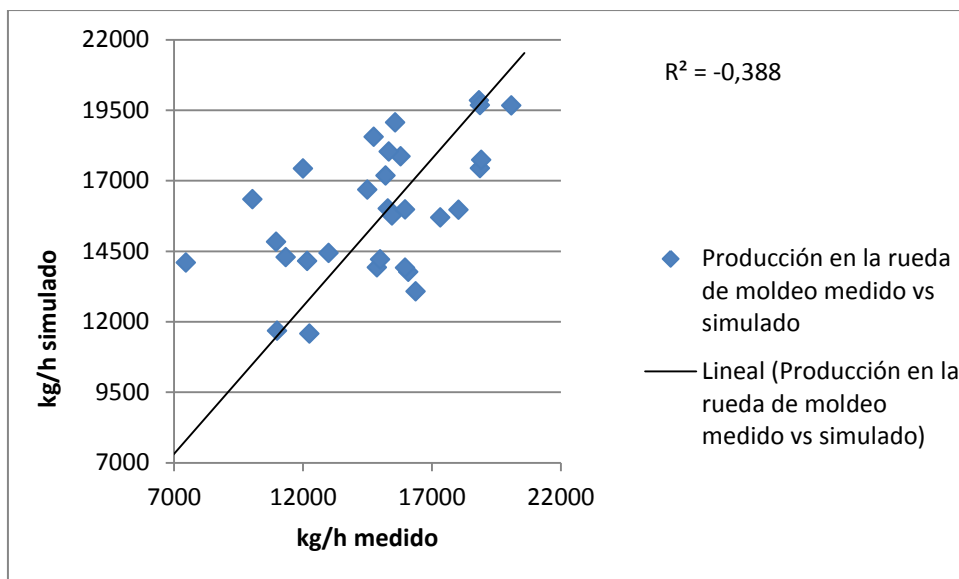


Figura 4.3 Gráfico comparativo producción en la rueda de moldeo medido vs simulado.

La figura 4.3 muestra la distribución respecto de los valores teóricos obtenidos en la simulación y el valor medido obtenido de las planillas de control. Para el caso de la producción en la rueda de moldeo se observa que no es exacto ni preciso el BMyE, éste resultado tiene además el segundo error más alto y la desviación estándar más alta (Tabla 4.2).

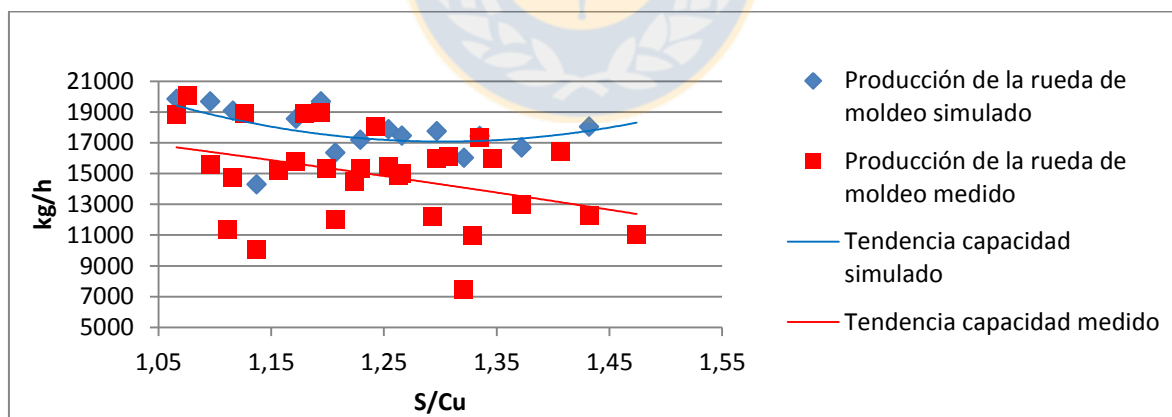


Figura 4.4 Gráfico comparativo producción en la rueda de moldeo medido vs simulado en función del S/Cu.

La figura 4.4 señala que los resultados simulados con el BMyE son mayores en la mayoría de los casos respecto a los valores medidos de las planillas de control, además muestra un descenso en los valores medidos a alta razón S/Cu que no es mostrado por el BMyE.

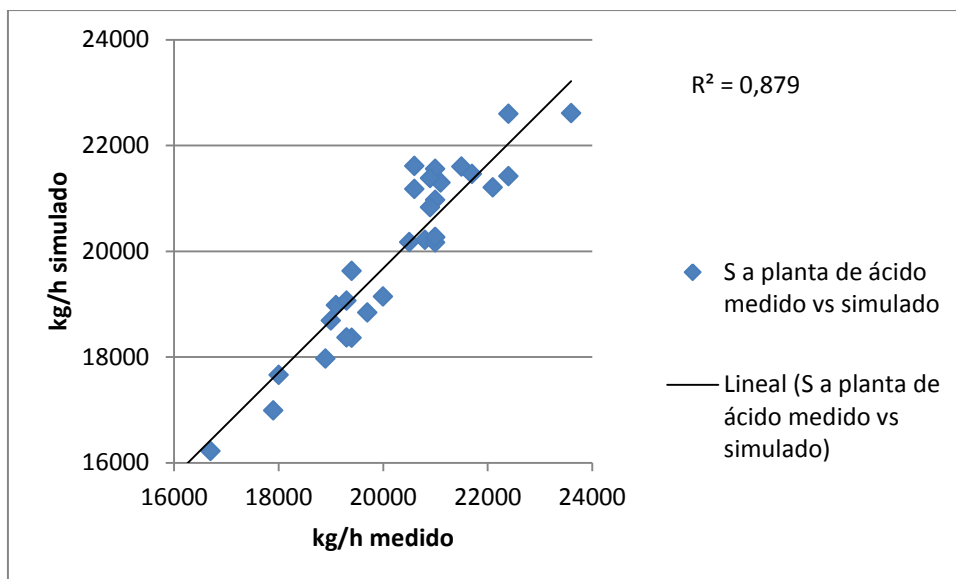


Figura 4.5 Gráfico comparativo S hacia planta de ácido real vs simulado.

La figura 4.5 muestra el caso del azufre que ingresa a la planta de ácido, el BMyE muestra un bajo error (Tabla 4.2) y se observa una exactitud y precisión mayor que en los análisis de los demás parámetros.

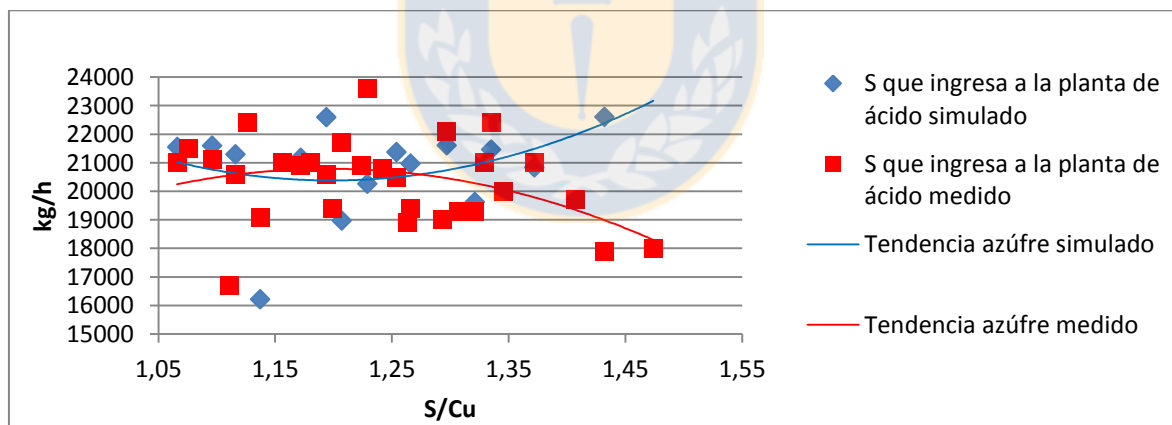


Figura 4.6 Gráfico comparativo ingreso de azufre a la planta de ácido medido vs simulado en función del S/Cu.

La figura 4.6 muestra que los resultados del BMyE son bastante cercanos a los resultados medidos en las planillas de operación, solamente a una razón S/Cu elevada, superior a 1.4 el BMyE entrega resultados inexactos respecto a la medida operacional.

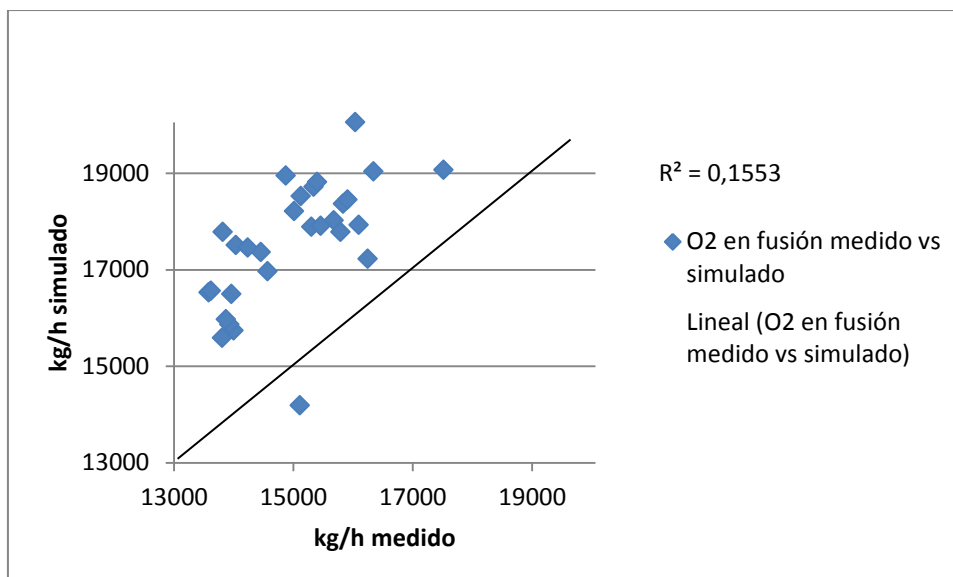


Figura 4.7 Gráfico comparativo O₂ técnico utilizado en fusión real vs simulado.

La figura 4.7 muestra para el caso del oxígeno insuflado durante la fusión que los datos no son exactos y posee el error más elevado (Tabla 4.2).

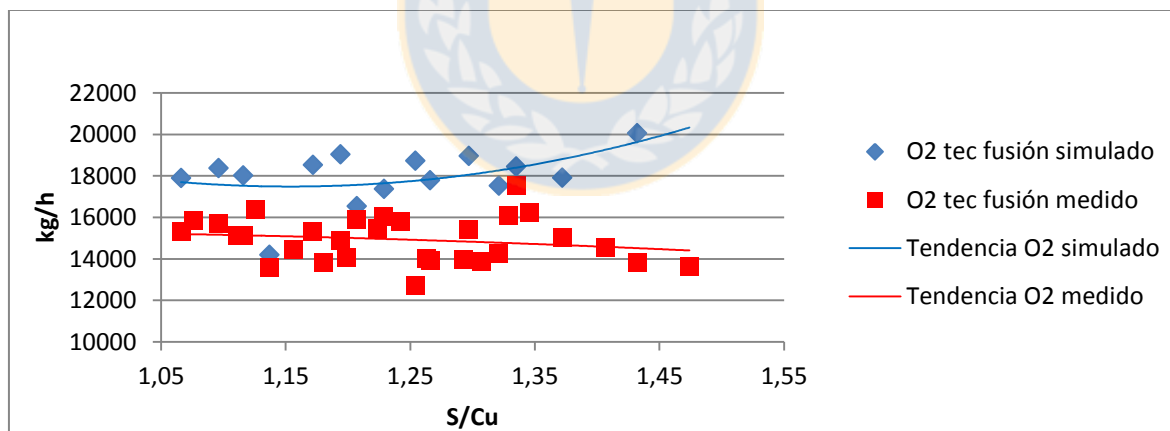


Figura 4.8 Gráfico comparativo O₂ insuflado al HFF medido vs simulado en función del S/Cu.

La figura 4.8 muestra los resultados que el BMyE entrega con respecto a éste parámetro y se observa como todos los resultados están sobre los valores medidos en las planillas de control.

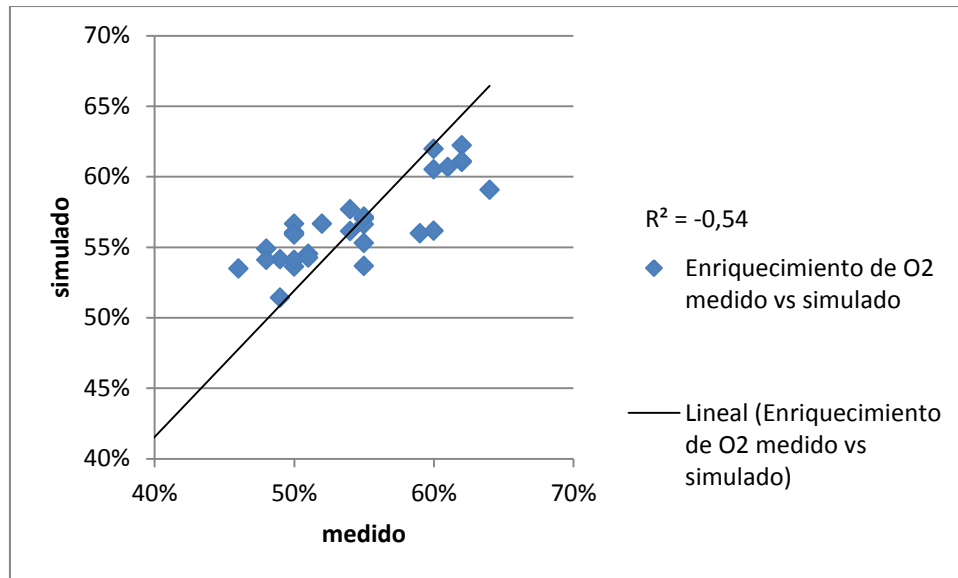


Figura 4.9 Gráfico comparativo %enriquecimiento en HFF real vs simulado.

La figura 4.9 muestra los resultados del enriquecimiento de oxígeno en el HFF, a resultados bajos en enriquecimiento, estos valores entregados por el BMyE son superiores en comparación con los valores de las planillas de control.

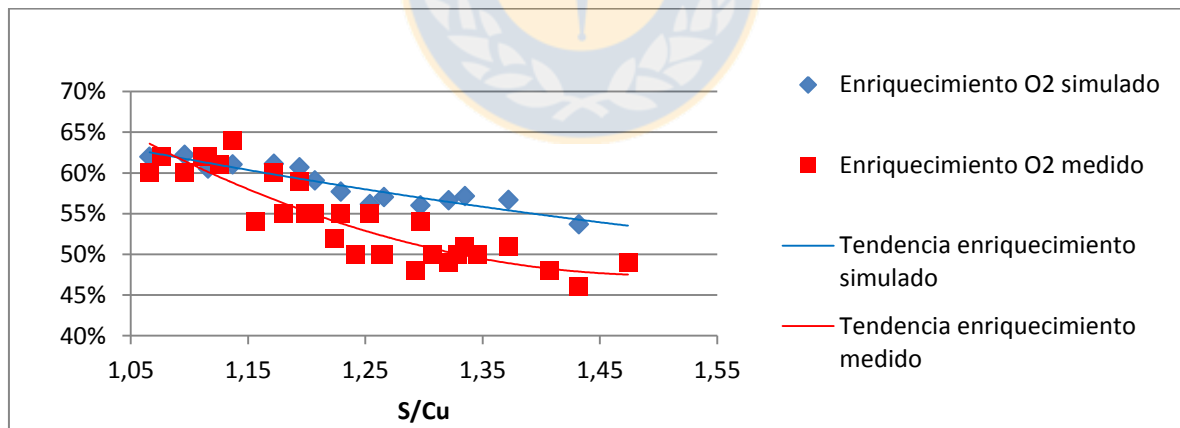


Figura 4.10 Gráfico comparativo O₂ insuflado al HFF medido vs simulado en función del S/Cu.

La figura 4.10 muestra la comparación de los resultados simulados y medidos según la razón S/Cu, se observa que a una razón S/Cu mayor a 1.25 el enriquecimiento de oxígeno entregados por el BMyE es mayor al resultado medido en las planillas de operación.

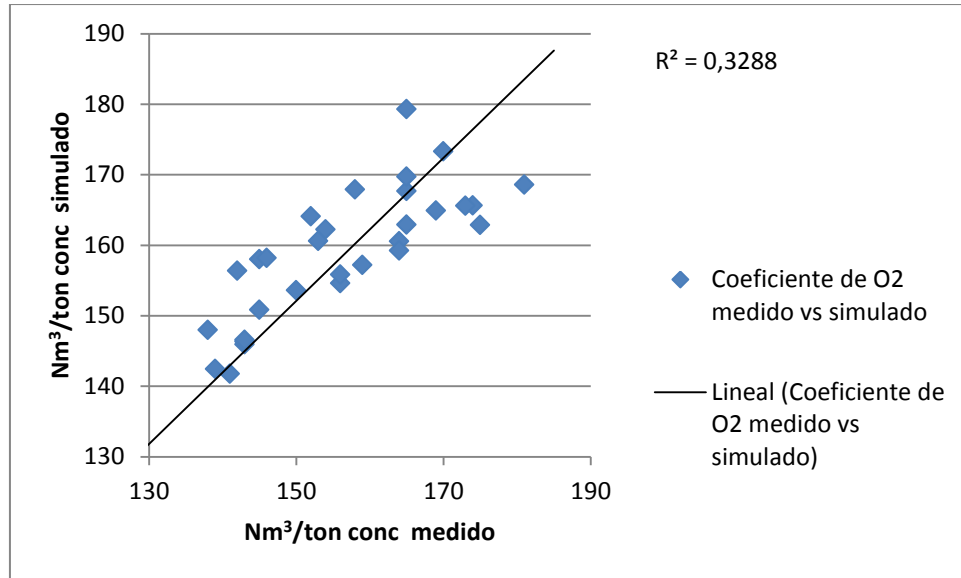


Figura 4.11 Gráfico comparativo Coeficiente de O₂ en HFF real vs simulado

El gráfico 4.11 muestra la distribución de los resultados obtenidos respecto al coeficiente de oxígeno en el HFF, con el BMyE y los medidos por las planillas de control. Así se observa que a bajos coeficientes el BMyE entrega valores superiores a los medidos en las planillas de control, y a valores más altos es una distribución más equitativa de los resultados simulados y medidos.

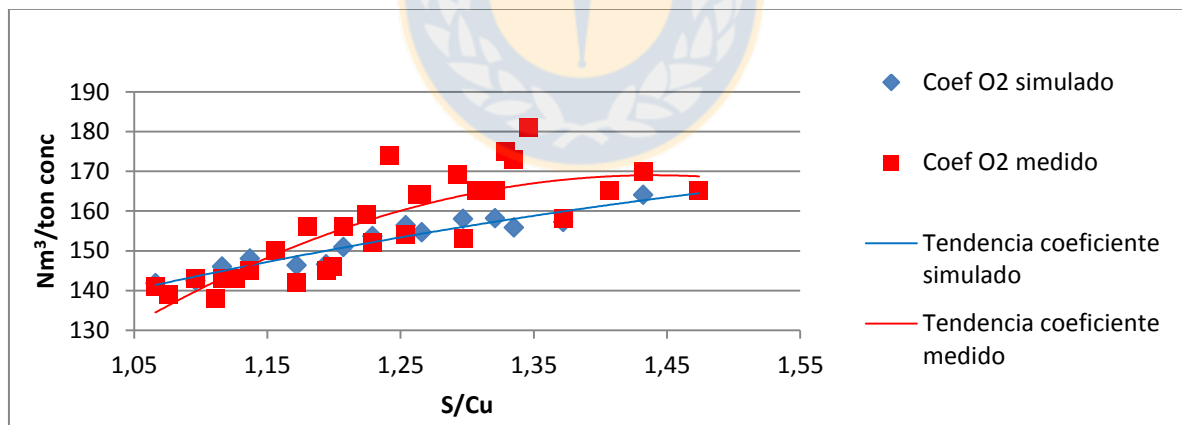


Figura 4.12 Gráfico comparativo O₂ insuflado al HFF medido vs simulado en función del S/Cu

La figura 4.12 señala como el coeficiente de oxígeno crece en forma lineal utilizando el BMyE y los valores medidos en las planillas toman una forma curva, así los resultados simulados son menores que los medidos desde una razón S/Cu = 1.15.

5.- SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados finales de la simulación del BMyE. En primera instancia se presentan 6 condiciones de análisis en función de una ley objetivo de eje en el HFF. Con esas condiciones se pretende representar la alimentación de concentrado al HFF cuando esas condiciones llegan a valores límites y se presentan como una restricción a la tasa de fusión.

Posteriormente se simulan las curvas que muestran la alimentación óptima al HFF para cada caso, refiriéndonos así a la máxima tasa de fusión que se permite según el cuello de botella que active las características del concentrado.

Finalmente se comentan los casos de concentrados con razón S/Cu anómalas y como fue la tasa de fusión en la fundición en comparación a los resultados obtenidos en la simulación para aquellos concentrados. Así también, se da a conocer la capacidad ociosa de la fundición en cuanto a la tasa de fusión, y cuanto podría aumentar ésta, superando el cuello de botella del subproceso asociado a ese cuello de botella.

5.1.- Creación de las curvas de alimentación de concentrado

El proceso de conformación de las curvas de alimentación de concentrado, está relacionado con el análisis de seis condiciones pertenecientes a los procesos de fusión y conversión. Como se señaló en el Capítulo 4 “Validación”, el BMyE utilizado permite obtener los resultados de: el oxígeno utilizado en fusión y conversión, la producción de la rueda de moldeo, la capacidad de la caldera a la salida del HFF de recibir el volumen de los gases de fusión, la capacidad de tratamiento en el HLE y la capacidad de recibir azufre la planta de ácido.

Las condiciones antes señaladas corresponden a subprocesos pertenecientes a los procesos de fusión y conversión, y están asociados a los equipos descritos en el Capítulo 2 “Antecedentes”. Así son conocidos los valores máximos permitidos en ellos correspondientes a las capacidades técnicas de los equipos.

La metodología consiste en, mediante la herramienta “solver” proporcionada por Excel, definir nuestra función objetivo como la tasa de fusión (concentrado que ingresa al HFF), y ésta quede sujeta a las restricciones de análisis. Luego se obtiene una curva que muestra cómo, nuestra función objetivo (tasa de fusión) varía en función de que las características químicas del concentrado alcancen los valores límites de las restricciones.

El parámetro razón S/Cu varía desde un valor $S/Cu = 1.7$ a un valor $S/Cu = 0.7$.

5.2.- Resultado del balance de masa y energía para alimentación de concentrado

Desarrolladas la variación de la tasa de fusión respecto a la característica del concentrado para cada subproceso, se construyen los siguientes gráficos, que muestran como varía la tasa de fusión para cada restricción analizada. Además, se observa en cuál de éstas restricciones se conforma el cuello de botella para una ley de eje dada.

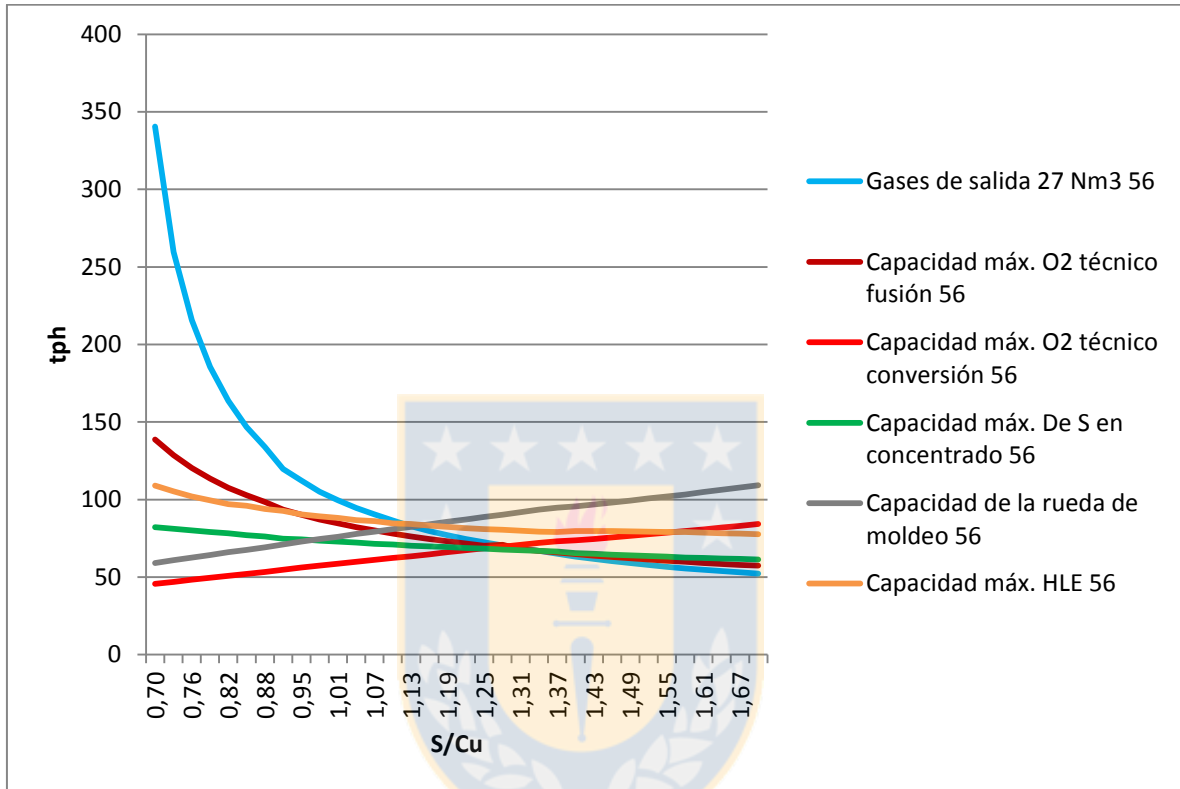


Figura 5.1 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 56.

A una ley objetivo de eje de 56%, se tiene que hasta una razón S/Cu de 1.22 el proceso está restringido por la capacidad de la inyección de oxígeno que se puede ingresar a los convertidores convirtiendo a ésta restricción en el cuello de botella de la línea de producción. Posterior a ello hasta una razón S/Cu de 1.31 y luego a S/Cu de 1.34 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido y por el oxígeno máximo que puede ser insuflado al HFF respectivamente. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF.

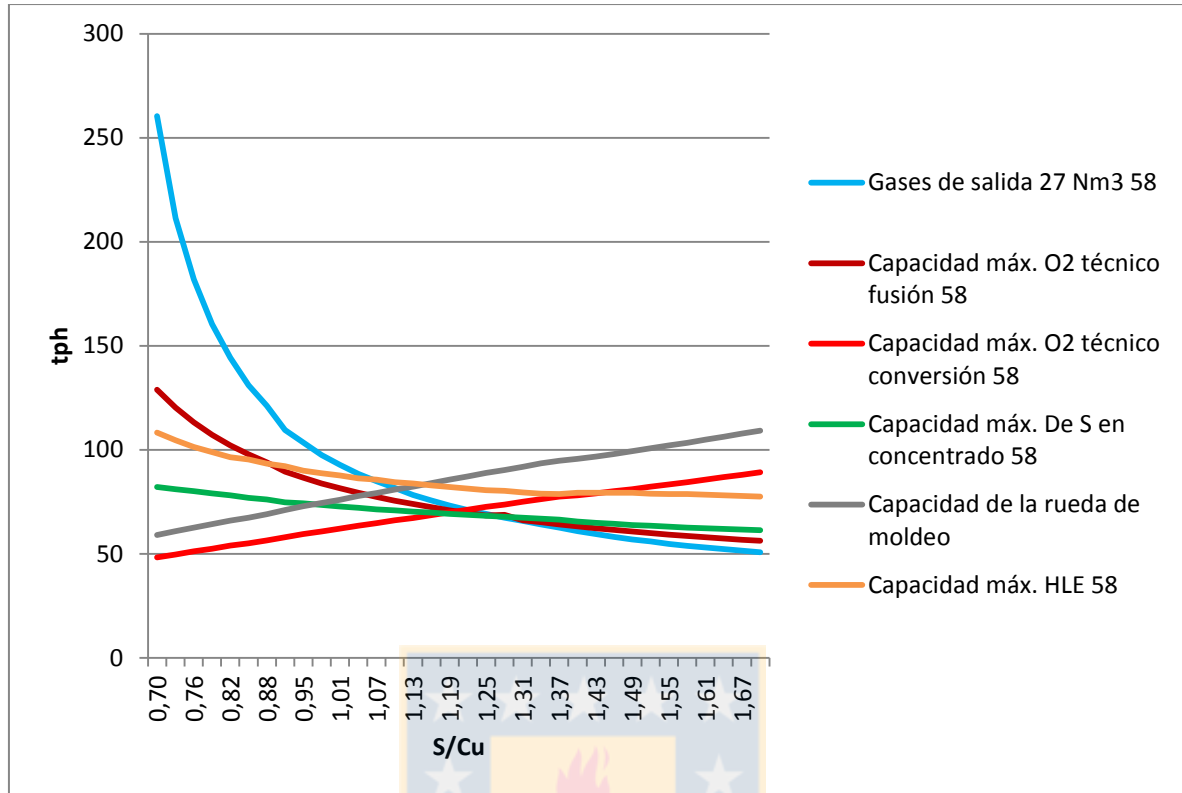


Figura 5.2 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 58.

A una ley objetivo de eje de 58%, se tiene que hasta una razón S/Cu de 1.16 el proceso está restringido por la capacidad de la inyección de oxígeno que se puede ingresar a los convertidores, posterior a ello hasta una razón S/Cu de 1.25 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF, convirtiendo a ésta restricción en el cuello de botella para un concentrado de aquellas características.

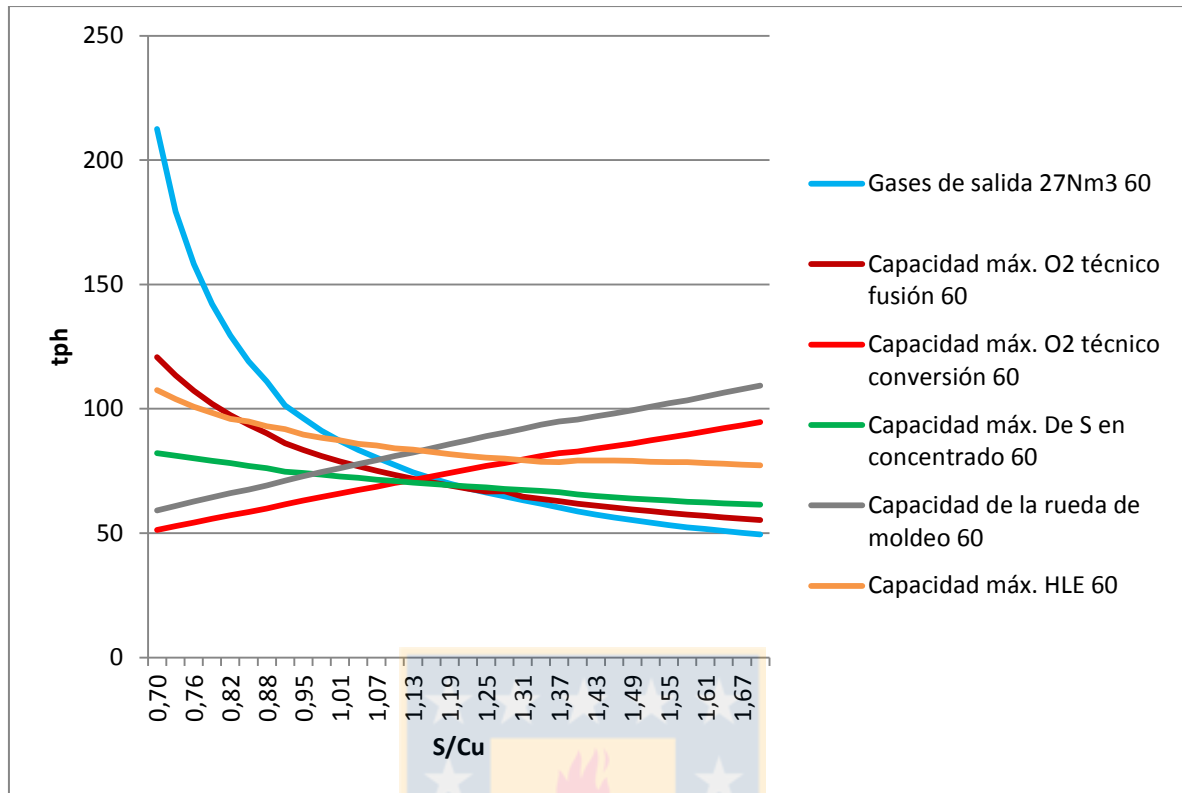


Figura 5.3 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 60.

A una ley objetivo de eje de 60%, se tiene que a una razón S/Cu de 1.10 el proceso está restringido por la capacidad de la inyección de oxígeno que se puede ingresar a los convertidores, posterior a ello hasta una razón S/Cu de 1.16 y luego a S/Cu de 1.22 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido y por el oxígeno máximo que puede ser insuflado al HFF respectivamente. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF.

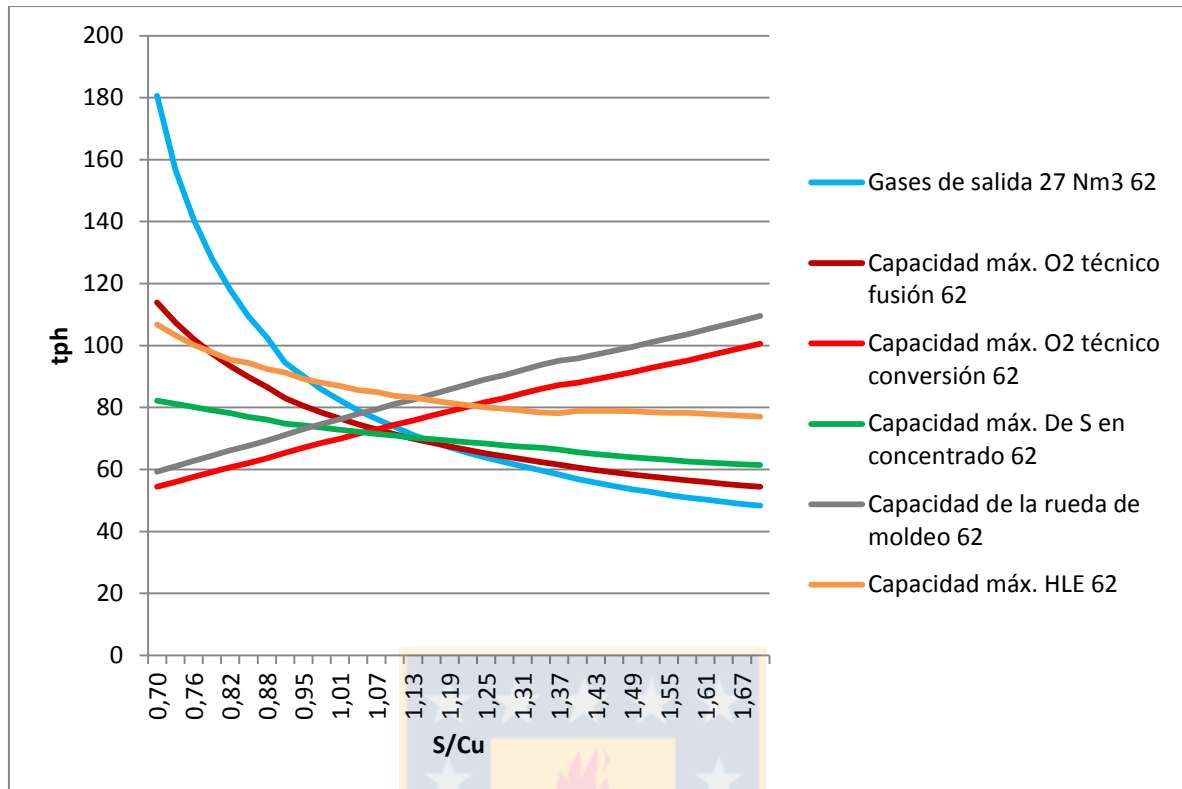


Figura 5.4 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 62.

A una ley objetivo de eje de 62%, se tiene que a una razón S/Cu de 1.04 el proceso está restringido por la capacidad de la inyección de oxígeno que se puede ingresar a los convertidores, posterior a ello hasta una razón S/Cu de 1.10 y luego a S/Cu de 1.16 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido y por el oxígeno máximo que puede ser insuflado al HFF respectivamente. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF.

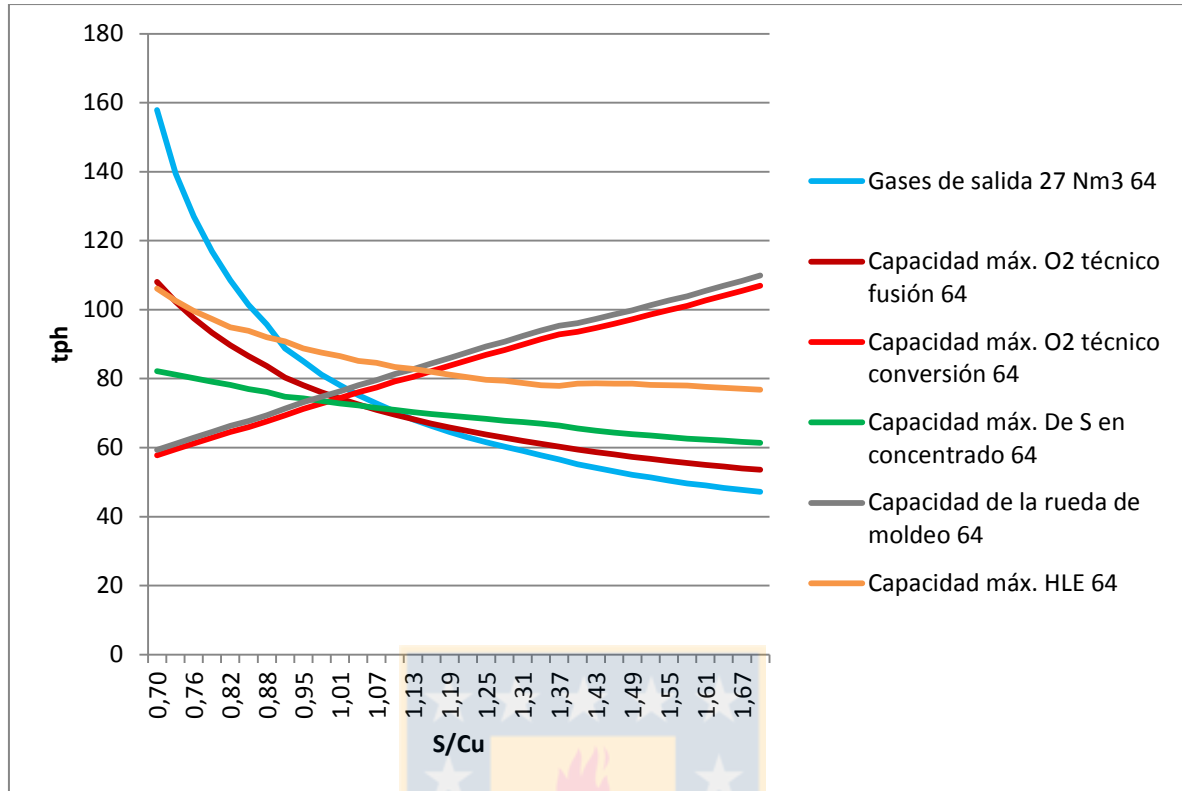


Figura 5.5 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 64.

A una ley objetivo de eje de 64%, se tiene que a una razón S/Cu de 0.98 el proceso está restringido por la capacidad de la inyección de oxígeno que se puede ingresar a los convertidores, posterior a ello hasta una razón S/Cu de 1.04 y luego a S/Cu de 1.10 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido y por el oxígeno máximo que puede ser insuflado al HFF respectivamente. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF.

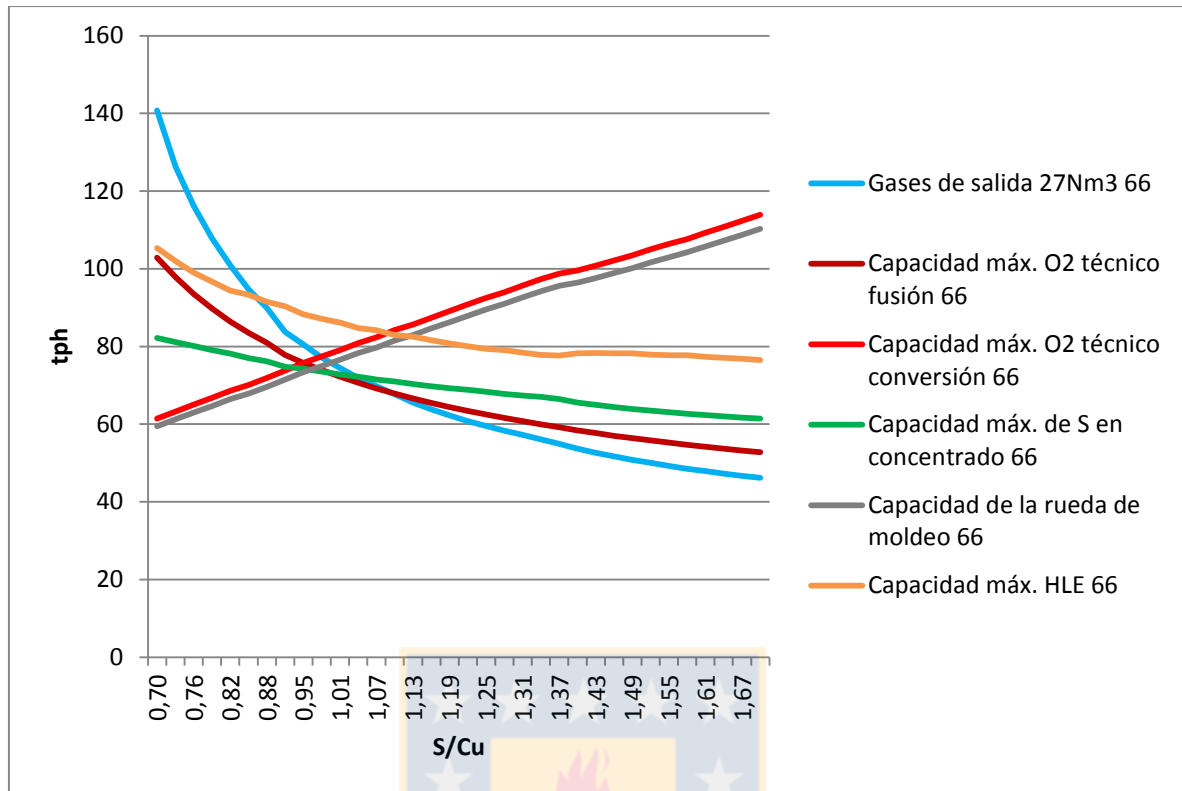


Figura 5.6 Restricción de alimentación de concentrado al HFF para ley objetivo de eje 66.

A una ley objetivo de eje de 66%, se tiene que a una razón S/Cu de 0.95 el proceso está restringido por la capacidad de tratamiento de la rueda de moldeo posterior a la conversión, posterior a ello hasta una razón S/Cu de 0.98 y luego a S/Cu de 1.07 el proceso está restringido por la capacidad máxima de azufre que puede ingresar a la planta de ácido y por el oxígeno máximo que puede ser insuflado al HFF respectivamente. Finalmente, el proceso es restringido exclusivamente por la capacidad de la caldera para captar los gases a la salida del HFF.

El modelo de BMyE permite, para cada restricción, saber cuál es la alimentación máxima de concentrado de cobre que se admite según la razón S/Cu. Mientras más alta es la ley de cobre en el concentrado que conlleva a una razón S/Cu menor a 1 se observa un proceso restringido por la etapa de conversión, ya sea por la cantidad de oxígeno máxima que puede ser insuflada a través de las toberas en los convertidores o por la capacidad que tiene la rueda de moldeo de procesar el cobre blíster. Por otra parte, los concentrados ricos en azufre y bajos en cobre activan los cuellos de botella en la etapa de fusión, siendo la principal restricción el volumen de gases generados y su posterior captación a la salida del HFF, así como la capacidad máxima de oxígeno que puede ser insuflado al HFF.

5.3.- Desarrollo de la curva óptima de alimentación de concentrado

Realizado el análisis de los 34 casos de razón S/Cu para cada distinta ley de eje, se observa cómo al graficar la alimentación permitida al HFF de concentrado con las restricciones correspondientes, que las seis curvas distintas de alimentación se van superponiendo unas sobre otras según como va variando la razón S/Cu, es por este motivo que es posible crear la curva óptima de alimentación de concentrado para cada ley de eje deseada. Para cada punto de razón S/Cu en el gráfico se tienen 6 datos diferentes de alimentación de concentrado, según sea la restricción utilizada para cada una, de tal forma que es el dato menor de los 6 el que restringe la alimentación máxima que puede tener el HFF para ese caso de S/Cu. Siguiendo el mismo método para los 33 casos siguientes se obtiene la curva teórica que representa la máxima alimentación de concentrado al HFF. Luego queda graficada para los 6 casos distintos de ley de eje deseada, una curva óptima de alimentación.

Para que el BMyE muestre la máxima alimentación que se puede realizar al HFF, se procede a graficar cada una de las 6 curvas distintas de alimentación. De esa forma, y siguiendo la misma metodología anterior, se forma una curva teórica, que muestra en cada uno de los 34 casos, cual puede ser la máxima alimentación de concentrado que se puede realizar, pero que cada cierta razón S/Cu deba o no variar la ley objetivo de eje deseada.

De la misma forma que se obtuvo el cálculo de los gráficos anteriores se obtiene, para cada ley objetivo, una curva óptima de alimentación de concentrado, los resultados para cada caso muestran que la curva óptima varía teniendo el máximo de alimentación para el caso de una ley objetivo de 66% para el eje con una alimentación teórica de 73.5 ton/h, para el caso de una ley objetivo de 58%, el caso más común utilizado en la fundición, una alimentación máxima de 69.3 ton/h de concentrado de cobre esto con una razón de S/Cu de 1.19.

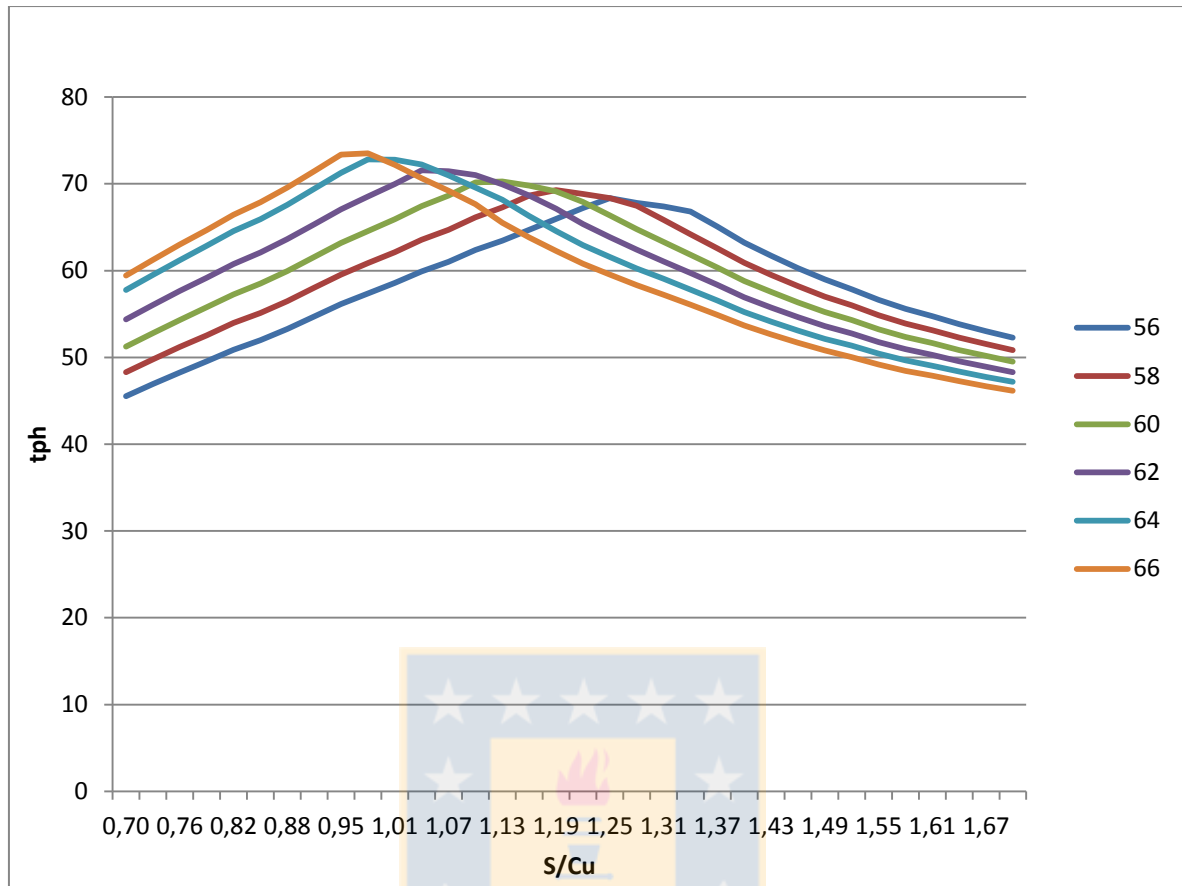


Figura 5.7 Resumen curvas óptimas de alimentación de concentrado para cada ley de eje deseada

El figura 5.7 representa un resumen de las curvas de alimentación para diferentes leyes de eje deseadas. Y se observa el comportamiento que de la alimentación de concentrado, según como se desee la ley de eje a la salida del HFF. Según como sea la razón S/Cu que de la mezcla de los concentrados iniciales, se debe fijar una ley de eje permita maximizar la alimentación de concentrado. Al igual que todo el desarrollo previo a este resultado, se debe tomar en cuenta la posibilidad de que puedan aparecer nuevas restricciones, por lo que no se puede por ejemplo extrapolar hacia números mayores o menores la ley de eje deseada.

Se observa además, mientras más alta es la ley fijada de eje, se puede aumentar la tasa de fusión, eso sí, las características del concentrado debe ser a una razón S/Cu cercana a 1, lo cual es una mezcla difícil de formar en la realidad, donde los concentrados varían entre S/Cu = 1.1 y S/Cu = 1.3.

El subproceso de limpieza de escorias es la única restricción que no se convierte en cuello de botella. En el proceso de conversión es la capacidad de insuflar oxígeno a los convertidores la principal restricción que es el cuello de botella y en el proceso de fusión el cuello de botella va modificándose respecto a las características del concentrado. Cuando éste concentrado presenta una razón S/Cu muy elevada es la caldera a la salida del HFF el cuello de botella de la línea de producción.

5.4.- Curva óptima de alimentación

Con la demostración grafica de la limitación que existe en la fundición, según el modelo de BMyE, se puede trazar un gráfico que permite observar una alimentación máxima teórica para todo el espectro de razón S/Cu analizado, de aquella forma al ir variando de una menor a mayor razón S/Cu se debe ir variando la ley de eje deseada para estar en el óptimo de alimentación de concentrado.

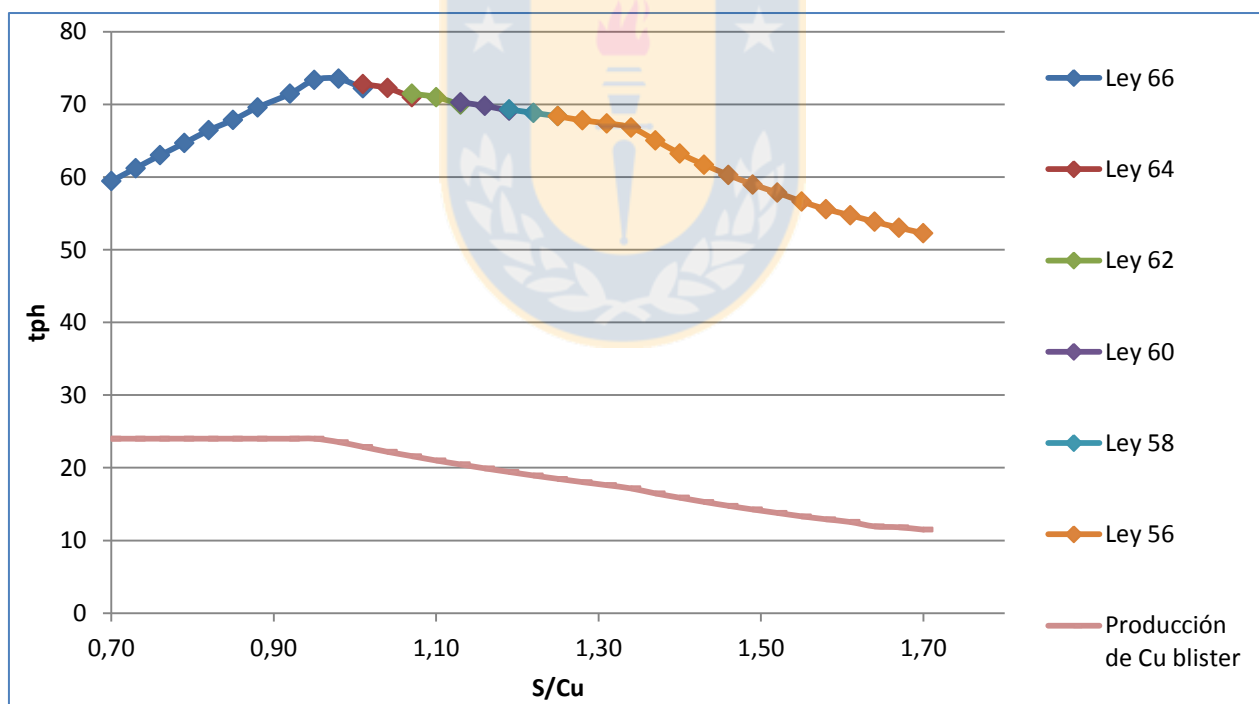


Figura 5.8 Curva óptima de alimentación de concentrado al HFF para el proceso de operación en la fundición Chagres.

La curva obtenida es la representación teórica de la curva óptima de alimentación de concentrado que puede cargarse al HFF con las 6 restricciones analizadas. Como ya se observó en los análisis anteriores, encontramos un punto de máxima alimentación de concentrado en una

razón de $S/Cu=0.98$ correspondiendo a una ley de eje de 66%. A medida que la razón S/Cu va siendo mayor se debe ir cambiando la ley de eje deseada para seguir manteniendo una máxima tasa de alimentación al HFF. En los puntos $S/Cu=1.01$ debe la ley de eje cambiar a 64%, en $S/Cu=1.07$ la ley de eje ser 62%, en $S/Cu=1.13$ la ley de eje debe ser 60%, en $S/Cu=1.19$ debe ser de 58% la ley de eje y finalmente sobre $S/Cu=1.25$ la ley de eje debe estar fijada en 56%. Señala como éste estudio es dinámico y que en orden de ir obteniendo la máxima tasa de fusión deben realizarse modificaciones a la ley de eje deseada.

Al mismo tiempo se muestra la producción teórica de cobre blíster. Se observa que hasta una razón S/Cu de 0.98 la producción es constante, ya que todo ese rango es restringido por la etapa de conversión y, la rueda de moldeo en éste caso, no permite una producción mayor. Al ser la etapa de fusión el cuello de botella después de $S/Cu=0.98$, la producción de cobre blíster decae constantemente, ya que al ir disminuyendo la tasa de fusión y con concentrados con menor ley de cobre es menor la masa de cobre que finalmente ingresa.

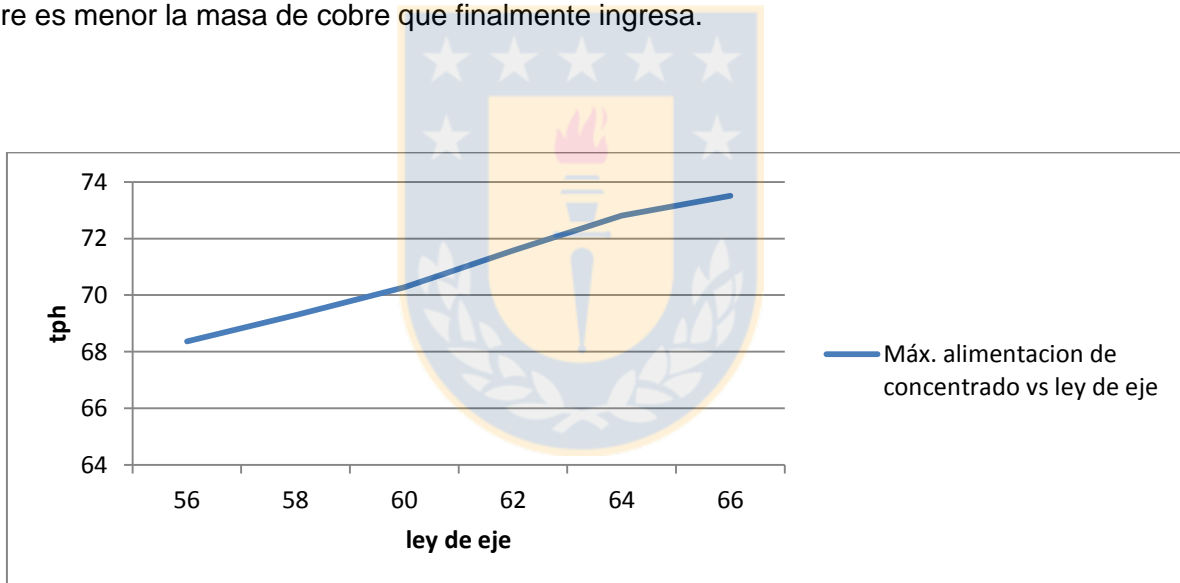


Figura 5.9 Máxima alimentación de concentrado según ley deseada de eje

De la misma forma que el análisis anterior encontramos que a mayor ley de eje deseada podemos emplear una mayor alimentación de concentrado, siempre y cuando se cuente con concentrado con razón S/Cu favorable y que permita maximizar el resultado. Por lo que si en la capacidad de fundir concentrado se muestra la eficiencia de una fundición, uno de sus objetivos productivos es mantener una fusión que de un eje de mayor ley posible.

5.5.- Modelo en casos de alto S/Cu

Como se mencionó en el capítulo 2 se realizó un análisis de 24 casos ocurridos entre el 1 de enero de 2017 y el 31 de marzo del 2017, en que el promedio de los concentrados ocupados en aquellas ocurrencias presentaron una razón S/Cu sobre 1.3.

Para aquellos casos se utilizaron los resultados del BMyE, respecto a cuánto es la tasa de fusión para aquellos concentrados. Se aprecia que en 20 casos la tasa de fusión medida supero la tasa de fusión simulada.

Los concentrados analizados, además de tener una elevada razón S/Cu, tienen que sus tres elementos principales (cobre, hierro, azufre) corresponden al 80% del análisis químico del concentrado, llegando en algunos casos a ser menor aún. Dado esta diferencia en el cálculo con el BMyE es menor la masa de cobre que ingresa, afectando los demás balances de oxígeno y por ende da como resultado que los gases que pueden ser captados por la caldera a la salida del HFF son menores. El oxígeno requerido en el HFF y los convertidores también es menor debido a la menor cantidad de cobre. El oxígeno en el HFF y la capacidad de la caldera a la salida del HFF son los cuellos de botella para concentrados de alta razón S/Cu. Por las características de éstos concentrados las curvas de tasa de fusión se ven aumentadas.

Se concluye que el BMyE no entrega una respuesta satisfactoria, sobre si la tasa de fusión se mantuvo en su máxima capacidad para concentrados de éstas características.

5.6.- Capacidad ociosa para la alimentación al HFF

Dentro del análisis de cada ley objetivo de eje se tiene una restricción dominante según corresponda a la razón S/Cu, de aquella forma se encuentra que para cada caso existe una capacidad ociosa debido a equipos que poseen una restricción mayor.

Para un concentrado de S/Cu=0.95 a una ley de eje de 62, se observa que la capacidad ociosa es de 23.12 ton/h, que es la diferencia entre la restricción mayor (que es la capacidad de la caldera a la salida del HFF de captar los gases de la fusión) y la restricción correspondiente a la máxima capacidad de insuflar oxígeno en la conversión.

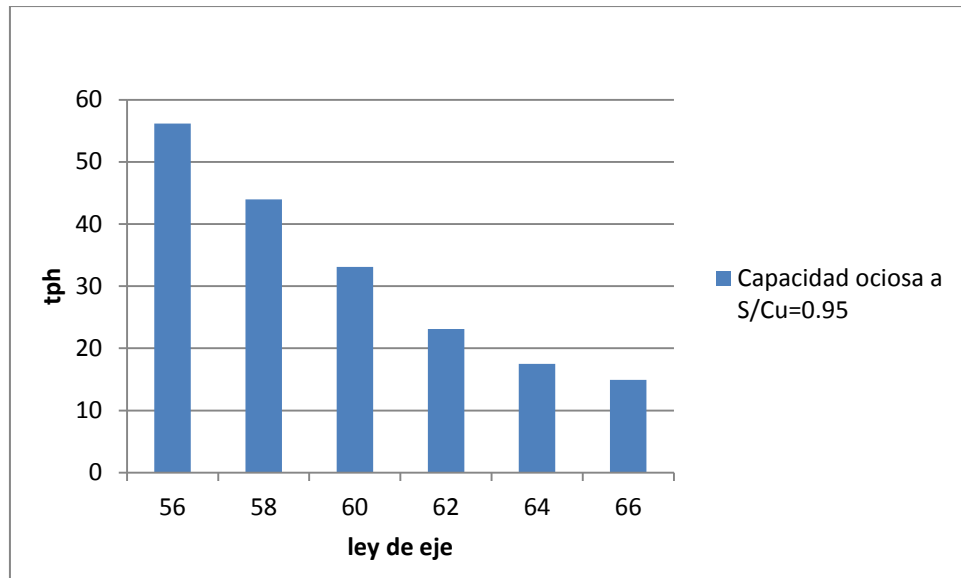


Figura 5.10 Capacidad ociosa de la fundición para un concentrado con razón S/Cu 0.95 vs ley de eje.

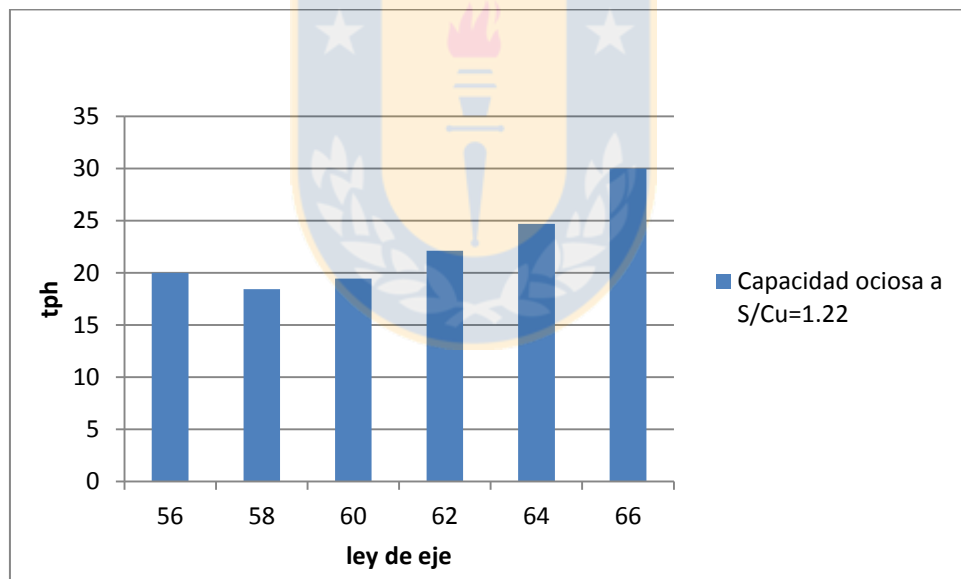


Figura 5.11 Capacidad ociosa de la fundición para un concentrado con razón S/Cu 1.22 vs ley de eje.

Para un concentrado de razón S/Cu = 1.22 se observa que conforme va subiendo la ley de eje deseada, la capacidad restringida de alimentación adquiere una forma de U. Esto ya que se encuentra en una zona de transición desde el cuello de botella dominado por la conversión al cuello de botella producido por los equipos de la fusión. Para una ley de eje de 58 se tiene la

menor diferencia entre la máxima y la mínima restricción correspondientes a la capacidad de la rueda de moldeo y la capacidad de la planta de ácido de recibir el azufre proveniente en el SO_2 .

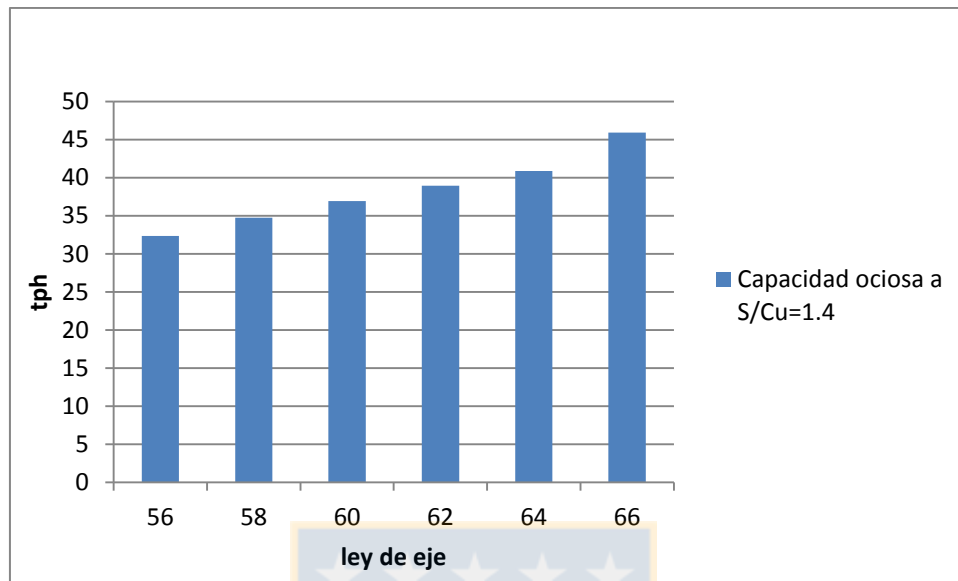


Figura 5.12 Capacidad ociosa de la fundición para un concentrado con razón S/Cu 1.4 vs ley de eje.

Además, se observa que en los ejemplos más extremos se tienen una mayor capacidad ociosa, correspondiente a una elevada capacidad de insuflar oxígeno al HFF en el primer ejemplo, y la capacidad de conversión que existe y también es elevada para el ejemplo de alta razón S/Cu.

Finalmente se observa que con cualquier tipo de concentrado se tendrá una operación que no puede ser aprovechada a su máxima capacidad. Dentro de ello y según las curvas de restricciones creadas, el objetivo es trabajar con concentrados que permitan una mezcla de razón S/Cu entre los rangos de $\text{S/Cu} = 1.1$ y $\text{S/Cu} = 1.25$, ya que gráficamente es donde las curvas tienen menor diferencia entre ellas.

- 5.6.1.- Mayor restricción de la fundición

Los cuellos de botella operacionales van cambiando de acuerdo a la razón S/Cu del concentrado alimentado, y respecto a los diversos casos estudiados, también varían a diferentes leyes objetivo deseadas. De ello se encuentra que para razones S/Cu menores a 1,10 las restricciones en los equipos del proceso de la conversión limitan la capacidad de procesamiento de concentrados, esto es que la capacidad, en primera instancia, de insuflar oxígeno a los convertidores limita la cantidad de eje a tratar y por lo tanto la alimentación de concentrado al HFF queda restringido a esa cantidad de eje que se produce, por lo que esa restricción y la siguiente,

limitada capacidad de la rueda de moldeo, son los cuellos de botella para los concentrados de aquellas razones S/Cu. Para razones S/Cu mayores son los equipos que pertenecen al proceso de fusión los que restringen la alimentación.

En la etapa de conversión se observa como la capacidad de inyección de oxígeno a los convertidores es la restricción principal para la ley objetivo común que se utiliza, y que varía entre 56 y 60. Para la ley objetivo más alta es la capacidad de la rueda de moldeo la principal restricción. Cuando se tienen concentrados pobres en cobre, con una razón S/Cu sobre 1,2 las principales restricciones son las relacionadas a los gases liberados durante la fusión, la captación de los gases a la salida del horno y la capacidad de la planta de ácido de fijar el S que traen los gases en producir ácido

Finalmente, si se habla sobre un equipo específico en las operaciones, se observa que la capacidad de la planta de ácido es la característica que más restringe el proceso en la fundición.



6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio realizado, permite obtener teóricamente, una tasa máxima de fusión para concentrados con cierto análisis químico y con una razón S/Cu específica, ya que se ha señalado como una variable crítica.

Como se observó en el capítulo 4, las simulaciones del BMyE son bastante cercanas a los datos medidos en la fundición, solo dos análisis comparativos superan el 10% de error. Particularmente la comparación entre el azufre que ingresa a la planta de ácido simulado y el real presenta el menor error dando cuenta que el balance de los gases producidos en fusión y conversión es exacto, de la misma forma el coeficiente de oxígeno presenta el segundo menor error y da cuenta de la exactitud en el balance de gases en fusión.

Por otro lado, se nombró ya que el BMyE no entregó resultados exactos a los casos de concentrados con razones S/Cu anómalos. Se asume que el error se vale de dos características de la simulación. En primera instancia el BMyE fija un 10% de ganga, y éstos concentrados poseen una ganga que varía entre 15 y 20%. La segunda característica tiene relación con el análisis mineralógico, ya que si éste es incorrecto el balance de calor del HFF se ve completamente afectado y entrega valores erróneos en cuanto al balance de nitrógeno y por consiguiente al balance de gases.

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre la capacidad ociosa, el BMyE muestra que para concentrados con razones S/Cu muy bajas o muy altas existe una gran diferencia en la tasa mayor y menor, sin embargo, es preciso aclarar que de todos los sub procesos es la planta de ácido el equipo a tener en su máxima capacidad, ya que representa de los mayores costos en una fundición. Bajo esta perspectiva se muestra que los valores de tasa máxima de fusión son cercanos a la restricción que impone la planta de ácido, por lo que se concluye que la capacidad ociosa de la fundición en realidad es menor.

Para finalizar, es menester recalcar que los concentrados típicos utilizados en Chagres varían en una razón S/Cu entre 1,15 y 1,30 y se trabaja con una ley de eje entre 56 y 58%. Rango que, como muestran los gráficos desarrollados, está restringido por la etapa de fusión, siendo la planta de ácido y la capacidad del HFF de inyectar oxígeno las restricciones más importantes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TEORIA DE RESTRICCIONES “LA META”, ELIYAHU GOLDRATT, JEFF COX, 2003,
- [2] MEMORIA “METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE OXÍGENO DEL NUEVO QUEMADOR DE CONCENTRADOS EN FUNDICIÓN CHAGRES”, ALEXIS CAMPOS, 2006, (PAGS, 13-23)
- [3] METALURGIA EXTRACITVA FUNDAMENTOS VOL I, JOSE SANCHOM LUIS VERDEJA, ANTONIO BALLESTER, 2003, (PAGS, 69-99)
- [4] TESIS DOCTORAL “COMBUSTION DE CONCENTRADOS DE COBRE EN HORNO DE FUSION FLASH”, ROBERTO PARADA, 2015, (PAGS, 23-40)
- [5] METALURGIA EXTRACTIVA PROCESOS DE OBTENCION VOL II, JOSE SANCHO, LUIS VERDEJA, ANTONIO BALLESTER, 2003, (PAGS 254-271)
- [6] DAVENPORT, WG “EXTRACTIVE METALLURGY OF COPPER”, 1994
- [7] MEMORIA “MODELO DE PLANIFICACIÓN DE LARGO PLAZO PARA UNA FUNDICIÓN DE COBRE”, EDUARDO CABRERA, 2010, (PAGS, 28-37)
- [8] REPORTE DE CONTROL DE PROCESOS PI, CHAGRES ANGLO AMERICAN 2016-2017

ANEXOS

ANEXO A

Tablas resumen de mineralogías ocupadas para construcción del gráfico 3.1 “Ponderación de los distintos minerales en relación a la variación de S/Cu en el concentrado” ejemplo ley de eje 66%

1 BC: (tph)		109.000	
Mezcla C	%	tph	%
CuFeS2	57.169	Cu	44.505
Cu2S	17.306	Fe	22.442
Cu5FeS4	11.394	S	31.153
FeS2	4.132	S/Cu	0.700

2 BC: (tph)		105.241	
Mezcla C	%	tph	%
CuFeS2	58.456	Cu	41.749
Cu2S	12.452	Fe	22.491
Cu5FeS4	14.980	S	30.477
FeS2	4.112	S/Cu	0.730

3 BC: (tph)		102.038	
Mezcla C	%	tph	%
CuFeS2	61.326	Cu	39.376
Cu2S	11.752	Fe	22.532
Cu5FeS4	12.587	S	29.926
FeS2	4.335	S/Cu	0.760

4 BC: (tph)		99.559	
Mezcla C	%	tph	%
CuFeS2	62.216	Cu	37.454
Cu2S	11.381	Fe	22.560
Cu5FeS4	11.036	S	29.589
FeS2	5.367	S/Cu	0.790

5 BC: (tph)		97.048	
Mezcla C	%	tph	%
CuFeS2	64.012	Cu	35.578
Cu2S	10.150	Fe	22.592
Cu5FeS4	10.090	S	29.174
FeS2	5.747	S/Cu	0.820

6	BC: (tph)	95.884		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	60.393		Cu	34.432
Cu2S	10.905		Fe	22.596
Cu5FeS4	9.933		S	29.267
FeS2	8.769		S/Cu	0.850

7	BC: (tph)	93.909		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	61.663		Cu	32.924
Cu2S	10.701		Fe	22.620
Cu5FeS4	8.153		S	28.973
FeS2	9.483		S/Cu	0.880

8	BC: (tph)	92.670		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	56.021		Cu	31.656
Cu2S	10.401		Fe	22.623
Cu5FeS4	10.195		S	29.124
FeS2	13.382		S/Cu	0.920

9	BC: (tph)	90.458		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	60.525		Cu	30.131
Cu2S	9.833		Fe	22.656
Cu5FeS4	7.106		S	28.625
FeS2	12.536		S/Cu	0.950

10	BC: (tph)	89.200		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	58.989		Cu	29.097
Cu2S	8.189		Fe	22.668
Cu5FeS4	8.930		S	28.515
FeS2	13.892		S/Cu	0.980

11	BC: (tph)	88.102		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	58.404		Cu	28.166 31.970
Cu2S	9.081		Fe	22.678 25.740
Cu5FeS4	7.098		S	28.448 32.290
FeS2	15.417		S/Cu	1.010

12	BC: (tph)	86.664		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	59.352		Cu	27.109 31.280
Cu2S	7.395		Fe	22.696 26.189
Cu5FeS4	7.617		S	28.193 32.531
FeS2	15.636		S/Cu	1.040

13	BC: (tph)	86.013		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	57.687		Cu	26.432 30.730
Cu2S	10.244		Fe	22.698 26.389
Cu5FeS4	4.066		S	28.282 32.881
FeS2	18.004		S/Cu	1.070

14	BC: (tph)	84.722		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	58.487		Cu	25.493 30.090
Cu2S	8.217		Fe	22.715 26.811
Cu5FeS4	5.174		S	28.042 33.099
FeS2	18.122		S/Cu	1.100

15	BC: (tph)	84.211		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	54.390		Cu	24.918 29.590
Cu2S	7.372		Fe	22.714 26.973
Cu5FeS4	7.690		S	28.157 33.437
FeS2	20.548		S/Cu	1.130

16	BC: (tph)	83.257		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	54.319		Cu	24.169 29.030
Cu2S	6.791		Fe	22.725 27.295
Cu5FeS4	7.577		S	28.037 33.675
FeS2	21.312		S/Cu	1.160

17	BC: (tph)	82.414		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	53.773		Cu	23.488 28.500
Cu2S	6.202		Fe	22.734 27.585
Cu5FeS4	7.782		S	27.951 33.915
FeS2	22.243		S/Cu	1.190

18	BC: (tph)	81.623		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	53.095		Cu	22.846 27.990
Cu2S	5.460		Fe	22.742 27.862
Cu5FeS4	8.283		S	27.872 34.148
FeS2	23.162		S/Cu	1.220

19	BC: (tph)	80.886		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	53.137		Cu	22.244 27.500
Cu2S	6.136		Fe	22.749 28.125
Cu5FeS4	6.633		S	27.805 34.375
FeS2	24.094		S/Cu	1.250

20	BC: (tph)	80.504		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	51.146		Cu	21.801 27.080
Cu2S	8.141		Fe	22.749 28.258
Cu5FeS4	4.530		S	27.905 34.662
FeS2	26.183		S/Cu	1.280

21	BC: (tph)	79.822		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	50.962		Cu	21.249
Cu2S	8.203		Fe	22.756
Cu5FeS4	3.826		S	27.836
FeS2	27.009		S/Cu	1.310

22	BC: (tph)	79.202		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	49.800		Cu	20.735
Cu2S	6.996		Fe	22.762
Cu5FeS4	5.289		S	27.785
FeS2	27.915		S/Cu	1.340

23	BC: (tph)	79.001		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	45.643		Cu	20.398
Cu2S	6.909		Fe	22.757
Cu5FeS4	7.103		S	27.945
FeS2	30.345		S/Cu	1.370

24	BC: (tph)	79.661		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	35.896		Cu	20.401
Cu2S	10.697		Fe	22.732
Cu5FeS4	7.325		S	28.562
FeS2	36.082		S/Cu	1.400

25	BC: (tph)	79.671		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	30.888		Cu	20.157
Cu2S	12.057		Fe	22.723
Cu5FeS4	7.858		S	28.824
FeS2	39.196		S/Cu	1.430

26	BC: (tph)	79.634		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	26.312		Cu	19.901 24.990
Cu2S	13.175		Fe	22.715 28.525
Cu5FeS4	8.462		S	29.055 36.485
FeS2	42.051		S/Cu	1.460

27	BC: (tph)	79.550		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	22.167		Cu	19.633 24.680
Cu2S	14.049		Fe	22.709 28.547
Cu5FeS4	9.137		S	29.253 36.773
FeS2	44.647		S/Cu	1.490

28	BC: (tph)	79.228		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	20.262		Cu	19.284 24.340
Cu2S	14.680		Fe	22.709 28.663
Cu5FeS4	8.846		S	29.312 36.997
FeS2	46.212		S/Cu	1.520

29	BC: (tph)	79.050		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	16.239		Cu	18.996 24.030
Cu2S	13.735		Fe	22.706 28.724
Cu5FeS4	11.749		S	29.444 37.247
FeS2	48.278		S/Cu	1.550

30	BC: (tph)	79.022		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	12.322		Cu	18.768 23.750
Cu2S	15.213		Fe	22.699 28.725
Cu5FeS4	11.584		S	29.653 37.525
FeS2	50.881		S/Cu	1.580

31	BC: (tph)	78.625		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	11.794		Cu	18.414 23.420
Cu2S	16.208		Fe	22.702 28.874
Cu5FeS4	10.097		S	29.647 37.706
FeS2	51.901		S/Cu	1.610

32	BC: (tph)	78.314		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	9.835		Cu	18.098 23.110
Cu2S	15.883		Fe	22.703 28.990
Cu5FeS4	11.089		S	29.681 37.900
FeS2	53.193		S/Cu	1.640

33	BC: (tph)	78.027		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	8.307		Cu	17.798 22.810
Cu2S	16.440		Fe	22.704 29.097
Cu5FeS4	10.748		S	29.722 38.093
FeS2	54.505		S/Cu	1.670

34	BC: (tph)	77.697		
Mezcla C	%		tph	%
CuFeS2	7.211		Cu	17.490 22.510
Cu2S	16.785		Fe	22.706 29.223
Cu5FeS4	10.438		S	29.732 38.267
FeS2	55.565		S/Cu	1.700

ANEXO B

Ecuaciones y ejemplo de cálculo de correlaciones ocupadas en el balance de masa

1. % Fe_3O_4 en el eje:

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 0,0036 \times (\text{ley de eje})^2 - 0,6345 \times (\text{ley de eje}) + 29,8507$$

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 0,0036 \times (66)^2 - 0,6345 \times (66) + 29,8507$$

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 3,7$$

2. % S en la escoria:

$$\% \text{S} = 0,0006 \times (\text{ley de eje})^2 - 0,1057 \times (\text{ley de eje}) + 5,0888$$

$$\% \text{S} = 0,0006 \times (66)^2 - 0,1057 \times (66) + 5,0888$$

$$\% \text{S} = 0,7$$

3. % Fe_3O_4 en la escoria:

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 0,0004 \times (\text{ley de eje})^2 + 0,2215 \times (\text{ley de eje}) - 0,7486$$

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 0,0004 \times (66)^2 + 0,2215 \times (66) - 0,7486$$

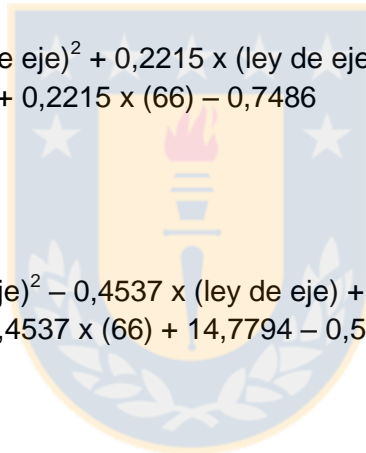
$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = 15,6$$

4. % Cu en la escoria:

$$\% \text{Cu} = 0,0039 \times (\text{ley de eje})^2 - 0,4537 \times (\text{ley de eje}) + 14,7794 - 0,5$$

$$\% \text{Cu} = 0,0039 \times (66)^2 - 0,4537 \times (66) + 14,7794 - 0,5$$

$$\% \text{Cu} = 1,3$$



ANEXO C

Ecuaciones del balance de energía

El balance de energía tiene por objetivo fijar la temperatura de operación de las fases fundidas y del gas metalúrgico, utilizando para esto la alimentación de Nitrógeno como gas inerte. El Nitrógeno arrastra el calor en exceso generado por las reacciones exotérmicas de manera de mantener la temperatura en los estándares fijados. Operacionalmente esto es logrado controlando el enriquecimiento en Oxígeno (σ) del aire de proceso. La ecuación que define a esta variable es:

$$\delta = \left[\frac{(Nm^3 \text{ de } O_2 \text{ en el aire}) + (Nm^3 \text{ de } O_2 \text{ en el oxígeno técnico})}{(Nm^3 \text{ de aire}) + (Nm^3 \text{ de oxígeno técnico})} \right] * 100$$

El cálculo de la masa requerida de Nitrógeno que se utiliza en la ecuación anterior, es calculado balanceando la ecuación global de energía, considerando las tres fases: gas; mata; y escoria.

$$Q_{generacion} + Q_{sensible} + Q_{latente} + Q_{perdidas} = 0$$

Al desarrollar cada uno de los términos contenidos en la reacción anterior, esta queda desarrollada en función de dos parámetros: La temperatura global de la torre de reacción (T^*), desde su temperatura de referencia T_0 , y la masa de Nitrógeno, la que está contenida en el parámetro (m_N). La solución a esta ecuación queda determinada, fijando una temperatura estándar de la torre de reacción, y el valor de las pérdidas de calor, que son características para cada horno. La ecuación anterior, caracteriza el balance de energía en la torre de reacción, considerando las tres fases presentes: mate (m), escoria (e) y gas (g).

$$m_N = \frac{Q_{generacion} + Q_{latente} + Q_{perdidas}}{\int_{T_0}^{T^*} C_{p_g} dT * PM_N * 1000}$$

Ejemplo Q calculados para concentrado:

$$M = 89.2 \text{ tph}$$

$$S/Cu = 0.98$$

Q perdidas = 5000 MJ

Q latente:

Especie	ΔH_F KJ/mol	MJ
FeS	32.5	4912
Cu ₂ S	12.8	2913
Cu ₂ O	68.9	147
*2FeO*SiO ₂	92.2	7636
Fe ₃ O ₄	138.0	4088.4
SiO ₂	14.2	1009.3
Otros	100.0	7953.8
TOTAL		28661

Q generación:

Reacciones	ΔH° KJ/mol	MJ
FeS ₂ + O ₂ (g) = FeS + SO ₂ (g)	-226.9	-23441
CuFeS ₂ + 0.5O ₂ (g) = 0.5Cu ₂ S + FeS + 0.5SO ₂ (g)	-100.3	-28756
2Cu ₅ FeS ₄ + O ₂ = 2FeS + 5Cu ₂ S + SO ₂	-177.1	-2812
3FeS + 5O ₂ (g) = Fe ₃ O ₄ + 3SO ₂ (g)	-1703.8	-50478
FeS + 1.5O ₂ (g) = FeO + SO ₂ (g)	-462.4	-76619
2FeO + SiO ₂ = *2FeO*SiO ₂	-34.5	-2859
Cu ₂ S + 1.5O ₂ (g) = Cu ₂ O + SO ₂ (g)	-386.4	-826
TOTAL		-185790

ANEXO D

Tablas del cálculo de validación de datos simulados

S/Cu	1.07	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	8735	8538	2.25
Rueda de Moldeo		24000	19844	18833	5.09
S en el conc. A planta de acido		23500	21558	21000	2.59
Oxígeno técnico en fusión		20500	17891	15303	14.47
Volumen gases de salida		27000	18186		
Capacidad del HLE		48000	34708		
%Enriquecimiento O2			61.97%	60.00%	3.19
Coeficiente de oxígeno			142	141	0.55

S/Cu	1.08	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	8606	8998	4.56
Rueda de Moldeo		24000	19665	20083	2.12
S en el conc. A planta de acido		23500	21597	21500	0.45
Oxígeno técnico en fusión		20500	18371	15834	13.81
Volumen gases de salida		27000	18408		
Capacidad del HLE		48000	37066		
%Enriquecimiento O2			62.23%	62.00%	0.36
Coeficiente de oxígeno			142	139	2.41

S/Cu	1.10	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	8562	8826	3.09
Rueda de Moldeo		24000	19058	15583	18.23
S en el conc. A planta de acido		23500	21296	21100	0.92
Oxígeno técnico en fusión		20500	18023	15679	13.01
Volumen gases de salida		27000	18753		
Capacidad del HLE		48000	34288		
%Enriquecimiento O2			60.51%	60.00%	0.85
Coeficiente de oxígeno			146	143	2.01

S/Cu	1.11	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6089	6351	4.30
Rueda de Moldeo		24000	14284	11333	20.66
S en el conc. A planta de acido		23500	16218	16700	2.97
Oxigeno técnico en fusión		20500	14191	15107	6.46
Volumen gases de salida		27000	14569		
Capacidad del HLE		48000	28221		
%Enriquecimiento O2			61.04%	62.00%	1.57
Coeficiente de oxigeno			148	138	6.74

S/Cu	1.12	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7910	8153	3.07
Rueda de Moldeo		24000	18555	14750	20.51
S en el conc. A planta de acido		23500	21177	20600	2.72
Oxigeno técnico en fusión		20500	18527	15122	18.38
Volumen gases de salida		27000	19017		
Capacidad del HLE		48000	37807		
%Enriquecimiento O2			61.10%	62.00%	1.47
Coeficiente de oxigeno			146	143	2.27

S/Cu	1.13	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	9021	8779	2.68
Rueda de Moldeo		24000	19675	18875	4.07
S en el conc. A planta de acido		23500	22594	22400	0.86
Oxigeno técnico en fusión		20500	19040	16341	14.17
Volumen gases de salida		27000	19840		
Capacidad del HLE		48000	35974		
%Enriquecimiento O2			60.68%	61.00%	0.52
Coeficiente de oxigeno			147	143	2.42

S/Cu	1.14	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7089	6839	3.54
Rueda de Moldeo		24000	16342	10042	38.55
S en el conc. A planta de acido		23500	18975	19100	0.66
Oxigeno técnico en fusión		20500	16530	13580	17.85
Volumen gases de salida		27000	17780		
Capacidad del HLE		48000	31545		
%Enriquecimiento O2			59.05%	64.00%	8.38
Coeficiente de oxigeno			151	145	3.88

S/Cu	1.16	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7786	7569	2.79
Rueda de Moldeo		24000	17182	15208	11.48
S en el conc. A planta de acido		23500	20260	21000	3.65
Oxigeno técnico en fusión		20500	17367	14454	16.77
Volumen gases de salida		27000	19305		
Capacidad del HLE		48000	30933		
%Enriquecimiento O2			57.68%	54.00%	6.38
Coeficiente de oxigeno			154	150	2.35

S/Cu	1.17	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7658	7909	3.27
Rueda de Moldeo		24000	17860	15792	11.58
S en el conc. A planta de acido		23500	21379	20900	2.24
Oxigeno técnico en fusión		20500	18718	15337	18.06
Volumen gases de salida		27000	21578		
Capacidad del HLE		48000	33871		
%Enriquecimiento O2			56.17%	60.00%	6.82
Coeficiente de oxigeno			156	142	9.20

S/Cu	1.18	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	8112	7633	5.90
Rueda de Moldeo		24000	17437	18875	8.25
S en el conc. A planta de acido		23500	20969	21000	0.15
Oxigeno técnico en fusión		20500	17788	13814	22.34
Volumen gases de salida		27000	20162		
Capacidad del HLE		48000	30746		
%Enriquecimiento O2			57.02%	55.00%	3.54
Coeficiente de oxigeno			155	156	0.91

S/Cu	1.19	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7874	7765	1.39
Rueda de Moldeo		24000	17733	18917	6.68
S en el conc. A planta de acido		23500	21611	20600	4.68
Oxigeno técnico en fusión		20500	18950	14871	21.52
Volumen gases de salida		27000	21879		
Capacidad del HLE		48000	33692		
%Enriquecimiento O2			55.98%	59.00%	5.40
Coeficiente de oxigeno			158	145	8.22

S/Cu	1.20	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6824	7587	11.18
Rueda de Moldeo		24000	16008	15292	4.48
S en el conc. A planta de acido		23500	19625	19400	1.15
Oxigeno técnico en fusión		20500	17516	14034	19.88
Volumen gases de salida		27000	19935		
Capacidad del HLE		48000	32357		
%Enriquecimiento O2			56.61%	55.00%	2.84
Coeficiente de oxigeno			158	146	7.69

S/Cu	1.21	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	8036	8867	10.35
Rueda de Moldeo		24000	17425	12000	31.13
S en el conc. A planta de acido		23500	21459	21700	1.12
Oxigeno técnico en fusión		20500	18453	15906	13.80
Volumen gases de salida		27000	20861		
Capacidad del HLE		48000	32607		
%Enriquecimiento O2			57.15%	55.00%	3.77
Coeficiente de oxigeno			156	156	0.12

S/Cu	1.22	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7989	7298	8.66
Rueda de Moldeo		24000	16681	14500	13.08
S en el conc. A planta de acido		23500	20832	20900	0.33
Oxigeno técnico en fusión		20500	17908	15455	13.70
Volumen gases de salida		27000	20388		
Capacidad del HLE		48000	30984		
%Enriquecimiento O2			56.66%	52.00%	8.23
Coeficiente de oxigeno			157	159	1.16

S/Cu	1.23	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	8145	8593	5.49
Rueda de Moldeo		24000	18026	15333	14.94
S en el conc. A planta de acido		23500	22606	23600	4.40
Oxigeno técnico en fusión		20500	20059	16034	20.06
Volumen gases de salida		27000	24345		
Capacidad del HLE		48000	33861		
%Enriquecimiento O2			53.66%	55.00%	2.49
Coeficiente de oxigeno			164	152	7.35

S/Cu	1.24	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7318	7699	5.22
Rueda de Moldeo		24000	15961	18042	13.04
S en el conc. A planta de acido		23500	20213	20800	2.90
Oxigeno técnico en fusión		20500	17783	15786	11.23
Volumen gases de salida		27000	21682		
Capacidad del HLE		48000	28957		
%Enriquecimiento O2			53.62%	50.00%	6.76
Coeficiente de oxigeno			166	174	5.04

S/Cu	1.25	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7226	6993	3.23
Rueda de Moldeo		24000	15761	15458	1.92
S en el conc. A planta de acido		23500	20171	20500	1.63
Oxigeno técnico en fusión		20500	17637	12688	28.06
Volumen gases de salida		27000	20799		
Capacidad del HLE		48000	29931		
%Enriquecimiento O2			55.31%	55.00%	0.55
Coeficiente de oxigeno			162	154	5.08

S/Cu	1.26	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6403	7236	13.01
Rueda de Moldeo		24000	13925	14875	6.82
S en el conc. A planta de acido		23500	17968	18900	5.19
Oxigeno técnico en fusión		20500	15742	13996	11.09
Volumen gases de salida		27000	18259		
Capacidad del HLE		48000	27547		
%Enriquecimiento O2			56.05%	50.00%	10.79
Coeficiente de oxigeno			161	164	2.14

S/Cu	1.27	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	6722	7880	17.24
Rueda de Moldeo		24000	14200	15000	5.64
S en el conc. A planta de acido		23500	18358	19400	5.67
Oxígeno técnico en fusión		20500	15868	13926	12.24
Volumen gases de salida		27000	18199		
Capacidad del HLE		48000	27478		
%Enriquecimiento O2			56.65%	50.00%	11.73
Coeficiente de oxígeno			159	164	3.00

S/Cu	1.29	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	6640	7216	8.69
Rueda de Moldeo		24000	14149	12167	14.01
S en el conc. A planta de acido		23500	18685	19000	1.69
Oxígeno técnico en fusión		20500	16498	13959	15.39
Volumen gases de salida		27000	19595		
Capacidad del HLE		48000	27784		
%Enriquecimiento O2			54.89%	48.00%	12.55
Coeficiente de oxígeno			165	169	2.48

S/Cu	1.30	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxígeno técnico en conversión		9072	7412	8503	14.72
Rueda de Moldeo		24000	15980	15958	0.13
S en el conc. A planta de acido		23500	21205	22100	4.22
Oxígeno técnico en fusión		20500	18822	15397	18.20
Volumen gases de salida		27000	21741		
Capacidad del HLE		48000	34069		
%Enriquecimiento O2			56.14%	54.00%	3.81
Coeficiente de oxígeno			161	153	4.74

S/Cu	1.31	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6685	7895	18.09
Rueda de Moldeo		24000	13757	16083	16.91
S en el conc. A planta de acido		23500	18366	19300	5.08
Oxigeno técnico en fusión		20500	15976	13869	13.19
Volumen gases de salida		27000	18585		
Capacidad del HLE		48000	26859		
%Enriquecimiento O2			55.97%	50.00%	10.67
Coeficiente de oxigeno			163	165	1.28

S/Cu	1.32	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6258	7303	16.70
Rueda de Moldeo		24000	14093	7458	47.08
S en el conc. A planta de acido		23500	19062	19300	1.25
Oxigeno técnico en fusión		20500	17461	14235	18.48
Volumen gases de salida		27000	21008		
Capacidad del HLE		48000	30893		
%Enriquecimiento O2			54.14%	49.00%	9.50
Coeficiente de oxigeno			168	165	1.60

S/Cu	1.33	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6998	7388	5.58
Rueda de Moldeo		24000	14826	10958	26.09
S en el conc. A planta de acido		23500	20164	21000	4.15
Oxigeno técnico en fusión		20500	17930	16096	10.23
Volumen gases de salida		27000	20852		
Capacidad del HLE		48000	31857		
%Enriquecimiento O2			55.88%	50.00%	10.53
Coeficiente de oxigeno			163	175	7.47

S/Cu	1.34	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	7404	7773	4.98
Rueda de Moldeo		24000	15687	17333	10.50
S en el conc. A planta de acido		23500	21418	22400	4.58
Oxigeno técnico en fusión		20500	19072	17517	8.15
Volumen gases de salida		27000	22871		
Capacidad del HLE		48000	32803		
%Enriquecimiento O2			54.52%	51.00%	6.46
Coeficiente de oxigeno			166	173	4.47

S/Cu	1.35	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6431	6682	3.91
Rueda de Moldeo		24000	13905	15958	14.77
S en el conc. A planta de acido		23500	19143	20000	4.48
Oxigeno técnico en fusión		20500	17228	16246	5.70
Volumen gases de salida		27000	20859		
Capacidad del HLE		48000	29251		
%Enriquecimiento O2			54.10%	50.00%	7.57
Coeficiente de oxigeno			169	181	7.36

S/Cu	1.37	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6831	7711	12.87
Rueda de Moldeo		24000	14431	13000	9.91
S en el conc. A planta de acido		23500	20266	21000	3.62
Oxigeno técnico en fusión		20500	18218	15012	17.60
Volumen gases de salida		27000	21989		
Capacidad del HLE		48000	31300		
%Enriquecimiento O2			54.25%	51.00%	6.00
Coeficiente de oxigeno			168	158	5.90

S/Cu	1.41	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	6226	7545	21.18
Rueda de Moldeo		24000	13076	16375	25.23
S en el conc. A planta de acido		23500	18840	19700	4.56
Oxigeno técnico en fusión		20500	16968	14565	14.16
Volumen gases de salida		27000	20613		
Capacidad del HLE		48000	28866		
%Enriquecimiento O2			54.09%	48.00%	11.27
Coeficiente de oxigeno			170	165	2.79

S/Cu	1.43	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	5307	6230	17.38
Rueda de Moldeo		24000	11576	12250	5.82
S en el conc. A planta de acido		23500	16989	17900	5.36
Oxigeno técnico en fusión		20500	15588	13807	11.42
Volumen gases de salida		27000	19203		
Capacidad del HLE		48000	26561		
%Enriquecimiento O2			53.48%	46.00%	13.99
Coeficiente de oxigeno			173	170	1.91

S/Cu	1.47	Valores para alimentación de concentrado			%Error
		Max	Teórico	Real	
Oxigeno técnico en conversión		9072	5170	5869	13.54
Rueda de Moldeo		24000	11676	11000	5.79
S en el conc. A planta de acido		23500	17657	18000	1.94
Oxigeno técnico en fusión		20500	16562	13619	17.77
Volumen gases de salida		27000	21385		
Capacidad del HLE		48000	27763		
%Enriquecimiento O2			51.43%	49.00%	4.72
Coeficiente de oxigeno			179	165	7.98

ANEXO E

Tablas de comparación de alimentación de concentrado según restricción para confección de tablas de capacidad ociosa, fig. 5.10 – fig. 5.11 – fig. 5.12

