



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

TRADE OFF DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, PARA FUNDIR  
CONCENTRADOS SECOS VERSUS CONCENTRADOS HÚMEDOS

Tesis de grado

Para optar al título de Ingeniero civil en Metalurgia

Autor:

Nicolás Patricio Salcedo Bravo

Profesor guía:

Roberto Parada Araya

Santiago de Chile

2019



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

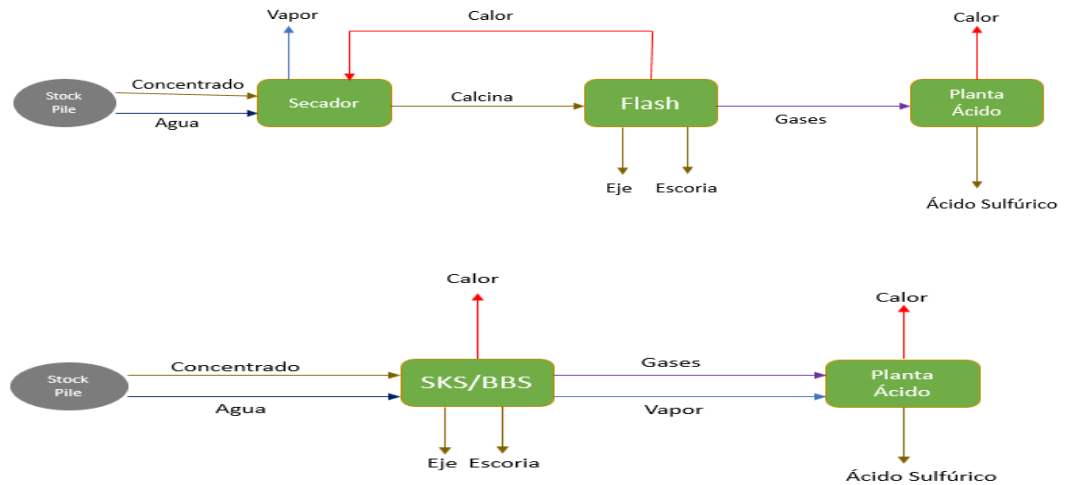
Escuela de Ciencias de la tierra

## RESUMEN

Se estudiará, evaluar y analizar el trade off de eficiencia energética de la implementación de la tecnología de fusión del Horno SKS/BBS en comparación a la tecnología de fusión flash. Para lo cual se utilizará como referencia de caso estudio a la fundición Chagres.

Mediante la utilización del programa computación Microsoft Excel, se realiza la modelación de dos circuitos de fundición distintos, y en relación a los flujos de energía y gases en cuestión, en el primero se utiliza la línea de fundición regular de Chagres, considerando secador de concentrados, Horno de Fusión Flash, caldera recuperadora de calor y Planta de ácido, frente a un circuito de fundición opcional integrando el horno de Fundición SKS/BBS, siendo omitido el proceso de secado de concentrados, ya que este horno entre sus particularidades permite la alimentación directa de concentrado húmedo.

En cada caso simulado, es considerado el flujo de gases y principalmente el vapor que en ellos circula, ya que este es el parámetro significativo para este análisis energético, ya que este debe ser acondicionado en la planta de gases para la posterior producción de ácido sulfúrico.



*Ilustración 1 Diagramas de flujo*

Producto de este análisis, se logró dimensionar el cómo se comporta una estructura normal de una planta de fundición frente a tratar concentrados húmedos en su línea de procesos regular mediante la implementación de un nuevo equipo, siendo detallado en la siguiente tabla.

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

*Tabla 1 Resumen de resultados*

	Disponibilidad para generar energía eléctrica (KWh)	Energía química recuperada en caldera (MJ/hora)	Energía necesaria en pta. de ácido/tonelada de concentrado alimentado (KWh)	Consumo de carga fría (tonelada/hora)
Conc. Seco (HFF)	9.826	33.375	37	1
Conc. Húmedo (SKS/BBS)	14.302	51.502	107	22

Tras realizado este análisis se logró determinar que el proceso de tratar concentrado húmedo requiere mayor consumo energético a nivel de planta de ácido, aun cuando este posee una mayor recuperación de energía en la caldera recuperadora, seria menos conveniente en etapas posteriores del proceso.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## Índice de contenido

INTRODUCCIÓN .....	10
CAPITULO I .....	12
1. Propuesta de tesis .....	12
2. Antecedentes Generales.....	12
2.1. Fusión.....	13
2.1.1. Horno fusión Flash Inco .....	13
2.1.2. Horno fusión flash Outokumpu .....	14
2.1.3. Horno de fundición SKS/BBS .....	14
2.1.4. Fundamentos del proceso de fusión .....	15
3. Fundición Chagres.....	17
3.1. Recepción y almacenamiento.....	18
3.2. Preparación de carga .....	19
3.3. Secado de la carga.....	19
3.4. Fusión.....	19
3.5. Conversión .....	21
3.6. Tratamiento de escorias .....	22
3.7. Refinación.....	23
3.8. Rueda de moldeo .....	23
3.9. Planta de acido.....	24



Universidad  
Andrés Bello

## UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

3.9.1. Etapa de conversión de $\text{SO}_2$ a $\text{SO}_3$ .....	25
3.9.2. Etapa de absorción en solución acida.....	25
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>26</b>
4. Balance de materia .....	26
4.1. Balance Horno Flash .....	26
4.1.1. Cobre en escorias .....	26
4.1.2. Azufre en escorias.....	27
4.1.3. Magnetita en el eje .....	27
4.1.4. Magnetita en escoria .....	27
4.1.5. Reacciones involucradas .....	27
5. Balance de energía .....	28
5.1. Balance energía Horno Flash .....	29
5.1.1. Calor asociado a la alimentación del horno Flash .....	29
5.1.2. Calor asociado a eje.....	30
5.1.3. Calor asociado a la escoria .....	30
5.1.4. Calor asociado a las reacciones químicas Horno Flash...	30
5.1.5. Calor asociado a perdidas.....	30
5.1.6. Calor asociado a combustibles hidrocarburos.....	31
5.1.7. Calor asociado a gases .....	31
5.2. Balance planta ácido .....	31
5.2.1. Balance energía etapa lavado de gases .....	31



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

5.2.2. Balance energía etapa conversión de SO <sub>2</sub> .....	32
5.2.3. Balance energía etapa absorción en solución ácida .....	33
6. Descripción del modelo.....	34
<b>CAPITULO III .....</b>	<b>35</b>
7. Simulaciones.....	35
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>45</b>
8. Análisis y discusión.....	45
9. Conclusiones .....	52
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
10. ANEXO .....	55



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

### Índice de tablas

Tabla 1 Resumen de resultados.....	4
Tabla 2 Parámetros operacionales.....	36
Tabla 3 Balance de energía secador.....	37
Tabla 4 Balance de energía H.F.F. ....	38
Tabla 5 Balance energía SKS/BBS .....	39
Tabla 6 Balance energía manejo de gases concentrado seco .....	40
Tabla 7 Balance energía manejo de gases concentrado húmedo.....	42





UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## Índice de figuras

Ilustración 1 Diagramas de flujo .....	3
Ilustración 2 Ubicación geográfica de Fundición Chagres.....	17
Ilustración 3 Diagrama de flujo fundición Chagres .....	18
Ilustración 4 Diagrama de flujo caso horno Flash.....	43
Ilustración 5 Diagrama de flujo caso SKS/BBS .....	44
Ilustración 6 Comparación de energía extraída en caldera .....	46
Ilustración 7 Comparación energía a extraer en Planta de ácido .....	47
Ilustración 8 Disponibilidad de energía eléctrica .....	49
Ilustración 9 Energía eléctrica necesaria en planta de ácido .....	50
Ilustración 10 Consumo de carga fría.....	51



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de evaluar y analizar la tecnología innovadora del horno de fundición SKS/BBS, frente a una planta de fundición típica de Chile, como lo es Fundición Chagres, específicamente en relación a la energía que es utilizada y producida en sus procesos regulares, se realiza el siguiente trabajo de tesis. Es de relevancia mencionar que los datos utilizados de fundición Chagres, son empleados con fines académicos y no representan a su negocio operacional.

La tecnología China del horno SKS/BBS, permite ser alimentado directamente con concentrado húmedo, omitiendo el secador de concentrado en el proceso, y la energía recuperada mediante la caldera, puede ser utilizada con otros fines, por ejemplo, producción de energía eléctrica, a diferencia de un circuito de horno Flash donde la mayoría del vapor (energía) recuperado por la caldera es utilizada para el secado de concentrado. Motivo por el cual, se modelaron ambos circuitos de fundición, considerando los equipos en los cuales hay una variación en la cantidad de energía extraída y vapor producido, junto con el manejo y acondicionamiento de gases en la planta de ácido.

Fundición Chagres propiedad de Anglo American, actualmente funde concentrado de cobre de forma continua en su proceso, mediante el empleo de un secador de vapor indirecto, para eliminar la humedad en el concentrado, un Horno de fusión Flash del cual es obtenida la mata o eje, siendo esta enviada al proceso de conversión, produciendo cobre blíster, siendo tratado posteriormente en el proceso de refinación a fuego, obteniendo cobre anódico el cual consta de una pureza aproximada del 99,6 %, posteriormente este es moldeado en su forma final como ánodos. Además de este cobre anódico, se produce ácido sulfúrico de un 98,5 % de pureza aproximada, mediante el tratamiento y posterior conversión



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

de los gases provenientes de los nodos de fusión y conversión en su planta de ácido.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## CAPITULO I

### 1. Propuesta de tesis

Se realizará la propuesta de tesis en base a objetivos concretos, alcanzables y delimitados, basándose en el cometido principal del proyecto.

#### Objetivo General

- Analizar el trade off de eficiencia energética, para fundir concentrados secos versus concentrados húmedos.

#### Objetivos Específicos

- Evaluar balances de masa y energía para los circuitos en estudio.
- Evaluar eficiencia energética en el circuito de secado, horno de fundición Flash y planta de ácido
- Evaluar eficiencia energética en circuito de horno SKS y planta de ácido
- Análisis comparativo entre ambos casos en estudio

### 2. Antecedentes Generales

El cobre es un metal encontrado en la corteza de la tierra en minerales del tipo óxido o sulfuro, además se encuentra mezclado con un sin fin de otros minerales de desecho llamados ganga.

Se prevé que la producción de cobre fino en Chile, para los próximos años se base en la explotación de menas sulfuradas de este metal, particularmente yacimientos de Calcopirita siendo el proceso de fusión la principal vía para la refinación de este mineral (Chile, 2015).



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Para obtener un producto de cobre de alta pureza y calidad a partir de un concentrado de cobre se debe procesar este con la finalidad de lograr separar el metal de interés, el cobre del resto de los minerales presentes en el concentrado, para lo cual es empleado el proceso de fusión.

### 2.1. Fusión

En la etapa de fusión el objetivo es obtener dos fases líquidas inmiscibles entre sí, la mata o eje y la escoria, donde la mata es la fase metálica, de mayor densidad que la fase escoria y en la cual este contenido el cobre junto con hierro y azufre, en la escoria se encuentran los elementos normalmente óxidos de bajo interés económico, para reducir las pérdidas de cobre en la escoria, es necesario realizar un tratamiento a escorias. En este proceso se busca recuperar la mayor cantidad de energía posible mediante la utilización de una caldera recuperadora de calor, con la finalidad de que esta energía recuperada sea empleada con otros fines, como lo es la generación de vapor en el secador de concentrado, equipo de tratamiento previo del concentrado, antes de ser alimentado al Horno Flash, además de generación de energía eléctrica.

#### 2.1.1. Horno fusión Flash Inco

Es un equipo de distribución rectangular alimentado con concentrado seco y oxígeno comercial, los flujos alimentados reaccionan al interior del equipo, produciendo sino la totalidad una gran parte de la energía usada para fundir la carga, ya que es una reacción del tipo exotérmica. Durante el proceso es formado el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), siendo colectado por la campana para gases, mientras que la carga cae al baño donde es separada en formando las fases mata y escoria. El gas producido ( $\text{SO}_2$ ), normalmente presenta una concentración aproximada del 80%, siendo utilizado posteriormente para la producción de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Las principales características de este reactor son sus bajos costos energéticos y operacionales para lograr la fundición de la carga, bajo nivel de impacto ambiental, ya que los gases producidos por el proceso, son confinados en un flujo, además de una alta concentración de  $\text{SO}_2$ .

#### 2.1.2. Horno fusión flash Outokumpu

Equipo diseñado a mediados del siglo XX en Finlandia, producto de la escasez de combustible debido al culmino de la segunda guerra mundial, siendo el combustible el principal elemento para los procesos de fundición de la época.

El horno cumple con un eficiente uso de la energía liberada en el proceso por la oxidación parcial del concentrado alimentado, además de un efectivo manejo de los gases producidos.

Básicamente consiste en la dispersión y oxidación de las partículas del concentrado seco mediante la adición de una corriente de aire enriquecido con oxígeno mediante un sistema de cámaras y ductos que conforman el reactor.

#### 2.1.3. Horno de fundición SKS/BBS

Equipo vanguardista diseñado en China, el cual busca aumentar la eficiencia energética a nivel de fundiciones, cumpliendo a la vez con las más estrictas restricciones medio ambientales. (Kapusta, 2015)

La tecnología revolucionaria del horno SKS, permite la alimentación de concentrado húmedo, además de un sistema de inyección de oxígeno directo en el baño mediante lanzas o inyectores de oxígeno. Permitiendo un mayor enriquecimiento de oxígeno, junto con un mayor control de la distribución de este en el baño, al ser inyectado directamente en este, además permite una baja



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

oxidación de cobre en la escoria, además de disminuir la formación de magnetita en el baño. (Kapusta, 2015)

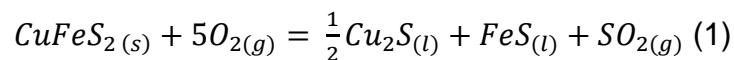
#### 2.1.4. Fundamentos del proceso de fusión

En el proceso las materias primas alimentadas son

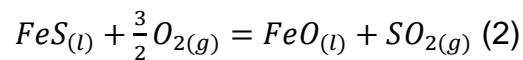
- Concentrado seco
- Fundente (silicio,  $\text{SiO}_2$ )
- Aire enriquecido
- Combustibles de hidrocarburos

Las reacciones que dominan el proceso de fundición son altamente exotérmicas, además de una cinética de reacción elevada, produciendo el calor necesario para fundir las especies minerales presentes en el concentrado.

Las reacciones de oxidación de un concentrado típico de calcopirita, se pueden representar según la siguiente expresión:



$$\Delta H_{298} = -0,53 \frac{\text{Mj}}{\text{Kg}} \text{CuFeS}_2$$



$$\Delta H_{298} = -5,33 \frac{\text{Mj}}{\text{Kg}} \text{FeS}$$

En el proceso a 1375 K se forma forman dos fases inmiscibles entre sí, la fase metálica llamada mata que está formada por  $\text{Cu}_2\text{S}$  y  $\text{FeS}$  presenta una



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

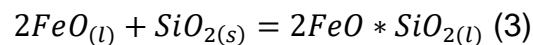
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

densidad mayor que la fase escoria, por lo cual esta sedimenta en la zona inferior del horno Flash.

El  $\text{Cu}_2\text{S}$  formado en este proceso, corresponde a la fase metálica o mata, la cual aparentemente no se oxida en el reactor debido a que la afinidad de Fe es mayor con el oxígeno que la del Cu con oxígeno, por ello preferentemente es oxidado el FeS y la formación de  $\text{Cu}_2\text{O}$  es reducida por el FeS, equilibrando la reacción a  $\text{Cu}_2\text{S}$ , exceptuado una pequeña fracción la cual permanece como oxido siendo ocluida en la escoria.

El FeO formado en la reacción (2), se acompleja con la adición del fundente silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el cual además de disminuir la temperatura de fusión de la escoria, forma escoria líquida inmiscible con la mata y densidad menor.



La composición típica de las escorias producidas en el proceso contiene valores de  $\text{SiO}_2$  cercanos a 26%-36% p/p, variando esta concentración según los requerimientos operacionales. En el horno Flash son generados gases producto de las reacciones que ocurren en el reactor,  $\text{SO}_2$  generado por la reacción (1) y (2),  $\text{N}_2$  el cual es alimentado conjuntamente con el aire enriquecido, si es utilizado algún combustible fósil como complemento térmico producirá  $\text{CO}_2$  y vapor de agua, estos gases presentan temperaturas que bordean los 1650 K.

El parámetro operacional más importante dentro del proceso de fusión, es la ley de la mata o eje, siendo esta el porcentaje en peso de cobre presente en esta fase, cuantificando el nivel de oxidación del concentrado. El rango de los valores de las leyes del eje operacionalmente bordea valores del 40%-65% de Cu, se logra variar la ley del eje variando la cantidad de oxígeno alimentado al



proceso Flash, a mayor cantidad de oxígeno ingresado mayores serán los valores de la ley del eje, aumentando la energía en su interior debido a una mayor formación de  $\text{SO}_2$ .

### 3. Fundición Chagres

Fundición Chagres está ubicada a 100 kilómetros al norte de Santiago, en la región de Valparaíso, en la provincia de San Felipe, comuna de Catemu. Actualmente la capa de producción de fundición Chagres es de 138.000 Ktmf de cobre anódico y 500 Kton de ácido sulfúrico (AngloAmerican,2017).



*Ilustración 2 Ubicación geográfica de Fundición Chagres*

Actualmente fundición Chagres procesa concentrados principalmente provenientes de las divisiones El Soldado y Los Bronces, ambas propiedad de AngloAmerican. Los cuales en su promedio contienen 30% de cobre, 31% de azufre, 22% de hierro, 10% de sílice y elementos menores en su fracción faltante. En el proceso de fundición es eliminado el hierro y el azufre contenidos en el



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

concentrado, para obtener como producto cobre anódico y ácido sulfúrico como subproducto. El proceso de fundición es realizado mediante horno flash, tecnología la cual destaca por sus bajas emisiones, lo que hace de esta fundición líder en materia medio ambiental a nivel nacional.

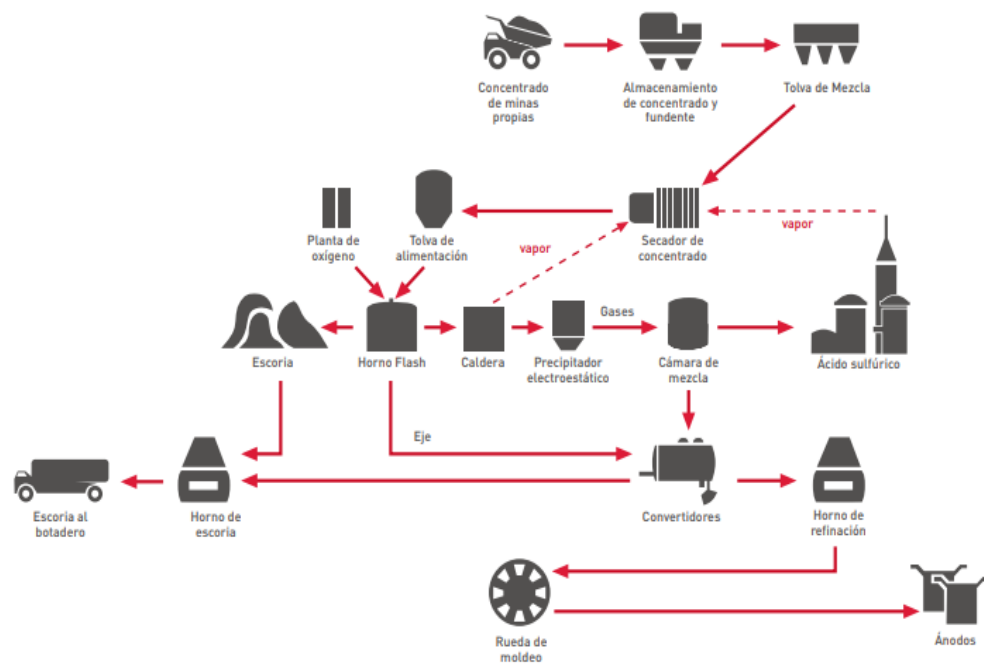


Ilustración 3 Diagrama de flujo fundición Chagres

Fuente: (AngloAmerican, 2009)

Las principales instalaciones de fundición Chagres se resumen a continuación.

### 3.1. Recepción y almacenamiento

El concentrado es traído hasta la fundición mediante camiones, los cuales son pesados y descargados en la tolva de recepción, luego son transportados



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

hasta el edificio de almacenamiento. En la parte superior de este se ubica el carro distribuidor del concentrado, que permite el almacenamiento de distintas pilas del mineral, seis en total de las cuales 5 son para la alimentación del concentrado al proceso y la restante para la fundente sílice, con una capacidad aproximada de 2000 toneladas por pila.

### 3.2. Preparación de carga

Ubicado en el edificio de mezcla, posee un total de 4 silos dosificadores, dos de los cuales tienen una capacidad de 500 toneladas para el almacenamiento de concentrado, una tolva de 300 toneladas para el circulante de la fusión y una tolva de 175 toneladas para la sílice, el llenado de estas tolvas se realiza mediante una correa transportadora. El circulante de la fundición está compuesto por polvos metalúrgicos recuperados en las calderas y precipitadores electrostáticos.

### 3.3. Secado de la carga

La fundición Chagres consta de un secador de vapor indirecto, con una capacidad de 120 TPH, el cual utiliza vapor generado mediante la caldera recuperado de energía del horno Flash.

### 3.4. Fusión

El horno Flash está compuesto por una torre de reacción en forma cónica, de 4.2 metros de diámetro superior, 4.63 metros de diámetro inferior y 5.5 metros de altura. Desde su parte superior céntrica se encuentra el quemador de concentrado junto a dos quemadores de oxígeno petróleo como soporte térmico en caso de ser necesario para la operación. La torre de reacción se refrigera mediante agua, la cual es distribuida desde un anillo superior, donde escurre por la una cortina sobre el recubrimiento de acero, siendo colectada posteriormente



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

por una canaleta, donde es recolectada en un estanque, el sistema de refrigeración es del tipo aspersión o rocío.

El settler se encuentra formado por un crisol de medidas 1.9X17,9X 5.3 metros, sobre el cual existe una bóveda suspendida. La bóveda está formada por ladrillos refractarios de cromo-magnesita, suspendidos en una estructura metálica, el piso y paredes está conformado por una carcasa de planchas de acero revestido con ladrillos refractarios de distintas composiciones; cromo-magnesita, alúmina, entre otros, dispuesto en forma de arco invertido. El settler consta de planchas refrigeradas de cobre, adheridos a los ladrillos refractarios en los muros y en la zona superior de la torre de reacción. Para la sangría de la mata o eje posee 6 placas refrigeradas y para sangrado de escoria posee otras 3 placas refrigeradas, unidas al material refractario. Junto con esto posee 3 quemadores a petróleo para la bóveda y 5 quemadores a petróleo para las paredes, con la funcionalidad de mantener el baño fundido, sirviendo de soporte térmico adicional al sistema.

La zona de salida de los gases producidos en el proceso es denominada "up take", siendo esta la parte superior del reactor, donde los gases son evacuados verticalmente a la caldera recuperadora de calor. En caso de la detención del horno se dispone de una salida de emergencia para los gases llamada tornamesa, permitiendo evacuar directamente hacia la chimenea, estructuralmente está formado por una carcasa de acero revestida internamente por ladrillos de material refractario.

El eje o mata producida por el horno es retirada en ollas de 4 m<sup>3</sup> y es enviada mediante la utilización de grúas hacia los convertidores Peirce-Smith (CPS), siendo ingresada a la etapa de soplado a escorias, la escoria producida



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

por el horno Flash, es derivada a los hornos de limpieza de escorias, mediante canaletas conectando el HFF (horno de fusión Flash) con el HLE (horno de limpieza de escorias).

### 3.5. Conversión

Fundición Chagres consta de 3 equipos de 10' x 21,5' operando en ciertos periodos del año con los 3 equipo en caliente y en otros periodos solo con 2 de ellos en caliente. Se opera con 2 convertidores Peirce-Smith (CPS) en caliente cuando el tercer CPS se encuentra en mantenimiento o detenido, con la finalidad de no superar los márgenes de emisiones de gases, siendo estos gases detectaos por estaciones de monitoreo ubicadas cercanas a la fundición.

No obstante, la planta de ácido según su capacidad permite la utilización simultaneo de 2 CPS.

Los CPS reciben distintos tipos de materiales sólidos y líquidos, dependiente de la etapa de soplado en la cual se encuentre. En la etapa de soplado a escoria los CPS reciben el eje del FSF y el plateado desde los HLE, además en esta etapa es alimentada la escoria oxidada de la etapa de soplado a cobre desde otro CPS y parte de la carga fría generada en la nave, la cual es rica en cobre. En la etapa de soplado a cobre los CPS reciben la escoria del refinó proveniente desde los hornos de ánodos (HA's) y el restante del total de la carga fría generada en la nave fundición.

En el proceso de conversión se generan tres distintos productos; la escoria fayalita resultante de la etapa de soplado a escorias, con un contenido inferior al 6% de cobre; una escoria oxidada rica en cobre, producto de la etapa de soplado



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

a cobre; y cobre blíster con una concentración de cobre de 97%, el cual se denomina cobre sucio, y de 99,2%, denominado cobre limpio.

La escoria producida en la etapa de soplado a escorias es retirada en ollas de 4 m<sup>3</sup>, es transportada por grúas hacia el HLE, que se encuentra en la etapa de alimentación de escorias. La escoria oxidada generada en el proceso de soplado a cobre se retira en ollas de las mismas dimensiones y se alimenta al CPS, que se encuentre en la etapa de soplado a escorias. El producto final cobre blíster producido en el proceso de conversión es extraído en ollas de 2,5 m<sup>3</sup>, que equivale a aproximadamente a 12 toneladas de cobre, luego es transportado hacia los hornos de ánodos (HA's).

### 3.6. Tratamiento de escorias

Fundición Chagres consta de 2 hornos de limpieza de escorias (HLE) de medidas 13'X 26', los cuales procesan en promedio 1000 toneladas de escorias en ciclos de 60-70 toneladas. Estos hornos reciben las escorias provenientes del FSF y los CPS (escorias provenientes de la etapa de soplado a escorias), realizando una reducción y sedimentación de estas escorias, logrando entregar un plateado de ley aproximada del 60% de Cu y una escoria destinada a botadero con un máximo de cobre del 1.2%.

Para la reducción de las escorias, se utilizan elementos correspondientes a la familia de los hidrocarburos, normalmente petróleo Enap6 y/o Diesel.

El plateado producido en los HLE se retira en ollas de 4 m<sup>3</sup>, siendo transportado hacia los CPS, alimentado a la etapa de soplado a escorias, mientras que las escorias producidas en estos hornos son enviadas a botadero mediante ollas de 14 m<sup>3</sup> transportadas en camiones Kress.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Los gases producidos en este proceso son extraídos mediante campanas para gases, y conducidos mediante ductos hasta un incinerador, donde son quemados los residuos producidos por la combustión incompleta por parte del gas en la etapa de reducción. Finalmente, la salida de gases del incinerador se encuentra conectado al ducto de salida de emergencia del HFF, siendo descargados en la chimenea caliente.

### 3.7. Refinación

Fundición Chagres cuenta con 2 hornos de ánodos (HA's) de dimensiones 13' X 23' del tipo basculante, para la realización del proceso de refinación a fuego (RAF) de cobre blíster. Dichos hornos son alimentados con el cobre blíster producido en la etapa de conversión (CPS), 3 cargas de convertidores en el interior del horno, luego se somete al proceso de refinación a fuego, proceso el cual es llevado a cabo en dos etapas consecutivas, primero la etapa de oxidación, en la cual se inyecta aire al horno durante el tiempo necesario para eliminar el azufre disuelto en el ánodo, hasta una concentración de azufre de 40 ppm, y otra etapa reductora en la cual se inyecta petróleo Enap-6 como agente reductor más aire comprimido como reformador, hasta la eliminación del oxígeno disuelto en ánodo.

El cobre anódico producido en esta etapa, es descargado por una canaleta hacia la rueda de moldeo, mientras que las escorias producidas en la etapa de oxidación son enviadas a un CPS el cual se encuentre en la etapa de soplado a cobre.

### 3.8. Rueda de moldeo

La planta opera con una rueda de moldeo que consta de 16 moldes, con una tasa de producción asegurada de 40 TPH y 36 TPH en promedio, los ánodos



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

producidos varían su peso entre 278 Kg y 420 Kg, según las especificaciones de cada cliente.

### 3.9. Planta de ácido

Operacionalmente los gases generados por HFF son impulsados mediante ventiladores, hacia la cámara de mezcla de gases, a un ritmo de 20000 – 25000 Nm<sup>3</sup>/h, con un contenido de SO<sub>2</sub> que varía entre 40% y 50%, a una temperatura de 300 °C a 400 °C. Los gases provenientes del proceso de conversión, son impulsados hacia la cámara de mezcla por ventiladores, con flujos de gases que varían desde 60000 a 90000 Nm<sup>3</sup>/h, dependiendo de la cantidad de CPS en operación, los gases de conversión contienen entre un 6% y 8% de SO<sub>2</sub>, llegando a la cámara de mezcla de gases a temperaturas que bordean los 250 °C a 320 °C.

Los gases son acondicionados y limpiados en un tren de limpieza, que funciona en serie, realizando el proceso en distintos equipos, como lo son; la torre de humidificación, el lavador Venturi o Venturi Scrubber y la torre de enfriamiento.

El proceso se inicia al introducir el gas en la torre de humidificación, en donde se contacta en contracorriente el gas con un ácido diluido, eliminando y condensado la mayoría de las impurezas, además de disminuir la temperatura del propio gas. El gas es enviado posteriormente al lavador Venturi, donde al acelerar la velocidad del flujo gaseoso, se logra la sedimentación y eliminación de impurezas tales como, arenisco, u otros polvos.

Luego este gas es redirigido a la torre de enfriamiento, se contacta en contracorriente con ácido sulfúrico, con la finalidad la neblina acida, vapor de agua, compuestos clorados y fluorados, producto de esto el gas disminuye su temperatura a 27 °C aproximadamente.





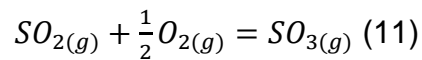
UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

### 3.9.1. Etapa de conversión de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>

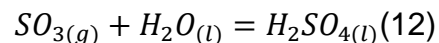
Esta etapa es llevada a cabo en un convertidor catalítico, el que contiene un agente catalizador, como por ejemplo el pentóxido de Vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), cuyo propósito es propiciar la transformación del SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>, según lo explica la siguiente expresión.



La reacción de transformación del SO<sub>2</sub>, es una reacción altamente exotérmica por lo que el calor producido en el proceso debe ser retirado del sistema, dirigiendo el flujo gaseoso a través de intercambiadores de calor, siendo retornado al segundo paso del convertidor.

### 3.9.2. Etapa de absorción en solución acida

El SO<sub>3</sub>, es absorbido en torres de absorción contactando el gas con un ácido sulfúrico de concentración 98%, dando como producto un ácido más concentrado 98,5% aproximadamente. La reacción del SO<sub>3</sub> más agua es altamente exotérmica, produciendo una alta cantidad de energía. El proceso está dominado según la siguiente expresión.





UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## CAPITULO II

### 4. Balance de materia

Primeramente, para realizar de forma efectiva el balance de energía en los distintos reactores es imperante, realizar antes el balance de materia con el objeto de determinar la masa de fase metálica y fase escorias producidas para una determinada alimentación.

#### 4.1. Balance Horno Flash

Se considera que la alimentación del horno Flash, está compuesta por calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), fundente sílice ( $\text{SiO}_2$ ) e impurezas asociadas al fundente, siendo alimentados estos a temperatura ambiente de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

El contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en la escoria esta dado por la alimentación fijada para obtener una escoria de mínima viscosidad además de la disminución del punto de fusión de la escoria.

El contenido de  $\text{FeO}$  en la escoria puede ser determinado por balances de masa en función de  $\text{Fe}$  y  $\text{Cu}$ , junto con esto se asume que la totalidad del  $\text{Fe}$  y  $\text{Cu}$  alimentado al proceso es distribuida entre el eje y escoria.

Según la literatura se ha logrado establecer una relación entre un elemento en el eje y/o escoria en función de la ley del eje.

##### 4.1.1. Cobre en escorias

Principalmente la escoria producida en HFF, es un producto liquido con compuesto de cobre y hierro, como lo son  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{SiO}_2$ , donde



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

el cobre se encuentra en la escoria en proporciones  $\text{Cu}_2\text{O}$  con un 80% y el restante en forma de  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Donde la masa de cobre presente en la escoria está determinada por la siguiente relación.

$$\%Cu(\text{escorias}) = 0.0039 * (\text{Ley de eje})^2 - 0.4537 * (\text{Ley de eje}) + 14.7794 \quad (13)$$

#### 4.1.2. Azufre en escorias

El azufre en la escoria principalmente está asociada al cobre disuelto en estas como  $\text{Cu}_2\text{S}$ , y puede ser expresada según la siguiente expresión.

$$\%S(\text{escorias}) = 0.0006 * (\text{Ley de eje})^2 - 0.1057 * (\text{Ley de eje}) + 5.0888 \quad (14)$$

#### 4.1.3. Magnetita en el eje

La magnetita contenida en el eje puede ser determinada por la siguiente expresión.

$$\%Fe_3O_4(\text{eje}) = 0.0036 * (\text{Ley de eje})^2 - 0.6345 * (\text{Ley de eje}) + 29.8507 \quad (15)$$

#### 4.1.4. Magnetita en escoria

La magnetita contenida en la escoria, está dada por la siguiente expresión.

$$\%Fe_3O_4(\text{escorias}) = 0.0004 * (\text{Ley de eje})^2 - 0.2215 * (\text{Ley de eje}) - 0.7486 \quad (16)$$

#### 4.1.5. Reacciones involucradas

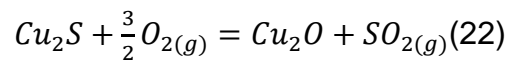
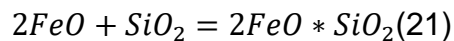
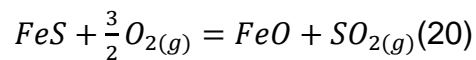
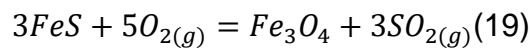
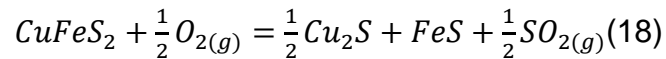
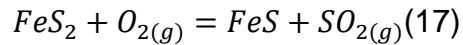
Las reacciones químicas que ocurren en el interior del horno Flash están dadas por las siguientes expresiones.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra



#### 5. Balance de energía

El balance de calor es realizado considerando la energía térmica involucrada en el sistema. El balance de calor para el sistema en estudio está determinado por.

$$Qt = Qe - Qs + Qg + Qc + Qp(24)$$

Donde  $Qt$ , es el calor total del sistema,  $Qe$  es el calor ingresado al sistema,  $Qs$  es el calor sale,  $Qg$  es el calor generado por las reacciones químicas involucradas,  $Qc$  es el calor consumido por el sistema y  $Qp$  es el calor atribuido a las pérdidas del sistema.

Para el estudio termodinámico del sistema, se considera este en un estado estacionario, por lo cual la expresión (24), queda de la siguiente manera.

$$Qs = Qe + Qg + Qc + Qp(25)$$

Donde a volumen constante.

$$\Delta H = Q = n * Cv * \Delta T(26)$$



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Siendo  $m$ , la masa ingresada al sistema,  $C_p$  capacidad calorífica a presión constante y  $\Delta T$  es la variación de temperatura.

### 5.1. Balance energía Horno Flash

Para realizar el balance de energía en el HFF, es necesario definir las entalpías que intervienen en el sistema, considerando una temperatura inicial de 25 °C.

#### 5.1.1. Calor asociado a la alimentación del horno Flash

La alimentación a HFF está conformada por el concentrado y polvos recirculados, el calor con lo que estos ingresan al horno es debido a la absorción de este en los secadores para el concentrado y precipitadores electrostáticos para los polvos recirculados.

La temperatura con la que es ingresada la alimentación es cercana a 373 K.

Para la realización del balance se considera una composición de la alimentación de la siguiente manera:

- Calcopirita ( $\text{CuFe}_2\text{S}$ )
- Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )
- Pirita ( $\text{FeS}_2$ )
- Sílice ( $\text{SiO}_2$ )

Según lo dicho anteriormente se logra obtener la siguiente expresión para determinar el calor sensible asociado a la alimentación.

$$\Delta H_1 = \int_{T_i}^{298} m * C_p(\text{alimentación}) * dT(27)$$



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

#### 5.1.2. Calor asociado a eje

Considerando que el eje este compuesto por  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{FeS}$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a una temperatura de  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , se obtiene el calor sensible del eje según la siguiente expresión.

$$\Delta H_2 = \int_{298}^{1573} m * Cp(eje) * dT + \Delta H_f(eje)(28)$$

#### 5.1.3. Calor asociado a la escoria

Se considera que la escoria proveniente del HFF está constituida por  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $2\text{FeO} * \text{SiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  libre, para una temperatura de salida de  $1260\text{ }^\circ\text{C}$ , se obtiene la siguiente expresión que indica su calor sensible.

$$\Delta H_3 = \int_{298}^{1533} m * Cp(escoria) * dT + \Delta H_f(escoria)(29)$$

#### 5.1.4. Calor asociado a las reacciones químicas Horno Flash

Basándose en las reacciones anteriormente mencionadas, el calor asociado a estas es determinado mediante las entalpias de formación de cada reacción.

$$\Sigma \Delta H_R = \text{Suma de entalpias de reaccion a } 298\text{ K}(30)$$

#### 5.1.5. Calor asociado a perdidas

Estas pérdidas están atribuidas al calor que es retirado por los métodos de refrigeración del horno, tanto de chaquetas como por spray, más las perdidas debidas debido a la radicación y convección mediante las paredes del reactor.

Estas pérdidas son de  $15000\text{ MJ/h}$



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

$$\Delta H_{perdidas} = 15000 \frac{MJoule}{h} \quad (31)$$

#### 5.1.6. Calor asociado a combustibles hidrocarburos

Para determinar  $\Delta H$  (hidrocarburos), se debe contemplar el poder calorífico del petróleo que es de 37026 KJ/litro, además de que este calor se ira en los gases producto de la combustión de este.

#### 5.1.7. Calor asociado a gases

El calor asociado a los gases  $\Delta H_4$  esta dado según la siguiente expresión

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_{perdidas} + \Sigma \Delta H_R = 0 \quad (32)$$

### 5.2. Balance planta ácido

#### 5.2.1. Balance energía etapa lavado de gases

- Calor que ingresa en el sistema

Es el calor asociado a los gases que son producidos en la etapa de conversión y los gases provenientes del precipitador electrostático, dada según la siguiente expresión.

$$\Delta H_1 = \int_{T_f}^{298} m * Cp(gases) * dT \quad (46)$$

- Calor generado la etapa de lavado de gases

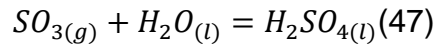
Este calor  $\Delta H_R$  es generado al contactar el gas con acido diluido, el  $SO_3$  presente en el flujo reacciona al entrar en contacto con agua, formando ácido sulfúrico, según lo explica la siguiente reacción de formación.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra



Para la obtención de este calor, se debe conocer la concentración del  $SO_2$  antes de ingresar a la etapa de lavado, y la concentración de este al salir de esta etapa, siendo la diferencia entre la entrada y a salida, la masa que fue consumida para la formación de ácido sulfúrico.

- Calor que sale de la etapa de lavado de gases

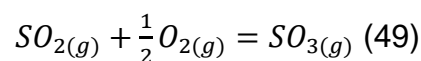
Para determinar este valor, se debe suponer que en el sistema no hay pérdidas y que el calor aportado por los gases, más el calor generado por la producción de ácido sulfúrico es igual al calor asociado al agua de refrigeración utilizada en la etapa, quedando de siguiente manera.

$$\Delta H_2 = \Delta H_1 + \Delta H_R = \int_{T_f}^{298} m * Cp(gases) * dT + \Delta H_R \quad (48)$$

### 5.2.2. Balance energía etapa conversión de $SO_2$

- Calor que ingresa a la etapa de conversión

El calor que ingresa en esta etapa es determinado por la reacción de conversión del  $SO_2$  a  $SO_3$ , se debe determinar la composición del gas junto con la eficiencia de conversión, según la siguiente expresión.



- Calor que sale en la etapa de conversión
  - Calor en el vapor generado en la caldera





UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

El vapor es generado gracias a la refrigeración de los gases en esta etapa. El calor del vapor puede ser calculado con los datos de flujos, temperatura y presión de salida de la caldera de la planta de ácido, siendo expresada por.

$$\Delta H_1 = \text{Masa vapor producido} * \Delta h_{fg} \quad (50)$$

$$\Delta h_{fg} = h_g - h_f \quad (51)$$

Donde  $h_f$  es la entalpia de entrada de agua que alimenta la caldera y  $h_g$  es la entalpia de salida del vapor generado.

➤ Calor en agua de refrigeración en etapa de conversión de gas

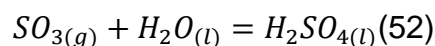
Se supone que no hay perdidas en el sistema, además que la temperatura con la que los gases abandonan esta etapa es de 25 °C, lo cual permite calcular el calor mediante la siguiente expresión.

$$\Delta H_2 = \Delta H_R - \Delta H_1 \quad (51)$$

### 5.2.3. Balance energía etapa absorción en solución ácida

- Calor producido en la etapa de conversión de gases

En esta etapa la formación de  $H_2SO_4$  es exotérmica por lo cual es producido calor  $\Delta H_R$ , según la siguiente reacción,



- Calor que sale en la etapa de absorción de gases



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

➤ Calor en los gases liberados al ambiente

Este calor se logra determinar conociendo el flujo de gases hacia el medio ambiente y a la temperatura que estos son liberados, según registros esos valores son 120000 NM<sup>3</sup>/h y 180 °C, siendo expresada mediante la siguiente expresión.

$$\Delta H_1 = \int_{453}^{298} m * Cp(gases) * dT(53)$$

➤ Calor en el agua de refrigeración

Relacionado al calor generado a la absorción del SO<sub>3</sub> en solución acida para formar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, este calor se logra determinar mediante la siguiente expresión y suponiendo que no hay pérdidas en el sistema.

$$\Delta H_2 = \Delta H_R - \Delta H_1 (54)$$

## 6. Descripción del modelo

Se utilizará el programa computacional de Microsoft Excel, para realizar, validar y resolver los balances de masas y energías, para la correcta simulación del caso en estudio.

Con la finalidad de reflejar los flujos de energía en cada equipo y el cómo estos cambian al variar los parámetros operacionales que son considerados para el desarrollo del caso de estudio.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Para la construcción de los balances de masa y energía, junto con los diagramas de flujo al momento de analizar el fundir concentrados secos versus concentrados húmedos, se tomaron algunas consideraciones.

- Para realizar el balance de fundir concentrado seco, se utilizó una típica estructura de una fundición, como Chagres, es decir que consta de secador de concentrado, horno de fusión Flash, caldera recuperadora de calor, y planta de ácido.
- Para confeccionar el balance en la situación de fundir concentrados húmedos, se cambia la estructura del nodo de fundición, partiendo este por un horno de fundición SKS, caldera recuperadora de calor, y planta de ácido

Una vez teniendo en cuenta estas consideraciones, se procede al diseño y confección del diagrama de flujo general para cada caso en estudio, considerando los parámetros operacionales de cada equipo en estudio, junto con sus flujos de energía.

### CAPITULO III

#### 7. Simulaciones

Para la realización de los balances de energía y masa, se considera la composición típica de un concentrado de cobre, como lo ejemplifica la siguiente tabla.



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

*Tabla 2 Parámetros operacionales*

Masa húmeda alimentada TPH	65
Análisis	%
Cu	33
Fe	26
S	31
Otros	5
Humedad	10
Mineralogía	%
CuFeS <sub>2</sub>	82
Cu <sub>2</sub> S	6
FeS <sub>2</sub>	2

Una vez establecidos los parámetros de alimentación para el sistema, se comienza con la modelación del primer equipo en estudio, el cual es el secador de concentrado a vapor, para el cual se obtuvo el siguiente balance.

*Tabla 3 Balance de energía secador*

	Cantidad	Temperatura	Energía total
Entrada	Kg/h/(Nm <sup>3</sup> /h)	°C	MJ/h
Concentrado	58500,0	20,0	0,0
Aire de arrastre	(6600)	25,0	0,0
Vapor	9568	212,0	26876,6
Agua en conc.	6500	20,0	0,0
			26876,6
<b>Salida</b>			
Concentrado seco	58500	120,0	2527,2
Vahos	(6600)	120,0	95,5
Evaporación	6370	120,0	16529,4
Condensado	9568	212,0	7465,2
Agua residual en conc.	130	120,0	54,4
Perdidas			205,0
			26876,6

De esta misma manera se procede a la realización del balance para el horno de fusión Flash (H.F.F.), teniendo en cuenta los parámetros operacionales considerados para este, como son algunos, ley de eje en escorias, enriquecimiento de oxígeno, etc.

*Tabla 4 Balance de energía H.F.F.*

Balance de energía Flash	Q
<b>Entrada</b>	<b>Mj/h</b>
Concentrado	127484
Carga fría	-709
	126775
<b>Salida</b>	
Eje	24138
Escoria	22563
Gases	65074
Perdidas	5000
Agua de Refrigerado	10000
	126775

De la misma manera se realiza el balance de energía para el caso de fundir concentrados húmedos, pero en este balance se elimina el secador de concentrado, y se reemplaza el horno de fusión Flash por el horno de fundición SKS.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

*Tabla 5 Balance energía SKS/BBS*

Balance de energía SKS/BBS	Q
<b>Entrada</b>	<b>Mj/h</b>
Concentrado	150859
Carga Fría	-12764
	138094
<b>Salida</b>	
Eje	17670
Escoria	25261
Gases	53432
Vaporización	16731
Perdidas	10000
Agua de Refrigerado	15000
	138094

Para la realización de la simulación y/o balances necesarios para la planta de ácido, solamente son considerados los equipos en los cuales es acondicionado el antes del proceso de conversión catalítica de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  y las torres de absorción posterior a este, debido a que en el caso de estudio se busca analizar el cómo afecta la generación de vapor en distintas etapas de una

fundición de cobre estándar. Contemplando para esta etapa, torre de humidificación, torre de enfriamiento y la etapa de secado del gas.

Además, para esta etapa es considerado que todo el calor resultante en la etapa de acondicionamiento de gases, debe ser extraído por los sistemas intercambiadores de calor.

*Tabla 6 Balance energía manejo de gases concentrado seco*

Manejo y acondicionamiento de gases			
Torre de humidificación			
	Entrada	Salida	
Gases	593,15	353,15	K
SO <sub>2</sub>	7968,38	4744,22	MJ/h
N <sub>2</sub>	9586,96	5707,89	MJ/h
H <sub>2</sub> O(g)	0,00	0,00	MJ/h
Delta energía		7103,23	MJ/h
Torre de enfriamiento			
	Entrada	Salida	
Gases	353	300	K
SO <sub>2</sub>	4744	4032	MJ/h
N <sub>2</sub>	5708	4851	MJ/h
H <sub>2</sub> O(g)	0,00	0,00	MJ/h
Delta energía		1569	MJ/h





UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Secado de gases		
Calor sensible	0	MJ/h
Calor Latente	0	MJ/h
Delta energía	0	MJ/h
<b>Delta total energía</b>	<b>8672</b>	<b>MJ/h</b>

Para determinar la energía necesaria a extraer en la etapa de acondicionamiento de gases, en el caso de utilizar concentrado húmedo, se procede de la misma manera, como se ejemplifica a continuación.



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Tabla 7 Balance energía manejo de gases concentrado húmedo

Manejo y acondicionamiento de gases Balance calor			
Torre de humidificación			
	Entrada	Salida	
Gases	593	353	K
SO <sub>2</sub>	9080	5406	MJ/h
N <sub>2</sub>	3399	2024	MJ/h
H <sub>2</sub> O(g)	7125	4242	MJ/h
Delta energía		7932	MJ/h
Torre de enfriamiento			
	Entrada	Salida	
Gases	353	300	K
SO <sub>2</sub>	5406	4595	MJ/h
N <sub>2</sub>	2024	1720	MJ/h
H <sub>2</sub> O(g)	4242	3605	MJ/h
Delta energía		1752	MJ/h
Secado de gases			
Calor sensible	585		MJ/h
Calor latente	14690		MJ/h
Energía total	15275		MJ/h
Delta total energía		24959	MJ/h

Una vez realizado los balances requeridos para el caso de estudio, se procede a realizar un diagrama general para el circuito de fundición simulado, dimensionando los flujos de energía de cada equipo en estudio.

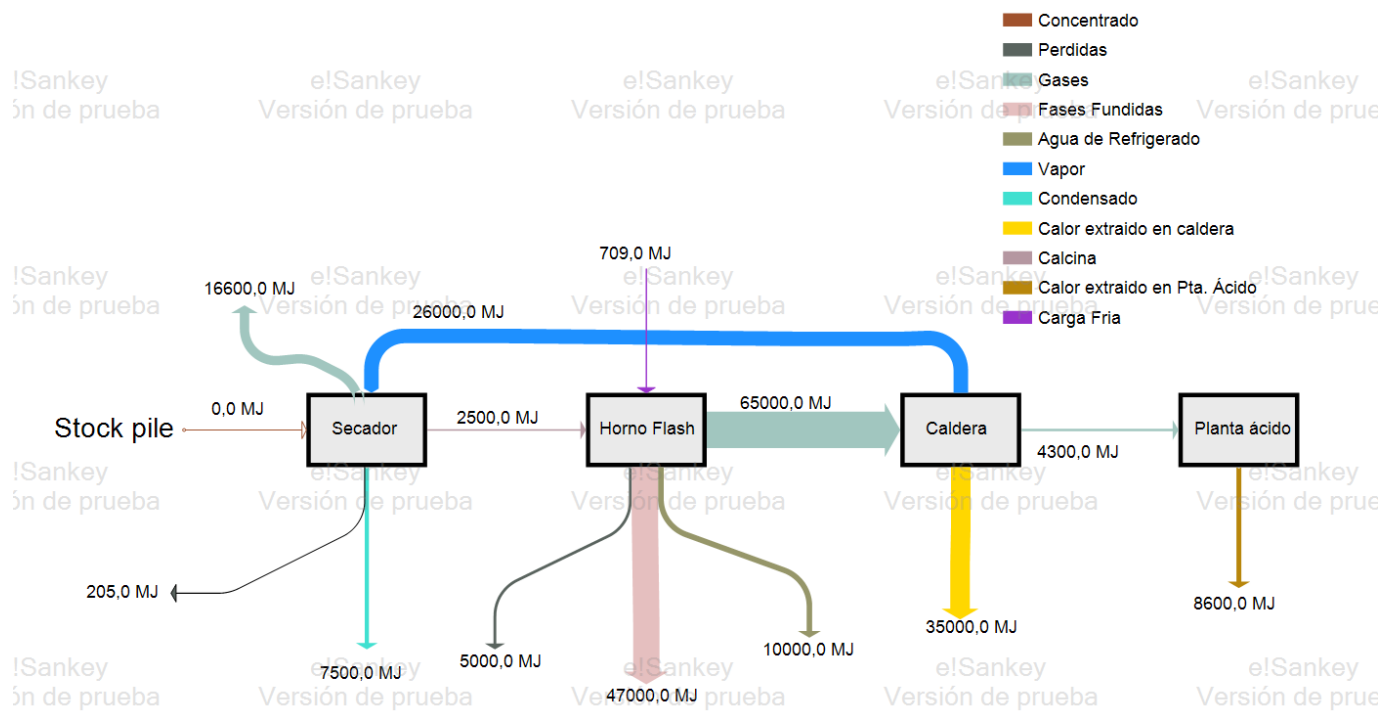


Ilustración 4 Diagrama de flujo caso horno Flash

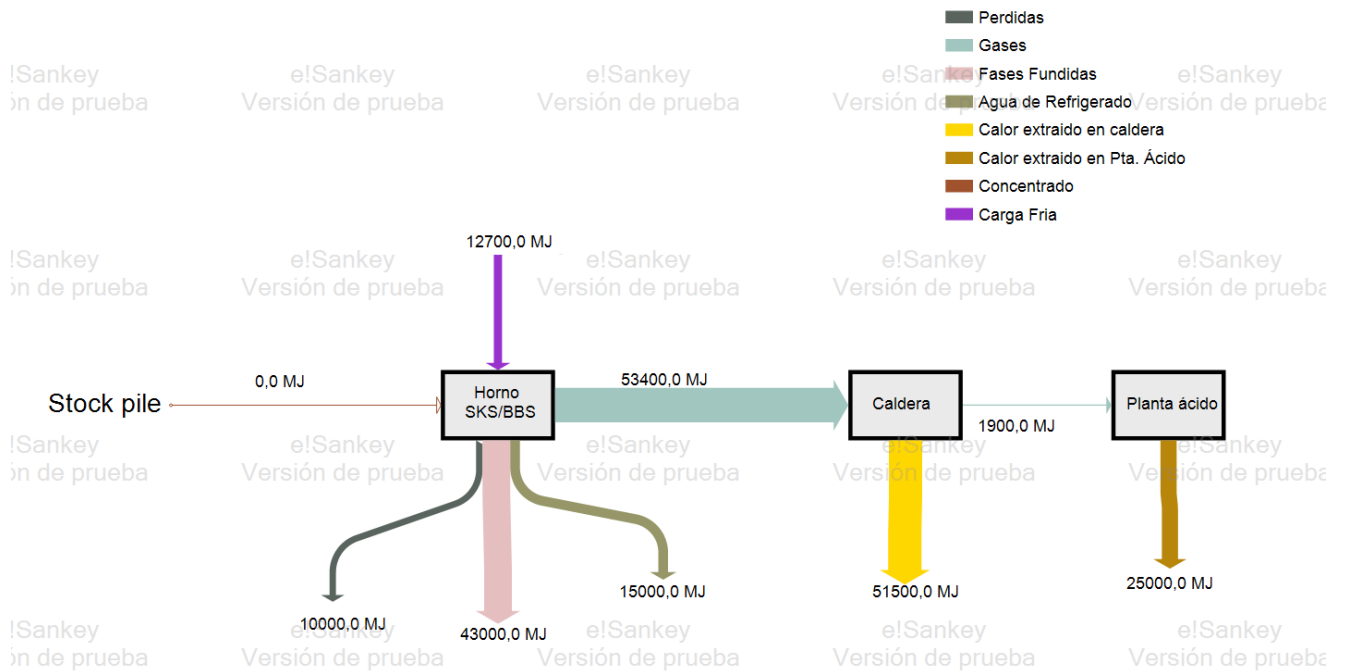


Ilustración 5 Diagrama de flujo caso SKS/BBS



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

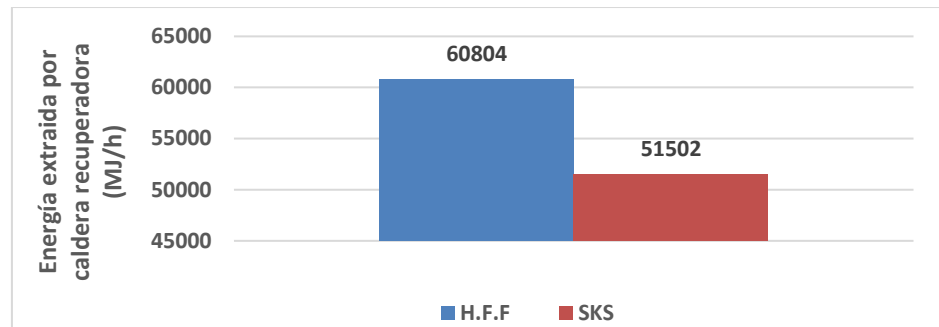
## CAPITULO IV

### 8. Análisis y discusión

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se procede a analizar ambos casos en función de la energía extraída por la caldera recuperadora de calor, y la energía que es necesaria extraer en la etapa de acondicionamiento de gases.

En la Tabla 3, se expresa los resultados obtenidos al realizar el balance de energía para secar el concentrado, el que posteriormente será alimentado al horno de fundición Flash, determinando que la totalidad del aporte energético es debido al vapor alimentado para este proceso, el cual ira en función de la cantidad de agua contenida en el concentrado, la cual es necesaria a evaporar.

El caso del horno de fusión Flash opera con una ley de eje del 60% y un enriquecimiento de  $O_2$  del 50% aproximadamente, mientras tanto que el horno SKS/BBS lo hace con una ley de eje del 70%, además de un enriquecimiento  $O_2$  de un 75%, esto resulta en que en el proceso del horno SKS/BBS, se deba oxidar una mayor cantidad de Azufre, lo que genera que se incremente la energía química de la reacción de fusión, como se muestra en las Tablas 4 y 5, para controlar este aumento de energía se debe agregar una mayor cantidad de carga fría.

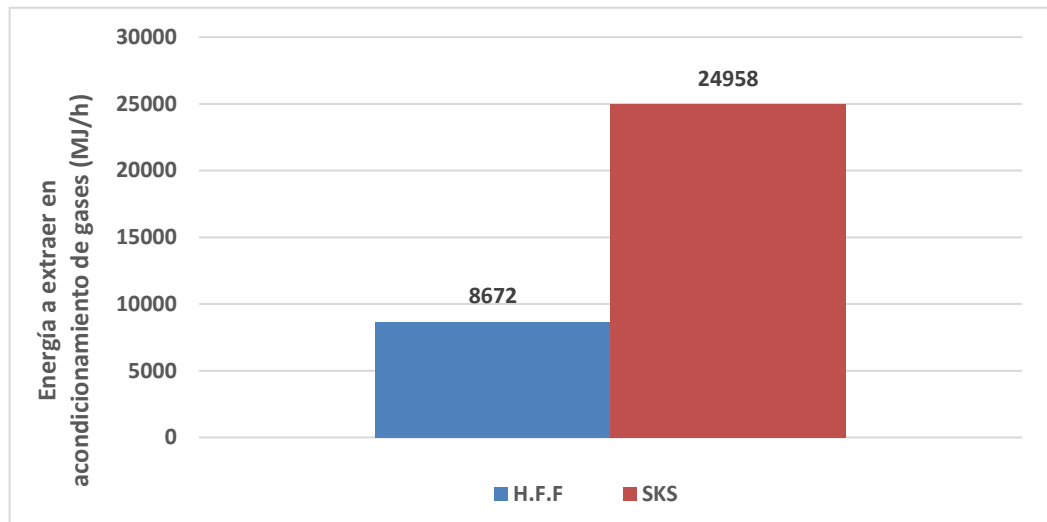


*Ilustración 6 Comparación de energía extraída en caldera*

Para el caso del horno de fundición Flash, se obtiene que el calor extraído por la caldera recuperadora es de 60.804 MJ/h, mientras que para el horno de fundición SKS/BBS el calor extraído por la caldera es de 51.502 MJ/h, como lo ejemplifica la Ilustración 6.

De la Tabla 6 y Tabla 7, se logra obtener la cantidad de energía necesaria a extraer en la etapa de acondicionamiento de gases de la planta de ácido de la fundición, energía la cual es asociada a los intercambiadores de calor del sistema, siendo estos los responsables de extraer dicha energía.

De esta manera se dimensiona el cómo afecta la cantidad de vapor de agua contenido en los gases, al momento de ser alimentados hacia la planta de ácido. Con objeto de un mejor análisis se realiza un gráfico comparativo entre ambos casos en estudio, como lo ejemplifica la Ilustración 6.



*Ilustración 7 Comparación energía a extraer en Planta de ácido*

Como ejemplifica la Ilustración 7, la energía que debe ser extraída por los sistemas de intercambio de calor en la planta de ácido, es de 8.672 MJ/h para los gases provenientes de la caldera del horno de fusión Flash, mientras que para los gases que proceden del horno SKS es de 24.958 MJ/h, comparando ambos casos, se obtiene que el calor a extraer en este proceso es mayor para el horno SKS/BBS, siendo esta diferencia de 16.286 MJ/h.

En ambos casos se consideraron los mismos parámetros de alimentación, dando como resultado que, en el proceso de fundición, el horno de fundición Flash, extrae 60.804 MJ/h de energía en su caldera, mientras que la caldera del horno de fundición SKS/BBS es de 45.748 MJ/h, es decir que el horno de fundición Flash en su caldera recuperadora extrajo 15.056 MJ/h de energía más que el horno SKS.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

No obstante, es de suma importancia para esta comparación entre ambos hornos, el mencionar que el calor extraído del horno Flash, es utilizado en mayoría para la producción de vapor necesario para el proceso de secado del concentrado, el cual se logra determinar mediante la siguiente ecuación.

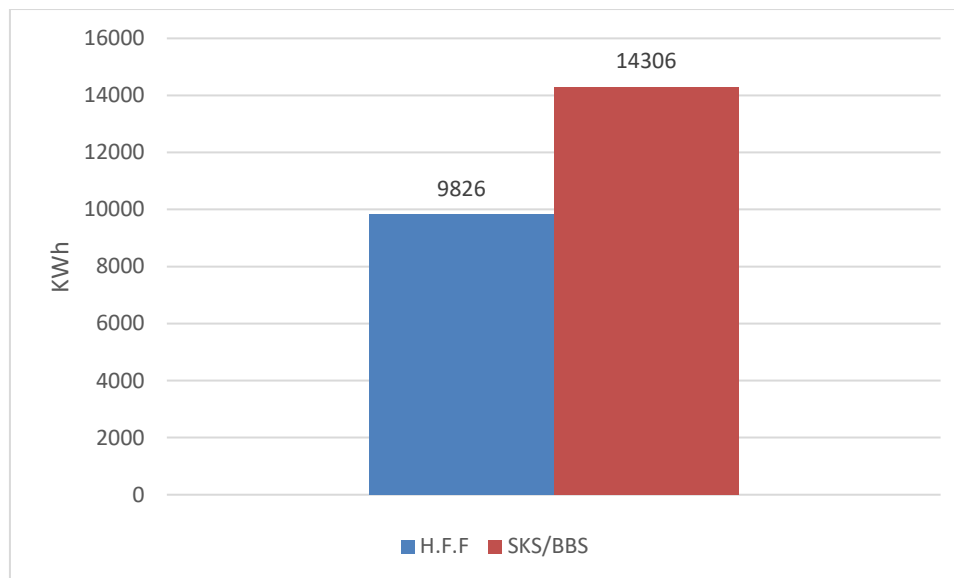
$$Q = m_{agua} * \left( \int_{T_1}^{T_2} C_{p_{agua\ l}} * dT + \Delta H_v + \int_{T_2}^{T_3} C_{p_{agua\ g}} * dT \right)$$

En la cual, los valores para las temperaturas T1, T2 y T3 son 25 °C, 120 °C y 275 °C respectivamente, según datos de diseño. Junto con esto los valores para los  $C_{p_{agua\ l}}$  y  $C_{p_{agua\ v}}$  serían, 4.184 KJ/Kg\*°C y 1,93 KJ/Kg\*°C, además la entalpia de evaporación  $\Delta H_v$  es de 2260 KJ/Kg, datos obtenidos del programa computacional HSC Chemistry.

Una vez realizada la ecuación, permite determinar el calor de la caldera recuperadora del horno Flash, que es necesario para la generación de vapor, se obtiene como resultado que esta energía es 25.429 MJ/h, es decir un 42% del total de calor extraído por esta.

Es decir que, la energía extraída por la caldera recuperadora de ambos hornos es 35.375 MJ/h por parte del horno Flash, y 51.502 MJ/h en el caso del horno SKS, por lo cual este calor recuperado queda a disposición para producir energía eléctrica, siendo aproximadamente 9.826 KWh para el caso del horno Flash y 14.306 KWh por parte del horno SKS/BBS, como lo ejemplifica la siguiente gráfica.



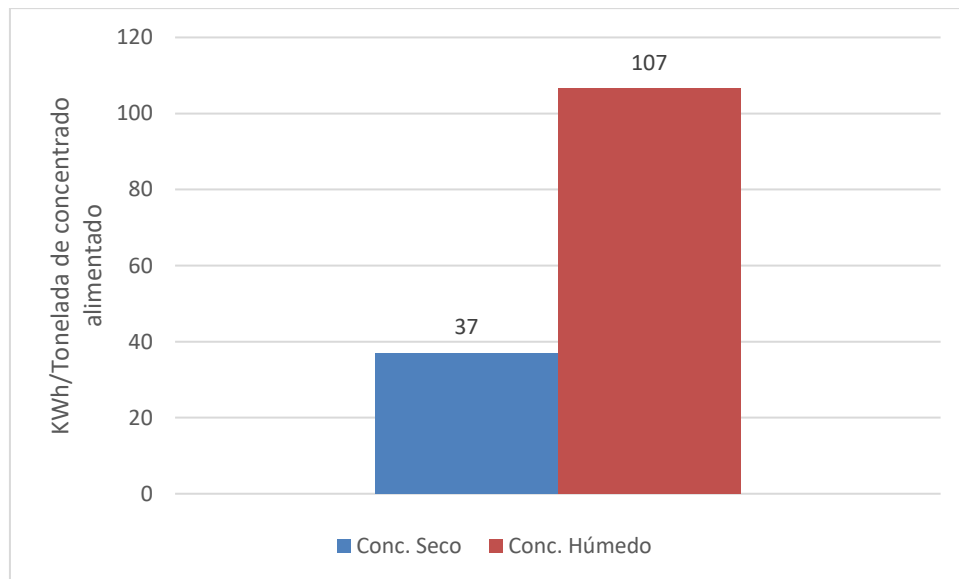


*Ilustración 8 Disponibilidad de energía eléctrica*

Como ejemplifica la Ilustración 7, la energía que debe ser extraída por los sistemas de intercambio de calor en la planta de ácido, es de 8.672 MJ/h para los gases provenientes de la caldera del horno de fusión Flash, mientras que para los gases que proceden del horno SKS es de 24.958 MJ/h, comparando ambos casos, se obtiene que el calor a extraer en este proceso es mayor para el horno SKS/BBS, siendo esta diferencia de 16.286 MJ/h.

De las Tablas 6 y 7, se logra determinar la cantidad de calor que es necesario extraer en la planta de ácido en cada caso, por lo cual este calor al ser extraída mediante intercambiadores de calor en dicha etapa, se logra asociar la cantidad de energía eléctrica consumida en este proceso con la cantidad de concentrado alimentado en el proceso, siendo para el caso del horno Flash 37

KWh por tonelada de concentrado y para el horno SKS/BBS 107 KWh por tonelada de concentrado alimentado.



*Ilustración 9 Energía eléctrica necesaria en planta de ácido*

De las Tablas 5 y 6, se logra dimensionar la cantidad de energía que debe ser consumida por parte de la carga fría añadir en la alimentación del horno en cada caso, siendo de 709 MJ/h en caso del horno Flash y de 12.764 MJ/h para el caso del horno SKS/BBS, sabiendo la composición de esta carga fría, en este caso es de 60%  $\text{Cu}_2\text{S}$  y 40%  $\text{FeS}$ , junto con los valores para calores específico y latente,  $500 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$  y  $13,5 \text{ J/mol}$  es posible determinar la cantidad en toneladas que deben ser alimentados de carga fría en el proceso de fundición para cada caso, siendo 1 tonelada de carga fría por hora en caso del horno Flash y 22 toneladas en caso del horno SKS/BBS, como lo resume la siguiente gráfica.

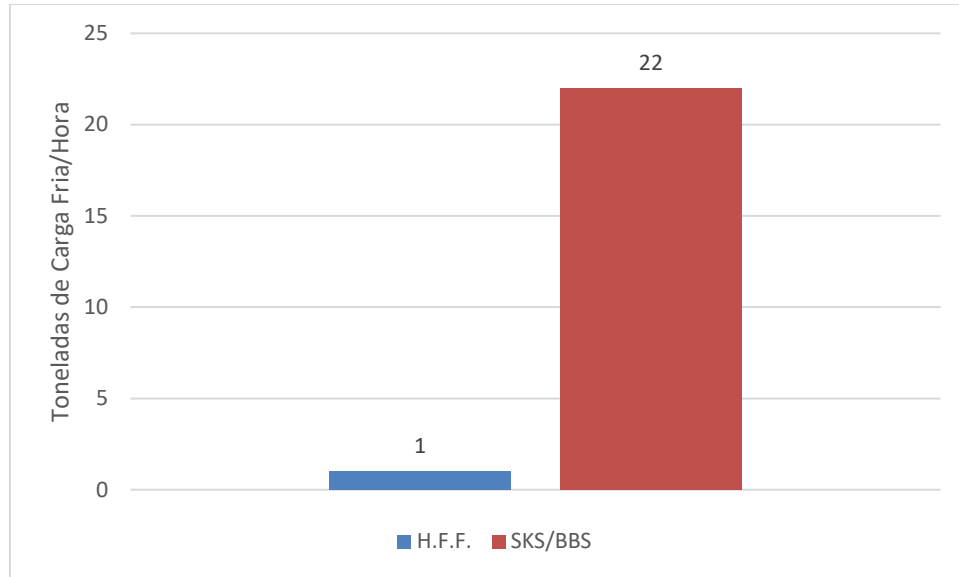


Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra



*Ilustración 10 Consumo de carga fría*



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## 9. Conclusiones

- Al utilizar el programa computacional Microsoft Excel para la realización de los balances de masas y energía para el proceso de secado, fusión y planta de ácido. Una vez validados dichos balances, se determinó que es una herramienta de gran eficacia para la modificación de datos en un sistema de una gran cantidad de variables y parámetros.
- Se analizaron ambos casos de estudio el utilizar concentrado seco en un sistema de fundición tradicional frente a la utilización de concentrados húmedos mediante la implementación del horno de fundición SKS, mediante la implementación de un modelo de masa y energía para ambos procesos, cuantificando el efecto de las variables en ambos casos.
- En el caso de fundir concentrado húmedo el horno SKS/BBS posee aproximadamente un 23% más de disponibilidad de calor para la generación de energía eléctrica, frente al caso del horno Flash.
- En el proceso de acondicionamiento de gases en planta de ácido, el caso de fundir concentrado seco obtuvo una menor cantidad de energía que es necesario extraer mediante los intercambiadores de calor, siendo esta aproximadamente un



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

35% de la energía total a extraer en caso de fundir concentrado húmedo.

- Los requerimientos energéticos en la planta de ácido en el caso del horno Flash por tonelada de concentrado alimentado, es menor que en el caso del horno SKS/BBS, 37 KWh y 107 KWh respectivamente, siendo casi el triple el consumo energético para el horno SKS/BBS que en el caso del horno Flash.
- La alimentación de carga fría en el caso de utilizar concentrado húmedo es de 22 toneladas, versus 1 tonelada al alimentar concentrado seco, siendo un aumento significativo en la demanda de carga fría en el proceso, debido a los parámetros operacionales del horno SKS/BBS, que utiliza un mayor enriquecimiento de oxígeno.
- Al evaluar en su totalidad ambos casos, fundir concentrado seco frente a utilizar concentrado húmedo, se determina que el fundir concentrado seco mediante el horno de fusión Flash es más viable energéticamente, ya que este caso posee un mayor diferencial entre la disponibilidad de calor para generar energía eléctrica y la energía eléctrica consumida en la planta de ácido por tonelada de concentrado alimentado, siendo aproximadamente de 70 KWh.



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Cayumil, R.(s.f.). Unidad II: ETAPAS DE TRATAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE, [diapositivas de PowerPoint].

[2] Vega Valencia, A. (2012). RECUPERACION DE ENERGIA EN AREA DE CONVERSION CATALITICA, PLANTAS DE ACIDO, CODELCO DIVISION CHUQUICAMATA [Ebook].

[3] Rojas Váldez, N. (2014). BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN SECADO INDIRECTO DE CONCENTRADO DE COBRE EN FUNDICIÓN CHAGRES [Ebook]. Santiago.

[4] Minera sur andés. LTDA. OPTIMIZACIÓN FUNDICIÓN CHAGRES INGENIERIA DE DETALLES CON ASEGURAMIENTO DE CALIDAD [Ebook].

[5] Muñoz, R., & Gobierno de Chile. (2006). EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CHILE. ASPECTOS GENERALES[EBOOK].

[6] Joel Kapusta. (2015). ENERGY CONSUMPTION IN COPPER SMELTING: A NEW ASIAN HORSE IN THE RACE.



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

10. ANEXO

BALANCE DE MASA PARA HORNO SKS

	Azufre kg/hr	Oxígeno kg/hr	Si kg/hr	Fierro Oxido kg/hr	Fierro Sulfuro kg/hr	Cobre Oxido kg/hr	Cobre Sulfuro kg/hr	Masa Total kg/hr	H2O Kg/hr	Masa Total con concentrado humedo Kg/hr
Entradas										
concentrado	18135	3460	3037	0	15210	0	19305	59147	6500	65647
oxígeno tec.		16537						16537		16537
Sub-total	18135	19997	3037	0	15210	0	19305	75684		82184
Salidas										
eje	5669	229		600	1586		18864	26948		26948
escoria	170	7473	3037	12901	122	44	397	24146		24146
gases	12295	12295						24591	6500	31091
Sub-total	18135	19997	3037	13501	1709	44	19261	75684		82184

BALANCE DE MASA PARA HORNO DE FUSION FLASH

	Azufre kg/hr	Oxígeno kg/hr	Si kg/hr	Fierro Oxido kg/hr	Fierro Sulfuro kg/hr	Cobre Oxido kg/hr	Cobre Sulfuro kg/hr	Masa Total kg/hr
Entradas								
concentrado	18135	3412	2995	0	15210	0	19305	59057
oxígeno tec.		14237						14237
Sub-total	18135	17648	2995	0	15210	0	19305	73293
Salidas								
eje	7137	416		1089	4060		19054	31757
escoria	207	6442	2995	9721	339	201	50	19956
gases	10790	10790						21581
Sub-total	18135	17648	2995	10811	4399	201	19104	73293

Balance de energía H.F.F.

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

	Q (MJ) ref-fase	e	Balanc horno
Perdidas	5000		5000
SO <sub>2</sub> (g)	16117		16117
N <sub>2</sub> (g)			48957
Gas	16117		65074
Cu <sub>2</sub> S	16454		16454
FeS	5980		5980
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1703		1703
Eje	24138		24138
Cu <sub>2</sub> S	42		42
Cu <sub>2</sub> O	157		157
FeS	485		485
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3510		3510
2FeO SiO <sub>2</sub>	15029		15029
SiO <sub>2</sub> (libre)	3341		3341
Escoria	22563		22563
TOTAL	62818	5	11177
Deltas	-48957		0
Masa de Nitrogeno Kg/hr	15548		
% enriq. O <sub>2</sub>	48%		
Calor gases salida caldera MJ	4270		
Calor extraido Caldera MJ	60804		





UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Balance de energía SKS/BBS

	Q (MJ) ref- fase	Balance horno
Perdidas	10000	10000
SO <sub>2</sub> (g)	10875	10875
N <sub>2</sub> (g)		14770
Gas	38662	53432
Cu <sub>2</sub> S	14693	14693
FeS	2124	2124
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	853	853
Eje	17670	17670
Cu <sub>2</sub> S	315	315
Cu <sub>2</sub> O	32	32
FeS	167	167
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4734	4734
2FeO*SiO <sub>2</sub>	18290	18290
SiO <sub>2</sub> (libre)	1723	1723
Escoria	25261	25261
TOTAL	81593	96363
Deltas	48357	-33587



Universidad  
Andrés Bello

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la tierra

Masa de Nitrogeno Kg/hr	5512
% enriq. O <sub>2</sub>	75%
Calor gases salida caldera MJ	1930
Calor extraido Caldera MJ	51502