



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y  
MATERIALES

**FLEXIBILIDAD OPERACIONAL EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA  
INDUSTRIA MINERA DE COBRE BAJO DISTINTOS ESCENARIOS  
TECNOLÓGICOS PARA EL SUMINISTRO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

MARÍA SOFÍA LEIVA TORRES

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FRANCISCO GRACIA CAROCA  
JANNIK HAAS

SANTIAGO DE CHILE  
2023

## **FLEXIBILIDAD OPERACIONAL EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA INDUSTRIA MINERA DE COBRE BAJO DISTINTOS ESCENARIOS TECNOLÓGICOS PARA EL SUMINISTRO**

La transición a energías renovables no convencionales (ERNC) es esencial para que Chile logre ser carbono neutral antes de 2050. La industria minera del cobre desempeña un papel crucial debido a su alto consumo energético. Enfoques valiosos incluyen la gestión de la demanda por parte de los consumidores industriales para promover sinergias entre generadores y usuarios. Además, existen oportunidades sin explorar en la cadena productiva del cobre en términos de flexibilidad energética. De esta manera, en este trabajo se propone abordar lo anterior a través de la creación de un modelo fenomenológico para el proceso de fundición de cobre para ser utilizado como insumo en estrategias de gestión de demanda ante la oferta variable de las energías renovables no convencionales.

Las operaciones unitarias consideradas para el modelo de la fundición son: fusión, conversión, limpieza de escorias y piro-refinación. Por lo que los flujos de entrada más relevantes en el proceso son la entrada de concentrado de cobre ( $30\%Cu$ ), fundente ( $SiO_2$ ), combustible, oxígeno enriquecido y calor de precalentado para ésta última, y electricidad. Los de salida, por su lado, son la escoria de descarte, gases de combustión ( $CO_2$ , vapor de agua  $H_2O$ , y dióxido de azufre  $SO_2$ ) y cobre anódico. Con lo anterior, se diagnosticó que las variables con mayor potencial de flexibilidad, para un flujo de concentrado dado, son el combustible alimentado, el oxígeno enriquecido y el calor de precalentado. Estas variables tienen una relación complementaria entre sí respecto a la energía neta que aportan al proceso.

Para construir el modelo, se consideró estado estacionario y se utilizaron los balances de masa y energía, la producción de oxígeno enriquecido y el consumo eléctrico basal de la fundición. Esto se realizó en función de las variables críticas para su posterior implementación. El modelo fue implementado en diferentes combinaciones de las variables mencionadas (combustible, oxígeno enriquecido y calor de precalentado), lo que generó escenarios de flexibilidad energética.

Para facilitar la comprensión, se realizó un ejercicio ilustrativo del uso de los escenarios para la eventual gestión de la demanda eléctrica. En este ejercicio se examinan los casos extremos del uso de las variables ante menor o mayor disponibilidad eléctrica, como por ejemplo cuando exista menor disponibilidad, utilizar al máximo el oxígeno y evitar combustible, o utilizar al máximo el calor de precalentado cuando la disponibilidad sea mayor. Finalmente, se concluye que el modelo es una herramienta útil para sustentar y apoyar la toma de decisiones y que en complemento a esto, puede ser aplicado al contexto de una planificación energética más amplia en sintonía con la red eléctrica.

*Dedicado a: mi madre, Jacqueline; mi hermana, Amanda; y mi hermano, José.*

*La vida no es la fiesta que esperábamos.  
Pero, ya que estamos aquí,  
bailemos.*

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por ser un soporte fundamental en mi vida, si puedo seguir adelante cada vez es gracias a todo lo que me han enseñado y entregado. En especial quiero destacar a mi mamá, por ser la leona que es, amando y cuidando siempre a los suyos, además de darme uno de los regalos más hermosos que he recibido: mis hermanos. También por enseñarme con su ejemplo, día a día, sobre entrega y resiliencia, que se puede ser fuerte y amorosa al mismo tiempo. A Mauricio, por ser un gran compañero de vida para ella y un regalón con nosotros, nuestra familia recibió a un importante miembro con tu llegada. A mi hermana Amanda y a mi hermano José por todo el amor y complicidad que recibo de ustedes, la vida es muy bella y divertida cuando tienes hermanos como los míos. Me inspiran día a día a ser mejor persona. A mi papá, José Ignacio, por cultivar la curiosidad, el asombro y sensibilidad en mí, hacerme sentir segura y feliz al darme la mano, hacerme reír o mirarme cálidamente.

Quiero hacer una mención especial a Nicolás. Por todo el amor que me has dado, por estar en las buenas y en las malas, por tu paciencia y apoyo. Gracias por los regalones, la comida divertida en compañía y las risas cuando el semestre -o la vida misma- se sienten cuesta arriba, también por nuestras aventuras y por ayudarme a mantener la fe en que siempre hay cosas bonitas por vivir. Tu amor tan grande, sereno y genuino ha sido muy sanador para mí. Gracias a tu sonrisa y tus ojitos la vida se siente más liviana. Naturalmente, una persona como tú salió de un espacio muy bello, liderado por una gran mujer y madre. Gracias tía Vicky por hacerme sentir siempre parte de su familia. Gracias a Mile, Cote y Agu por lo mismo, y también a todos los demás integrantes de esta gran tribu de Maipu-Colli.

A mis amigos del alma: la familia Soto-Uribe, por tener tanta fe en mí y acogerme con brazos abiertos. Gracias Ángela y Pablo por aportar al mundo con una persona tan maravillosa como Isidora (mi mejor amiga), los respeto y admiro profundamente. En mi cabeza siempre tendré apellidos adicionales. Gracias Ángela por ser la hermana mayor que necesitaba siendo adolescente y empezando la adultez.

A la mejor prima que el cosmos me pudo dar, Carla. Nuestro vínculo empezó con nuestras madres y para mí eso es muy especial. Gracias por ayudarme e inspirarme en el camino difícil hacia la adultez, gracias por enseñarme lo bonita que es la vida con gatos y lo poéticas que pueden ser algunas tonteras cotidianas.

A todos los amigos que he hecho durante mi trayecto en la universidad. Destaco a mis primeros y aún grandes amigos Tobi y Joseph, ya que me enseñaron de forma bien pragmática a tener carácter, tomar cerveza y a dejar un poco la *pera*. Por ser compañeros de esos que son *-un poco-* mala influencia para el estudio, pero bacanes para el corazón.

Al piloto DisSusIp por ser un lugar seguro y divertido para trabajar por la sustentabilidad y los sueños de un mundo mejor, hago mención a sus creadores y mis mentores en ese espacio: Andrea Rodríguez, Felipe Díaz, Jenny Miranda y Macarena Avilés.

A mis sustenti-amigas Javi R., Jenny y Dani por aportar con tanta inspiración a mi vida y fijarme referentes. A mi amiga del alma, Carolina, por su apoyo y compañerismo. También a las personas del DIQBM y la salita por hacer amenos y entretenidos los espacios de estudio, en especial a mis panitas mega apañadores: Ale, Pancho y Vicho.

A Felipe Díaz, mi profe guía, por ser un gran mentor y guiar mi camino desde mi 2do año en la U, gracias por toda la dedicación hacia la docencia y por levantar espacios comunes para soñar y crear.

A Jannik y Simón, de Stochastic Simulation and Safety Research for Hydrosystems de la Universidad de Stuttgart, por darme la oportunidad de desarrollarme en un área de mi interés, por confiar en que podemos concebir ingenierías mejores para el planeta y permitirme ser parte de ello.

Finalmente, quisiera resaltar a las mujeres, mencionadas y no mencionadas aquí, por inspirarme cada día a través de su sororidad, resistencia, fuerza y sensibilidad. Que yo pueda soñar y explorar la vida en cierta libertad es gracias a todo lo que han hecho nuestras compañeras y ancestras.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Marco Conceptual . . . . .	4
2.1.1. Proceso productivo del cobre . . . . .	4
2.1.2. Vía Pirometalúrgica . . . . .	5
2.1.3. Fundición . . . . .	6
2.2. Estado del arte . . . . .	6
2.3. Antecedentes . . . . .	8
<b>3. Demanda energética de la fundición de cobre</b>	<b>10</b>
3.1. Operaciones unitarias en la fundición de cobre . . . . .	10
3.2. Diagnóstico energético de la fundición de cobre . . . . .	11
<b>4. Construcción de un modelo de demanda energética</b>	<b>13</b>
4.1. Fusión . . . . .	14
4.1.1. Balances de masa . . . . .	15
4.1.1.1. Balance de masa del cobre . . . . .	15
4.1.1.2. Balance de masa del hierro . . . . .	15
4.1.1.3. Balance de masa del azufre . . . . .	16
4.1.1.4. Balance de masa del oxígeno . . . . .	16
4.1.1.5. Balance de masa $SiO_2$ . . . . .	17
4.1.1.6. Balance de masa del nitrógeno . . . . .	17
4.1.1.7. Balance de masa del carbono . . . . .	17
4.1.1.8. Balance de masa del hidrógeno . . . . .	17
4.1.2. Otras relaciones másicas importantes . . . . .	18
4.1.2.1. Relación $FeO/SiO_2$ . . . . .	18
4.1.2.2. Grado de Cu en la mata . . . . .	18
4.1.2.3. Masa de mata . . . . .	18
4.1.2.4. Cobre arrastrado en escoria de fusión . . . . .	18
4.1.2.5. Composición de escoria . . . . .	19
4.1.3. Balance de energía . . . . .	19
4.1.4. Requerimiento de oxígeno . . . . .	19
4.1.4.1. Flujo másico oxígeno industrial . . . . .	19
4.1.4.2. Flujo másico de aire . . . . .	20
4.2. Conversión . . . . .	23
4.2.1. Balances de masa . . . . .	24
4.2.1.1. Balance de masa del cobre . . . . .	24

4.2.1.2.	Balance de masa del hierro . . . . .	24
4.2.1.3.	Balance de masa del azufre . . . . .	24
4.2.1.4.	Balance de masa del oxígeno . . . . .	25
4.2.1.5.	Balance de masa $SiO_2$ . . . . .	25
4.2.1.6.	Balance de masa del nitrógeno . . . . .	26
4.2.1.7.	Balance de masa del carbono . . . . .	26
4.2.1.8.	Balance de masa del hidrógeno . . . . .	26
4.2.2.	Otras relaciones másicas importantes . . . . .	26
4.2.2.1.	Masa escoria . . . . .	26
4.2.2.2.	Relación $Fe_3O_4/SiO_2$ . . . . .	27
4.2.2.3.	Cobre arrastrado en escoria de conversión . . . . .	27
4.2.3.	Balance de energía . . . . .	27
4.2.4.	Requerimiento de oxígeno . . . . .	27
4.2.4.1.	Flujo másico oxígeno industrial . . . . .	27
4.2.4.2.	Flujo másico de aire . . . . .	28
4.2.5.	Reciclo desde limpieza de escorias . . . . .	28
4.2.5.1.	Cobre recuperado en forma de $Cu_2O$ . . . . .	28
4.2.5.2.	Cobre recuperado en forma de $Cu_2S$ . . . . .	28
4.3.	Limpieza de Escorias . . . . .	31
4.3.1.	Balances de masa . . . . .	32
4.3.1.1.	Balance de cobre . . . . .	32
4.3.1.2.	Balance de azufre . . . . .	32
4.3.1.3.	Balance de oxígeno . . . . .	32
4.3.1.4.	Balance de hierro . . . . .	33
4.3.1.5.	Balance de $SiO_2$ . . . . .	33
4.4.	Piro-refinación . . . . .	33
4.4.1.	Balances de masa . . . . .	34
4.4.1.1.	Balance de masa del cobre . . . . .	34
4.4.1.2.	Balance de masa del azufre . . . . .	34
4.4.1.3.	Balance de masa del oxígeno . . . . .	34
4.4.1.4.	Balance de masa del nitrógeno . . . . .	35
4.4.1.5.	Balance de masa del carbono . . . . .	35
4.4.1.6.	Balance de masa del hidrógeno . . . . .	35
4.4.2.	Balance de energía . . . . .	35
4.4.3.	Requerimiento de oxígeno . . . . .	36
4.4.3.1.	Flujo másico oxígeno industrial . . . . .	36
4.4.3.2.	Flujo másico de aire . . . . .	36
4.5.	Producción de oxígeno . . . . .	39
4.6.	Consumo eléctrico en la fundición . . . . .	40
4.7.	Consumo eléctrico total . . . . .	40
<b>5.</b>	<b>Implementación del modelo de demanda energética</b>	<b>41</b>
5.1.	Fusión . . . . .	42
5.2.	Conversión . . . . .	43
5.3.	Piro-refinación . . . . .	44
<b>6.</b>	<b>Escenarios energéticos para la operación de la fundición</b>	<b>46</b>

<b>7. Conclusión</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>
<b>Anexos</b>	<b>56</b>
<b>A. Diagrama extendido</b>	<b>56</b>
<b>B. Parámetros</b>	<b>57</b>
B.1. Parámetros Fusión . . . . .	57
B.2. Parámetros Conversión . . . . .	58
B.3. Parámetros Piro-refinación . . . . .	59
<b>C. Producción de Oxígeno</b>	<b>60</b>
<b>D. Códigos</b>	<b>62</b>
D.1. Código Fusión . . . . .	62
D.2. Código Conversión y Limpieza de Escorias . . . . .	67
D.3. Código Piro-refinación . . . . .	74

# Índice de Tablas

4.1.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de fusión. . . . .	21
4.2.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de fusión. . . . .	22
4.3.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de conversión. . . . .	29
4.4.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de conversión. . . . .	30
4.5.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de piro-refinación. . . . .	37
4.6.	Matriz expandida $(b A)$ del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de piro-refinación. . . . .	38
6.1.	Combinaciones de casos extremos de cada variable que conforman los escenarios de consumo. . . . .	46
B.1.	Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de fusión. . . . .	57
B.2.	Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de conversión. . . . .	58
B.3.	Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de piro-refinación. . . . .	59

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Etapas iniciales del proceso productivo del cobre. . . . .	4
2.2.	Vía pirometalúrgica del proceso de producción de cobre. . . . .	5
2.3.	Diagrama general de una fundición de cobre. . . . .	6
3.1.	Diagrama de bloques del proceso de vía piro-metalúrgica del cobre. . . . .	10
3.2.	Entradas y salidas del proceso de fundición de cobre y de la planta de producción de oxígeno industrial. . . . .	12
4.1.	Diagrama de bloques fusión. . . . .	14
4.2.	Diagrama de bloques conversión. . . . .	23
4.3.	Diagrama de bloques limpieza de escorias. . . . .	31
4.4.	Diagrama de bloques piro-refinación. . . . .	33
5.1.	Requerimientos de energía en la operación de la fusión obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. . . . .	42
5.2.	Requerimientos de energía en la operación de la conversión obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. . . . .	43
5.3.	Requerimientos de energía en la operación de piro-refinación obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. . . . .	44
6.1.	Consumo de oxígeno industrial ( $m_{O_2}^{ind}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. . . . .	47
6.2.	Consumo de combustible ( $m_{comb}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. . . . .	47
6.3.	Consumo de calor de precalentado ( $Q_{prec}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. . . . .	48
6.4.	Consumo electricidad de la fundición ( $E_F$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. . . . .	48
6.5.	Electricidad disponible a través del tiempo. . . . .	50
6.6.	Condiciones de operación en el proceso de fundición de cobre para un escenario de operación $E_k$ dado. . . . .	50
A.1.	Diagrama extendido del proceso de fundición de cobre. . . . .	56
C.1.	Equipo Compact VSA serie M-900. . . . .	60

# Capítulo 1

## Introducción

La acción climática es urgente, tal y como se desprende del informe especial del IPCC sobre el calentamiento global de 1,5 °C [1], en el que se afirma que los impactos del Cambio Climático son peores de lo esperado. Por su parte, según el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile, el país se ha comprometido en alcanzar la carbono neutralidad antes del año 2050 [2]. Esto implica una transición industrial y social a fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), como solar y eólica, que impactará fuertemente al suministro eléctrico de toda la industria nacional.

Entre las industrias, se proyecta un impacto especial para el sector minero, cuyo consumo total en 2019 alcanzaba el 14 % a nivel nacional, con alrededor de 48.500 MWh, siendo el 51 % consumo de electricidad y 49 % combustibles [3]. Lo anterior adquiere aún más relevancia cuando se considera que en 2020 la participación de la minería del cobre en el producto interno bruto (PIB) fue de 11 % en Chile [4]. Si bien, las ERNC como fuentes de energía, debido a su naturaleza, poseen una disponibilidad variable a través del tiempo, se tiene la ventaja de que el norte de Chile, donde se lleva a cabo la minería del cobre, hay condiciones de radiación muy favorables para la generación de energía solar, de hecho, esta zona tiene la mayor incidencia solar del mundo [5][6]. Entonces, la transición a fuentes ERNC no sólo es necesaria para producir cobre según el contexto global y nacional, sino que también es posible.

En la literatura, para aumentar la participación de ERNC en la red eléctrica, típicamente las soluciones se abordan desde la perspectiva del planificador, modificando la oferta a través de la instalación y operación de diferentes plantas generadoras, e incluyendo almacenamiento en forma de baterías [7][8]. En Chile, la participación de ERNC es cada vez más alta (32 % del total anual hasta septiembre 2022), y a través de la red, las plantas productivas pueden acceder a la electricidad generada por estas fuentes [9][10]. Sin embargo, este enfoque sigue siendo exógeno, ya que se considera la demanda como una condición de borde, es decir, a los consumidores industriales como entes pasivos. De hecho, actualmente, la red entrega los precios de la electricidad distribuidos a lo largo del tiempo, y las plantas optimizan su producción al menor costo posible, consumiendo la electricidad que necesitan en las ventanas donde los precios son más convenientes.

En paralelo a modificar la oferta y utilizar almacenamiento, ya sea incorporando más ERNC o no, está modificar la demanda. De esta manera, los consumidores industriales pueden aumentar su eficiencia y/o gestionar la forma y la magnitud de energía que necesitan

de manera inteligente. A esta última estrategia, se le conoce como gestión de la demanda o, en inglés, *Demand-Side Management* (DSM) [11]. Utilizar esta estrategia implica sus propios desafíos, por ejemplo, explorar qué tan flexibles son los procesos productivos del cobre para la adaptación a esta variabilidad mencionada, y conocimientos empíricos y fenomenológicos profundos, sumado a que en muchas ocasiones las condiciones de operación pueden ser altamente específicas, lo que podría disminuir la flexibilidad [11]. No obstante, si dichos obstáculos se superan, los costos de implementación serían bajos, debido a que no es necesario invertir en equipamiento, pues se pueden utilizar los mismos componentes ya instalados. Adicionalmente, se podrían aprovechar las características propias del proceso y, eventualmente, en caso de aplicarse en el diseño de una red energética, desde la perspectiva del planificador global, se obtendrían sinergias entre generadoras y consumidores [11][8].

Ahora bien, en cuanto a la cadena productiva del cobre, existen procesos que no han sido explorados respecto a la flexibilidad de la demanda, para la adaptación variable de la oferta de electricidad [7]. Uno de ellos, es el proceso de fundición en el que se producen ánodos a partir de concentrado de cobre, dentro de hornos que operan a altas temperaturas [7]. Hay tres etapas principales: fusión, conversión y piro-refinación. En las dos primeras, el objetivo es separar el cobre contenido en el mineral, del azufre y el hierro. Lo anterior, se hace a través de una reacción reducción-oxidación que libera el calor necesario para fundir gran parte del concentrado [12]. A su vez, la fusión mencionada es complementada con combustible y calor de la corriente oxidante. Luego, en la piro-refinación, el contenido de impurezas en el flujo de entrada es muy bajo, por lo que en esta etapa, solo se reducen las trazas finales de oxígeno en ella, para obtener el nivel de pureza requerido en los ánodos [12].

De esta manera, considerando las variables y características mencionadas, es posible que existan combinaciones interesantes en las que el proceso de fundición logre su objetivo de producción. Por lo tanto, tomando en cuenta todo lo anterior y en miras de explorar su flexibilidad, se propone encontrar combinaciones a través de un modelo para incorporarlas como base en estrategias de gestión de demanda (DSM) con el objetivo de que la electricidad demandada a la red sea acoplable a la variabilidad de las ERNC.

# Objetivos

## Objetivo General

Modelar la demanda energética del proceso de fundición de cobre para permitir su implementación en estrategias de gestión de demanda ante la oferta variable de las energías renovables no convencionales.

## Objetivos Específicos

1. Seleccionar las operaciones que representan el proceso de fundición de cobre que tienen el potencial de flexibilizarse.
2. Construir un modelo de demanda energética del proceso de fundición de cobre a través de sus ecuaciones fundamentales.
3. Analizar la demanda energética variando su nivel de producción, oxígeno industrial, calor de precalentado y combustible con el modelo realizado.
4. Proponer modos de operación en la fundición de cobre que sean adaptables a la oferta variable de las energías renovables.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Marco Conceptual

#### 2.1.1. Proceso productivo del cobre

Chile es el mayor productor de cobre de mina a nivel mundial, de hecho, en el periodo enero a marzo 2022 su participación alcanzó un 24,7% [13]. Su proceso productivo es la serie de procedimientos que son necesarios para obtener cobre con la más alta pureza. Éste comienza con la exploración de terrenos para encontrar yacimientos donde se encuentran los minerales de forma natural, y termina con la fabricación de planchas de cobre con 99,97% de pureza, que son comercializadas a nivel mundial [12]. En términos generales, las etapas contenidas en el proceso se presentan en el diagrama de la figura 2.1, a continuación.

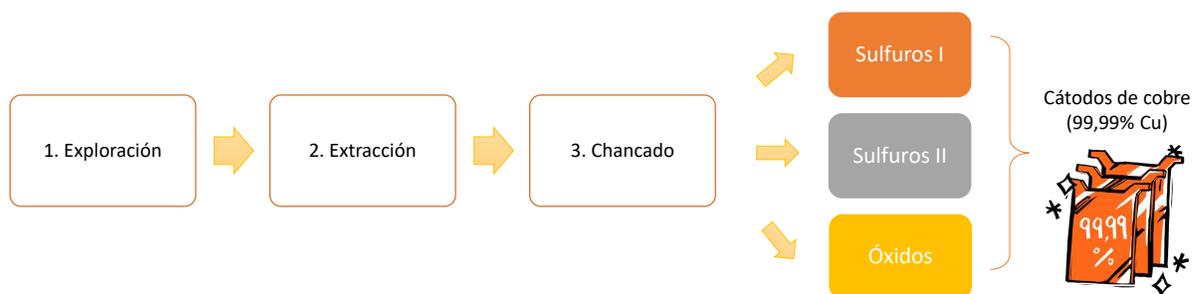


Figura 2.1: Etapas iniciales del proceso productivo del cobre. Elaboración propia, adaptado desde [12].

Durante la exploración, se realiza la búsqueda de un yacimiento de cobre y se toman muestras del terreno para determinar la viabilidad de su explotación. En la extracción se fractura el macizo rocoso para extraer los minerales que contiene, mediante el uso de explosivos. Luego, en el chancado, se disminuye el tamaño de las rocas extraídas [12]. En el diagrama anterior (figura 2.1), se observa que las tres primeras etapas son las mismas, ya que posterior al chancado se puede conocer la composición del mineral y así, clasificarlo en dos tipos [14]:

- Sulfurados: Suelen ser mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos

de diferentes elementos.

- Oxidados: Se originaron con la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Al encontrarse en capas más superficiales de la tierra, fueron los primeros que fueron explotados históricamente.

Con la clasificación mencionada, se determina la vía de procesamiento que se utilizará en cada caso (figura 2.1). Hay tres vías [12]:

- Sulfuros I: Conocida como vía pirometalúrgica, corresponde a los métodos tradicionales del proceso productivo de cobre sulfurado. Se utilizan altas temperaturas para fundir los metales contenidos en el mineral y separar el cobre de los demás elementos.
- Sulfuros II: Es la innovación respecto al proceso tradicional. Utiliza biolixiviación, una tecnología que, con la ayuda de bacterias, extrae metales desde el concentrado mineralizado.
- Óxidos: Conocida como vía hidrometalúrgica, que es el proceso para el cobre oxidado en que se recupera este metal a través del uso de soluciones.

### 2.1.2. Vía Pirometalúrgica

La vía tradicional de procesamiento de cobre sulfurado (mencionada antes como Sulfuros I), considera las operaciones de molienda, flotación, fundición y electro-refinación, como se puede notar en la figura 2.2.

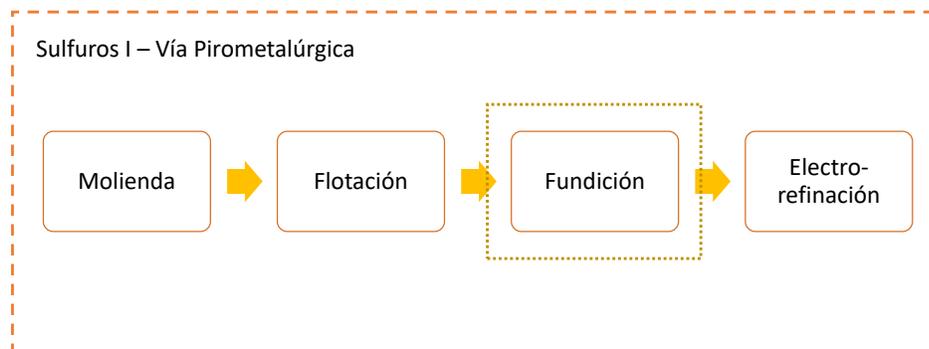


Figura 2.2: Vía pirometalúrgica del proceso de producción de cobre.

En la molienda, las rocas chancadas pasan por una segunda etapa de reducción de tamaño. Después, en la flotación, el material se sumerge en celdas para separar el cobre de otras sustancias, formando una pulpa. En la fundición, la pulpa, o concentrado de cobre, se introduce en hornos para elaborar ánodos de cobre de alrededor de 99,5% (en peso) de pureza. Esta operación se destaca en la figura 2.2 debido a que este trabajo está enfocado en ella. Finalmente, en la electro-refinación, los ánodos de cobre son disueltos para formar cátodos de 99,97% de pureza, mediante electrólisis.

### 2.1.3. Fundición

La fundición es un proceso al que entra una corriente, llamada concentrado de cobre, que contiene calcopirita ( $CuFeS_2$ ) y otros minerales. El contenido de cobre del concentrado es de aproximadamente 30 %, y luego de las operaciones unitarias, llega una pureza de 99,5 % en los ánodos producidos [12]. En general se requieren cuatro operaciones fundamentales, como se puede ver en la figura 2.3: fusión, conversión, limpieza de escorias y piro-refinación. Todas se llevan a cabo en hornos que operan sobre los 1200 °C.

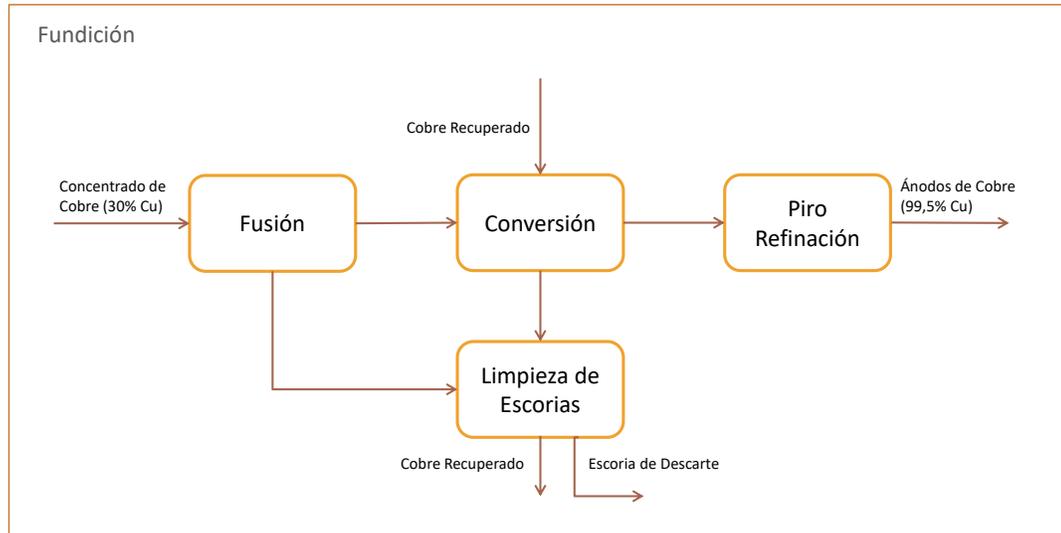


Figura 2.3: Diagrama general de una fundición de cobre.

En la fusión, el concentrado de cobre es reducido con combustible para disminuir su contenido de azufre y hierro, produciendo mata de cobre y una corriente miscelánea de residuos que se conoce como escoria de fusión. En la conversión, la mata de cobre es reducida nuevamente para obtener cobre blíster, una corriente de cobre de muy alta pureza, 98,5 % aproximadamente. Además, se produce una corriente de escoria que contiene trazas de cobre, llamada escoria de fusión. Ambas corrientes de escoria, son dirigidas a la limpieza de escorias para recuperar su contenido de cobre y ser recirculadas al proceso en la conversión. Finalmente, en la piro-refinación, o refinación a fuego, se purifica el cobre blíster, disminuyendo su contenido de oxígeno y generando ánodos de cobre con pureza cercana a 99,5 %.

## 2.2. Estado del arte

Para la adaptación energética a las nuevas tecnologías de generación de electricidad, es importante realizar gestión de la demanda, o como se conoce en inglés *demand-side management* (DSM). Hasta hace un tiempo, el enfoque de la investigación, sólo consideraba la perspectiva del planificador energético, concentrándose en aumentar el suministro, o generación, para una demanda determinada. No obstante, en la última década, ha habido más interés en adoptar un enfoque integrado que considere ambas partes simultáneamente, ya que puede mejorar la eficiencia y la fiabilidad de la red eléctrica, así como los beneficios para los consumidores [11].

La gestión de la demanda incluye actividades sistemáticas en la interacción entre el operador de la red y el consumidor de electricidad, con el objetivo de cambiar la cantidad y/o el momento en que el consumidor utiliza la electricidad [11]. Puede darse en todos los sectores: comercial, residencial e industrial; sin embargo, la mayoría de los estudios se han concentrado en el sector residencial, a pesar del significativo consumo del sector industrial [11]. En particular, hay características distintivas de los procesos industriales que facilitan la DSM. Una de ellas es que poseen un consumo individual muy alto, además, la electricidad en sí es difícil de almacenar, pero la mayoría de los insumos del proceso no. En relación con eso, se define la flexibilidad operacional de los procesos como la capacidad de aumentar y reducir la producción, y su capacidad de inventario de productos. En este sentido, el inventario de insumos aumenta la flexibilidad en las operaciones de planta y por lo tanto aumenta las posibilidades de adaptación a la variabilidad de la energía eléctrica [11]. Explorar la flexibilidad operacional es clave para realizar DSM industrial.

En concordancia a lo anterior, esta sección se enfoca en describir y evaluar el estado actual en modelos de demanda para la industria del cobre, o sus símiles, orientados a explorar la flexibilidad operacional, o más allá, la gestión de la demanda. Con este criterio, se seleccionó estudios enfocados en la producción de cobre, naturalmente, y acero, debido a que el proceso de fundición de éste último tiene operaciones muy semejantes al primero [15]. Análogamente, se excluyó el aluminio, ya que en su producción, si bien existe el proceso de fundición, su altísimo punto de fusión de 2000°C, requiere utilizar criolita fundida como solvente y una celda para electrólisis [15]. A continuación se presentan los estudios considerados.

En [7], se revisaron más de 100 artículos sobre diseño de sistemas de energía y finalmente se entregan recomendaciones para quienes quieran seguir indagando en sistemas más sustentables. En particular, se concluye que: (i) los modelos actuales de demanda de energía para la producción de cobre son demasiado simplistas y deben mejorarse para la planificación con altos niveles de tecnologías renovables; (ii) los sistemas multivectoriales deben modelarse explícitamente para captar la flexibilidad fácilmente disponible del sistema; y, (iii) existe una flexibilidad operativa en las plantas de cobre existentes, que debe comprenderse y evaluarse mejor.

Adicionalmente, en [16], se recalca como motivación que la implementación de la gestión de la demanda plantea nuevos retos en el diseño de concentradoras de cobre y la explotación de las minas, y puede repercutir en la integración de las energías renovables en el proceso. De hecho, con la aplicación de la DSM se puede conseguir una mayor integración de la energía solar en el norte de Chile, por lo que es más valioso aún considerarla. Acorde a ello, se propone una estrategia operacional en el proceso, donde el mineral de más dureza es molido durante el día para aprovechar la disponibilidad de energía máxima del ciclo con el fin de reducir significativamente la necesidad de baterías. De esta manera, el sistema integrado de la operación de los paneles solares fotovoltaicos y baterías del molino semi-autógeno utilizado es exitoso y ve exacerbado su efecto de reducción de costos de la energía cuando se implementa una estrategia de DSM.

Por su parte, en [17] se evalúa integrar la tecnología de energía solar concentrada a través de central tower plants (CTP), para aprovechar la concentración de calor solar para abastecer de energía termal el precalentamiento del blast en las fundiciones. Se entregan diferentes modos

de operar la etapa de fusión variando la fracción de precalentamiento del blast compuesto por aire sin oxígeno industrial, y luego con el uso de combustible fósil y oxígeno industrial. La conclusión de este estudio, es que es posible reducir el requerimiento energético de la fusión a la mitad, mediante el uso de energía termal proveniente de las CTP al precalentar el blast de entrada, sin la necesidad de incluir oxígeno industrial, pero usando combustible fósil.

En el contexto de una planta china de producción de hierro y acero de ruta larga se plantea un problema de optimización para disminuir el uso de energía y emisiones de  $CO_2$ , combinando la operación con vectores energéticos de la misma, como gases de subproductos, red de vapor y electricidad [18]. Para la planta, al ser de gran escala y complejidad, se modela cada proceso separada y detalladamente. Dentro de ellos, se encuentra una sección para la producción de acero crudo y sus hornos utilizados. La elección de variables se realizó con base en correlaciones y datos empíricos de la planta; las ecuaciones para generar el modelo de la producción del acero crudo son los balances de masa y energía. Debido a que la optimización es en una red compleja y grande, los escenarios posibles del modelo de la producción de acero crudo son considerados directamente dentro de la programación. Finalmente, luego de la implementación completa, el consumo de energía óptimo con el total de la emisión directa de  $CO_2$  por unidad másica de producto disminuyeron un 14,07 % y un 6,65 %, respectivamente.

Respecto a [16], su metodología fundamenta lineamientos importantes para el diseño de procesos en la minería del cobre, que se aplica específicamente en la conminución, logrando que un acople a la disponibilidad de energía solar. Además, consolida que la gestión de la demanda acentúa los efectos beneficiosos en la disminución de su consumo eléctrico. En particular, el modelo de [17] tiene bajo alcance, ya que únicamente abarca la operación de la fusión, dejando de lado el resto de las operaciones de la fundición. Sin embargo, su idea de proponer modos de operación es interesante y se alinea como precedente al propósito de este trabajo. Finalmente, el modelo de la planta de hierro y acero es . . . . . Con todo lo anterior, se puede notar que la flexibilidad operacional en la industria del cobre, en específico para la fundición, ha sido vagamente modelada hasta el momento y sólo algunos de los estudios encontrados en otros contextos, abordan mejorar la gestión de su consumo para la integración del suministro de energías renovables variables.

### 2.3. Antecedentes

Este trabajo de título se enmarca en un proyecto de mayor alcance en el que se ha desarrollado una herramienta de optimización para diseñar un sistema energético. Con ella, es posible minimizar los costes de inversión y funcionamiento de un sistema eléctrico, decidiendo las capacidades de las tecnologías de almacenamiento y fuentes renovables, para encontrar la combinación óptima de almacenamiento de energía. Dicha herramienta es llamada *Long-term Energy Expansion Linear Optimization* (LEELO). Como caso de estudio, se ha utilizado para proponer un sistema energético de Chile en 2050 frente a una participación proyectada exclusiva de energías renovables no convencionales [19].

Esta herramienta ha sido validada en diferentes publicaciones. En ellas sus autores han realizado versiones incrementales del modelo, incorporando nuevas opciones para abastecimiento, almacenamiento e incluso sinergias con plantas productivas como con

desalinizadoras de agua de mar [20]. Considerando lo anterior, se destaca que este trabajo también propone bases para una próxima versión incremental, entregando un modelo energético flexible para la operación de las fundiciones. Así, posteriormente, sería posible incorporarlo dentro de LEELO, cumpliendo con dos interesantes alcances: el primero, diseñar una red energética para Chile en 2050 incluyendo esta sinergia industrial; el segundo es que al hacer lo anterior, se realizaría gestión de la demanda para las fundiciones.

# Capítulo 3

## Demanda energética de la fundición de cobre

### 3.1. Operaciones unitarias en la fundición de cobre

Para determinar la demanda energética del proceso de fundición, en primer lugar, se define el límite de batería del proceso. Luego de ello, se definen detalladamente las condiciones de operación de cada etapa, sus corrientes y las especies que las componen. La figura 3.1 presenta el proceso piro-metalúrgico de fundición de cobre considerado en este trabajo, una versión extendida del mismo se puede encontrar en el anexo A.

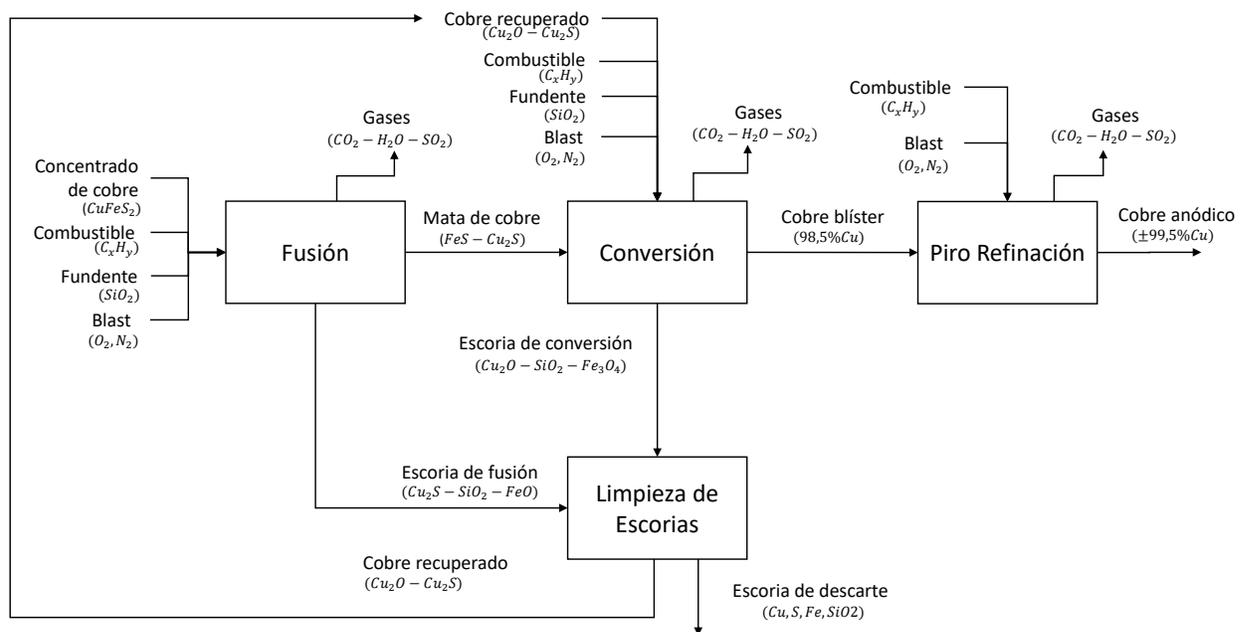


Figura 3.1: Diagrama de bloques del proceso de vía piro-metalúrgica del cobre. Elaboración propia.

Se puede ver en el diagrama que el proceso considerado comienza con la fusión. En ésta etapa el concentrado de cobre ( $CuFeS_2$ ) es fundido y transformado en mata de cobre ( $FeS - Cu_2S$ ) debido a la acción del oxígeno ( $O_2$ ) y el fundente ( $SiO_2$ ). Lo anterior se logra

con una temperatura aproximada de  $1230^{\circ}\text{C}$  que es posible debido al calor liberado por las reacciones exotérmicas que ocurren dentro del horno y al combustible alimentado ( $C_xH_y$ ). Debido a esta transformación también se generan gases como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ), y escoria de fusión ( $FeO - SiO_2$ ).

La mata de cobre ( $FeS - Cu_2S$ ) luego ingresa a la etapa de conversión, en ella nuevamente se busca separar el cobre de las otras especies. Debe haber una temperatura de  $1230^{\circ}\text{C}$ , ingresar combustible, fundente y oxígeno industrial, produciéndose así cobre blíster con una pureza de 98,5%, gases de combustión ( $CO_2$ ,  $SO_2$  y  $H_2O$ ) y escoria de conversión ( $Fe_3O_4 - SiO_2$ ). La escoria proveniente de la fusión y de la conversión se va a la etapa limpieza de escorias en la que se realiza la separación entre el cobre, arrastrado (gotas) y disuelto (iones), y la escoria, con el fin de recircularlo a la conversión. En esta etapa, se producen gases de combustión, como dióxido de carbono y vapor de agua, y escoria de descarte ( $> 0,5\% Cu$ ).

El cobre blíster sigue por la etapa de piro-refinación. En esta etapa, el objetivo es extraer los restos de oxígeno presentes en el cobre fundido, y así lograr purificar aún más el mineral (99,5%  $Cu$ ). Lo anterior se logra debido a la reducción del oxígeno con combustible. Después de esta etapa, el cobre fundido es moldeado en ánodos de cobre que se pueden vender en ese formato o entrar a la electro-refinación (figura 2.2).

Por su parte, el oxígeno industrial que se suministra al proceso proviene de un módulo compacto que aspira aire y lo impulsa al interior, hacia dos adsorbedores y un tanque acumulador de oxígeno, que permite una producción continua. Se debe notar que el detalle de este proceso no es relevante para entender el desarrollo de los objetivos, por lo que no se abordará en este trabajo. En su defecto, se presenta un esquema del módulo en el anexo C.

## 3.2. Diagnóstico energético de la fundición de cobre

Desde una perspectiva más amplia, es posible notar que el proceso de fundición posee diferentes flujos de materia y energía, como se aprecia en la figura 3.2. Los flujos de entrada son concentrado de cobre ( $CuFeS_2$ ), fundente ( $SiO_2$ ), combustible ( $C_xH_y$ ) y oxígeno industrial (*blast*), que puede estar a temperatura ambiente o superior, de acuerdo con el calor de precalentado ( $Q_{prec}$ ) que se suministre previamente. Adicionalmente, el proceso requiere electricidad para i) granular corrientes intermedias como la mata y el blíster, ii) secar las mismas y la escoria de descarte, y iii) mover y filtrar los gases de salida ( $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ). Además, los flujos de salida son el producto de interés, ánodos de cobre de 99,5% de pureza, y residuos como la escoria y los gases de salida mencionados anteriormente. El diagrama de bloques que incluye todas las etapas, troncales y complementarias, se encuentra en el anexo A.

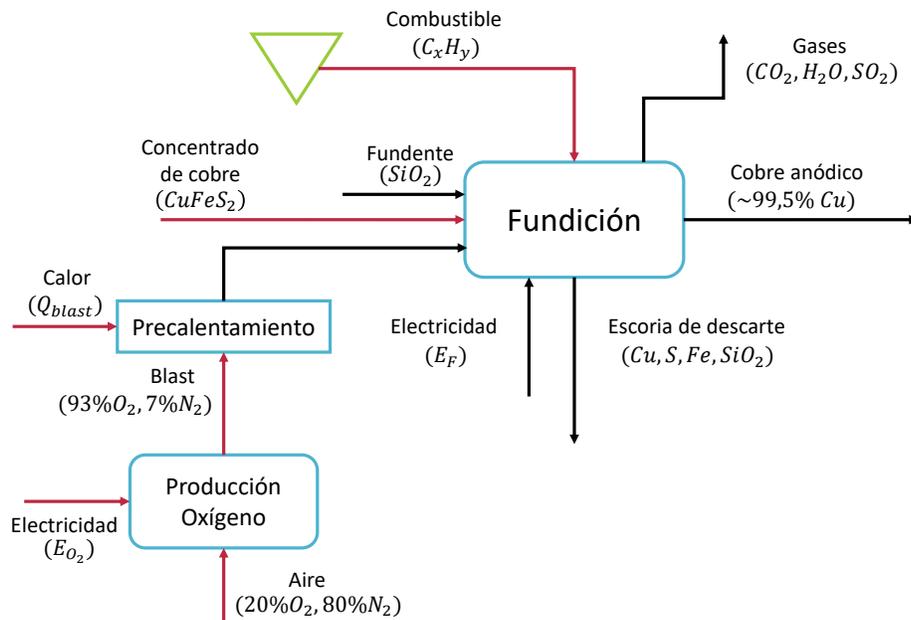


Figura 3.2: Entradas y salidas del proceso de fundición de cobre y de la planta de producción de oxígeno industrial. En rojo se destacan los afluentes clave en términos de abastecimiento energético.

De lo anterior es importante destacar ciertos flujos de materia y energía, como combustible, oxígeno industrial y calor de precalentamiento, debido a que son variables con el potencial de adaptarse para brindar el flujo de energía neto requerido y obtener el producto deseado. Si bien, también se encuentran destacadas en rojo la electricidad para producir oxígeno enriquecido y la corriente de aire que alimenta esa unidad, el flujo de *blast* las contiene. Así mismo, a través del tiempo, es posible variar el nivel de producción, ajustando el flujo de concentrado de cobre, para variar el flujo de energía requerido. En síntesis, se contabilizan cuatro variables independientes para variar la demanda de energía del proceso, siendo consideradas en este trabajo las tres primeras mencionadas: combustible, oxígeno industrial y calor de precalentado.

# Capítulo 4

## Construcción de un modelo de demanda energética

Después de seleccionar las operaciones unitarias, los detalles de conversión y eficiencias de cada quedan definidos por la tecnología utilizada. Por simplicidad, se opta por el horno Flash Outokumpu debido a que ofrece operación continua. Luego es posible realizar los balances de masa para cada elemento ( $i$ ) y el balance de energía para las especies en la entrada ( $j$ ) y en la salida ( $k$ ), de cada operación unitaria ( $U$ ).

$$\frac{dm_{U,i}}{dt} = \dot{m}_{U,i,entrada} - \dot{m}_{U,i,salida} \quad (\forall i \forall U) \quad (4.1)$$

$$\frac{dH_U}{dt} = \sum_j H_{U,j,entrada} - \sum_k H_{U,k,salida} + Q \quad (\forall U) \quad (4.2)$$

Debido a que el régimen de operación es continuo, el proceso se encuentra en estado estacionario, por lo que el término de la derivada en el tiempo es nula (este y otros supuestos serán abordados dentro de cada operación unitaria en las secciones siguientes). Con lo anterior, las ecuaciones quedan como se presenta a continuación en 4.3 y 4.4.

$$0 = m_{U,i,entrada} - m_{U,i,salida} \quad (\forall i \forall U) \quad (4.3)$$

$$0 = \sum_j H_{j,entrada} - \sum_k H_{k,salida} + Q \quad (\forall U) \quad (4.4)$$

Luego, haciendo los supuestos correspondientes e imponiendo condiciones sobre los parámetros de las ecuaciones anteriores para cada caso, es posible que el sistema de ecuaciones sea lineal, lo que significa resolver la ecuación matricial 4.5.

$$A \vec{x} = \vec{b} \quad (4.5)$$

$$\vec{x} = A^{-1} \vec{b} \quad (|A| \neq 0) \quad (4.6)$$

En la ecuación anterior  $A$  es la matriz de coeficientes que contiene las composiciones de cada especie en cada corriente,  $\vec{x}$  el vector de flujos másicos u otras magnitudes relevantes y  $\vec{b}$  el vector con términos numéricos.

El sistema lineal de cada una de las operaciones unitarias fue resuelto para diferentes

combinaciones de combustible ( $m_{comb}$ ), oxígeno industrial ( $\dot{m}_{O_2}^{ind}$ ) y calor de precalentado del blast ( $Q_{blast}$ ). Dicha resolución se llevó a cabo en *MATLAB* y los códigos utilizados se encuentran en el anexo D. El detalle de las ecuaciones planteadas para cada operación unitaria de presenta en las siguientes secciones.

## 4.1. Fusión

El diagrama de bloques de la fusión se presenta en la Figura 4.1 como apoyo para entender las ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de energía que se detallan en esta sección.

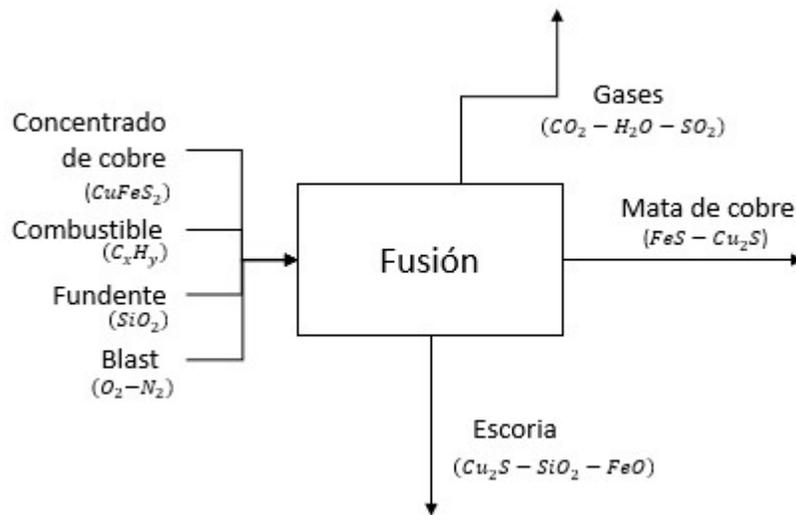


Figura 4.1: Diagrama de bloques fusión.

Antes de indagar en las ecuaciones que modelan el sistema, es necesario considerar que se tomaron supuestos que pueden alejar los resultados de la realidad. Estos supuestos son:

1. El equipo con el que se concibe este modelo corresponde a un horno Flash Outokumpu, de régimen de operación continuo, por lo que los parámetros utilizados son acordes a él.
2. La temperatura de salida es igual a 1227 °C[21].
3. Todas las entradas a esta operación se encuentran a temperatura de 25°C[21].
4. El combustible utilizado es gas natural.
5. El mineral en el concentrado de cobre que entra a la fusión está compuesto únicamente por calcopirita ( $CuFeS_2$ ) y no contiene agua.
6. La pérdida de calor por radiación, convección y conducción en el horno de fusión es constante e igual a  $500 \left( \frac{MJ}{t_{concentrado\ Cu}} \right)$  [21].
7. No se forman costras u otras obstrucciones sólidas que puedan disminuir la eficiencia del proceso.

8. El grado de la mata de cobre es constante a la salida del horno de fusión y tiene un valor de  $0,6 \left( \frac{kg_{Cu}}{kg_{mata}} \right)$  [21].
9. La mata de cobre está compuesta sólo por  $FeS$  y  $Cu_2S$ .
10. La escoria sólo contiene a las especies  $Cu_2S$ ,  $Cu$ ,  $SiO_2$  y  $FeO$ .
11. Los gases generados en la fusión corresponden únicamente a las especies  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ .

#### 4.1.1. Balances de masa

##### 4.1.1.1. Balance de masa del cobre

$$w_{\left(\frac{Cu}{CuFeS_2}\right)} \dot{m}_{CuFeS_2} = w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} \quad (4.7)$$

Donde:

- $w_{\left(\frac{Cu}{CuFeS_2}\right)}$ : Masa relativa de cobre  $Cu$  en calcopirita  $CuFeS_2$ .
- $\dot{m}_{CuFeS_2}$ : Flujo másico de calcopirita en la entrada [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre  $Cu$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la mata [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en escoria de salida [kg/h].

##### 4.1.1.2. Balance de masa del hierro

$$w_{\left(\frac{Fe}{CuFeS_2}\right)} \dot{m}_{CuFeS_2} = w_{\left(\frac{Fe}{FeS}\right)} \dot{m}_{FeS}^{mata} + w_{\left(\frac{Fe}{FeO}\right)} \dot{m}_{FeO}^{escoria} \quad (4.8)$$

Donde:

- $w_{\left(\frac{Fe}{CuFeS_2}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en calcopirita  $CuFeS_2$ .
- $\dot{m}_{CuFeS_2}$ : Flujo másico de calcopirita en la entrada [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Fe}{FeS}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en sulfuro de hierro  $FeS$ .
- $\dot{m}_{FeS}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de hierro en mata [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Fe}{FeO}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en óxido de ferroso  $FeO$ .
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en escoria [kg/h].

#### 4.1.1.3. Balance de masa del azufre

$$w_{\left(\frac{S}{CuFeS_2}\right)} \dot{m}_{CuFeS_2} = w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} + w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + w_{\left(\frac{S}{FeS}\right)} \dot{m}_{FeS}^{escoria} + w_{\left(\frac{S}{SO_2}\right)} \dot{m}_{SO_2,1} \quad (4.9)$$

Donde:

- $w_{\left(\frac{S}{CuFeS_2}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en calcopirita  $CuFeS_2$ .
- $\dot{m}_{CuFeS_2}$ : Flujo másico de calcopirita en la entrada [kg/h].
- $w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la mata [kg/h].
- $w_{\left(\frac{S}{FeS}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en sulfuro de hierro  $FeS$ .
- $\dot{m}_{FeS}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de hierro en la escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{S}{SO_2}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2}$ : Flujo másico de dióxido de azufre en la escoria [kg/h].

#### 4.1.1.4. Balance de masa del oxígeno

$$\dot{m}_{O_2}^{blast,2} = w_{\left(\frac{O}{FeO}\right)} \dot{m}_{FeO}^{escoria} + w_{\left(\frac{O}{CO_2}\right)} \dot{m}_{CO_2} + w_{\left(\frac{O}{H_2O}\right)} \dot{m}_{H_2O} + w_{\left(\frac{O}{SO_2}\right)} \dot{m}_{SO_2} \quad (4.10)$$

Donde:

- $\dot{m}_{O_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{FeO}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido ferroso  $FeO$ .
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en la escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{CO_2}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de carbono  $CO_2$ .
- $\dot{m}_{CO_2}$ : Flujo másico de dióxido de carbono gaseoso [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{H_2O}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en agua  $H_2O$ .
- $\dot{m}_{H_2O}$ : Flujo másico de agua gaseosa [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{SO_2}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2}$ : Flujo másico de dióxido de azufre gaseoso [kg/h].

#### 4.1.1.5. Balance de masa $SiO_2$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{SiO_2}^{entrada} &= \dot{m}_{SiO_2}^{salida} \\ \dot{m}_{SiO_2} &:= \dot{m}_{SiO_2}^{entrada}\end{aligned}\quad (4.11)$$

Donde:

- $\dot{m}_{SiO_2}^{entrada}$ : Flujo másico de óxido de silicio en la entrada [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^{salida}$ : Flujo másico de óxido de silicio en la salida [kg/h].

#### 4.1.1.6. Balance de masa del nitrógeno

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,2} = \dot{m}_{N_2} \quad (4.12)$$

Donde:

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de nitrógeno en blast [kg/h].
- $\dot{m}_{N_2}$ : Flujo másico de nitrógeno en la salida de la fusión [kg/h].

#### 4.1.1.7. Balance de masa del carbono

$$r_{\left(\frac{C}{combustible}\right)} \dot{m}_{combustible} = w_{\left(\frac{C}{CO_2}\right)} \dot{m}_{CO_2} \quad (4.13)$$

Donde:

- $r_{\left(\frac{C}{combustible}\right)}$ : Contenido de carbono en combustible.
- $\dot{m}_{combustible}$ : Flujo másico de combustible [kg/h].
- $w_{\left(\frac{C}{CO_2}\right)} \dot{m}_{CO_2}$ : Masa relativa de carbono en dióxido de carbono.

#### 4.1.1.8. Balance de masa del hidrógeno

$$r_{\left(\frac{H}{combustible}\right)} \dot{m}_{combustible} = w_{\left(\frac{H}{H_2O}\right)} \dot{m}_{H_2O} \quad (4.14)$$

Donde:

- $r_{\left(\frac{H}{combustible}\right)}$ : Contenido de hidrógeno en combustible.
- $\dot{m}_{combustible}$ : Flujo másico de combustible [kg/h].
- $w_{\left(\frac{H}{H_2O}\right)} \dot{m}_{H_2O}$ : Masa relativa de hidrógeno en agua.

## 4.1.2. Otras relaciones másicas importantes

### 4.1.2.1. Relación $FeO/SiO_2$

$$\dot{m}_{SiO_2}^{escoria} = r_{FeO-SiO_2} \dot{m}_{FeO}^{escoria} \quad (4.15)$$

Donde:

- $\dot{m}_{SiO_2}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido de sílice en escoria [kg/h].
- $r_{FeO-SiO_2}$ : Relación másica entre óxido ferroso y óxido de sílice.
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en la escoria [kg/h].

### 4.1.2.2. Grado de Cu en la mata

$$x_{Cu} \dot{m}_{mata} = w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} \quad (4.16)$$

Donde:

- $x_{Cu}$ : Contenido de cobre en la mata.
- $\dot{m}_{mata}$ : Flujo másico de mata [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre en sulfuro de cobre.
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la mata [kg/h].

### 4.1.2.3. Masa de mata

$$\dot{m}_{mata} = \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + \dot{m}_{FeS}^{mata} \quad (4.17)$$

Donde:

- $\dot{m}_{mata}$ : Flujo másico de mata [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en mata [kg/h].
- $\dot{m}_{FeS}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de hierro en mata [kg/h].

### 4.1.2.4. Cobre arrastrado en escoria de fusión

$$w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} = -r_{Cu}^{escoria} \dot{m}_{escoria} \quad (4.18)$$

Donde:

- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre en sulfuro de cobre.
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en escoria [kg/h].
- $r_{Cu}^{escoria}$ : Contenido de cobre arrastrado en escoria.
- $\dot{m}_{escoria}$ : Flujo másico de escoria [kg/h].

#### 4.1.2.5. Composición de escoria

$$\dot{m}_{escoria} = \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} + \dot{m}_{FeO}^{escoria} + \dot{m}_{SiO_2}^{salida} \quad (4.19)$$

Donde:

- $\dot{m}_{escoria}$ : Flujo másico de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^{salida}$ : Flujo másico de óxido de sílice en la salida [kg/h].

#### 4.1.3. Balance de energía

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CuFeS_2} \Delta H_{CuFeS_2}^{25^\circ C} + \dot{m}_{combustible,1} \Delta H_{combustible,1}^{25^\circ C} + \dot{m}_{SiO_2} \Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C} + Q_{blast,1} = \\ \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} \Delta H_{Cu_2S}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{FeS}^{mata} \Delta H_{FeS}^{1227^\circ C} + \\ \dot{m}_{FeO}^{escoria} \Delta H_{FeO}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{SiO_2} \Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C} + \\ \dot{m}_{CO_2} \Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{H_2O} \Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{SO_2} \Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{N_2} \Delta H_{N_2}^{1227^\circ C} + Q_{pérdida,1} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Donde:

- $Q_{blast,1}$ : Calor de precalentado del blast
- $\Delta H_i^{25^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $i$  en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atm y 25°C) [MJ/kg].
- $\Delta H_j^{1227^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $j$  más la entalpía adicional por aumento de temperatura a 1227°C [MJ/kg].

#### 4.1.4. Requerimiento de oxígeno

##### 4.1.4.1. Flujo másico oxígeno industrial

$$\dot{m}_{O_2}^{blast,1} = R_{O_2}^{ind} \dot{m}_{O_2}^{ind,1} + R_{O_2}^{aire} \dot{m}_{O_2}^{aire,1} \quad (4.21)$$

Donde:

- $\dot{m}_{O_2}^{blast,1}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la fusión [kg/h].
- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,1}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la fusión [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}_{O_2}^{aire,1}$ : Flujo másico de aire en la fusión [kg/h].

#### 4.1.4.2. Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,1} = (1 - R_{O_2}^{ind})\dot{m}_{O_2}^{ind,1} + (1 - R_{O_2}^{aire})\dot{m}^{aire,1} \quad (4.22)$$

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,1}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la fusión [kg/h].
- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,1}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la fusión [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}^{aire,1}$ : Flujo másico de aire en la fusión [kg/h].

Luego de definir las variables, como los flujos másicos de la entrada y salida, y los parámetros del sistema como eficiencias del proceso y relaciones entre los flujos, se despejan las variables, que finalmente corresponden a las componentes del vector  $\vec{x}$ . A continuación se presenta la matriz  $(b|A)$  que contiene el sistema de la fusión, siendo la primera fila el vector  $\vec{x}$ , la columna de términos numéricos el vector  $\vec{b}$  y de ahí en adelante, los coeficientes que conforman  $A$ . Los valores de los parámetros utilizados se encuentran en el anexo B.

Tabla 4.1: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de fusión. A su vez, para mayor comprensión, se detalla en la primera columna las ecuaciones a las que corresponden cada una de las filas, y, en la primera fila, las variables del sistema. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero asociado.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast,1}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast,1}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{entrada}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$	$\dot{m}_{FeS}^{mata}$	$\dot{m}_{mata}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$	$\dot{m}_{FeO}^{escoria}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{salida}$	$\dot{m}_{escoria}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,1}$	$\dot{m}_{aire,1}$
4.7	$w_{(Cu)} \dot{m}_{CuFeS_2}$				$w_{(Cu)} \dot{m}_{Cu_2S}$			$w_{(Cu)} \dot{m}_{Cu_2S}$										
4.8	$w_{(Fe)} \dot{m}_{CuFeS_2}$				$w_{(Fe)} \dot{m}_{CuFeS_2}$			$w_{(Fe)} \dot{m}_{FeO}$										
4.9	$w_{(S)} \dot{m}_{CuFeS_2}$				$w_{(S)} \dot{m}_{CuFeS_2}$			$w_{(S)} \dot{m}_{Cu_2S}$				$w_{(S)} \dot{m}_{SO_2}$						
4.10		-1						$w_{(O)} \dot{m}_{FeO}$				$w_{(O)} \dot{m}_{SO_2}$		$w_{(O)} \dot{m}_{CO_2}$	$w_{(O)} \dot{m}_{H_2O}$			
4.11				-1						1								
4.12			-1										1					
4.13												$w_{(C)} \dot{m}_{CO_2}$				$-r_{(C)} \dot{m}_{combustible}$		
4.14														$w_{(H)} \dot{m}_{H_2O}$		$-r_{(H)} \dot{m}_{combustible}$		
4.15								$-r_{FeO-SiO_2}$	-1									
4.19					-1	-1	-1											
4.16					$-w_{(Cu)} \dot{m}_{Cu_2S}$		$x_{Cu}$											
4.18								$w_{(Cu)} \dot{m}_{Cu_2S}$										
4.15								1	1	1	-1							
	$\dot{m}_{combustible}$															1		
4.20	$Q_{blast,1}^+ - m_{CuFeS_2} \Delta H_{CuFeS_2}^{25^\circ C} - Q_{pérdida,1}$			$-\Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C}$	$\Delta H_{Cu_2S}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{FeS}^{1227^\circ C}$		$\Delta H_{Cu_2S}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{FeO}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C}$		$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	$-\Delta H_{combustible,1}^{25^\circ C}$		
4.21		-1															$R_{O_2}^{ind}$	$R_{O_2}^{aire}$
4.22			-1														$(1 - R_{O_2}^{ind})$	$(1 - R_{O_2}^{aire})$

Tabla 4.2: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de fusión. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast,2}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast,2}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{entrada}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$	$\dot{m}_{FeS}^{mata}$	$\dot{m}_{mata}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$	$\dot{m}_{FeO}^{escoria}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{salida}$	$\dot{m}_{escoria}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,1}$	$\dot{m}_{aire,1}$
4.7	3465																	
4.8	3045				0,80			0,80										
4.9	3490					0,64		0,78										
4.10					0,20	0,36		0,20				0,50						
4.11		-1,00						0,22				0,50		0,73	0,89			
4.12				-1,00						1,00								
4.13			-1,00										1,00					
4.14														0,27			-0,77	
4.15															0,11		-0,24	
4.17								-0,43	1,00									
4.16					-1,00	-1,00	1,00											
4.18					-0,80		0,60											
4.19								0,80				-0,02						
	$\dot{m}_{combustible}$							1,00	1,00	1,00	-1,00							
4.20	$Q_{blast,1} - 1540$			15,16	0,25	0,11		0,25	-2,49	-13,70		-3,66	1,36	-7,54	-10,75	4,13		
4.21		-1,00															0,95	0,23
4.22			-1,00														0,05	0,77

## 4.2. Conversión

El diagrama de bloques de la conversión se presenta en la figura 4.2 como apoyo para entender las ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de energía que se detallan en esta sección.

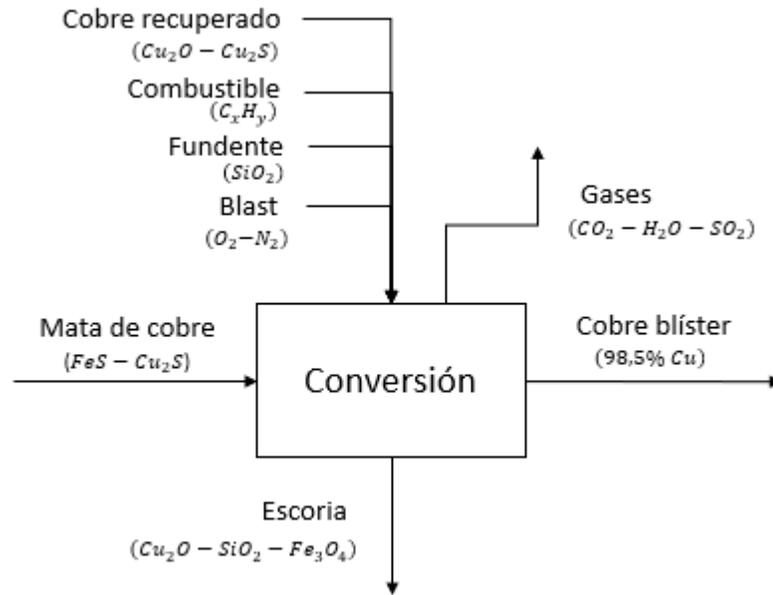


Figura 4.2: Diagrama de bloques conversión.

Además de los supuestos realizados en la fusión que involucran a esta etapa, se realizaron los siguientes:

1. Al igual que en la fusión, el equipo donde se concibe este modelo corresponde a un horno Flash Outokumpu, por lo que los parámetros utilizados son acordes a él.
2. Esta etapa tiene una temperatura de operación de 1227 °C[21].
3. Todas las corrientes de entrada están a 25°C. Los flujos de mata entran sólidos y molidos a esa temperatura, ya que es un requerimiento de utilizar el horno Flash [21].
4. El combustible utilizado es gas natural.
5. La pérdida de calor por radiación, convección y conducción ( $Q_{pérdida}$ ) en el horno de conversión es constante e igual a  $249 \left(\frac{MJ}{t_{mata}}\right)$ . Este supuesto es el mismo que se aplicó en el horno de fusión, pero en proporción a la mata.
6. La corriente de cobre recuperado contiene óxido cuproso ( $Cu_2O$ ) y sulfuro de cobre ( $Cu_2S$ ).
7. El flujo másico de óxido cuproso ( $Cu_2O$ ) arrastrado en la escoria corresponde al 18 % de dicha corriente [21].
8. La corriente de cobre blíster alcanza una pureza de 98,5 % de Cu, el 1,5 % restante es principalmente oxígeno [21].

9. La escoria de la conversión está conformada únicamente por  $Cu_2O$ ,  $SiO_2$  y  $Fe_3O_4$ , en las proporciones acordes con el anexo B.
10. Los gases producidos en esta etapa son únicamente  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ .

A continuación, se presentan las ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de entalpía de la conversión.

#### 4.2.1. Balances de masa

##### 4.2.1.1. Balance de masa del cobre

$$w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}\dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)}\dot{m}_{Cu_2O}^{rec} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}\dot{m}_{Cu_2S}^{rec} = \dot{m}_{Cu^0}^{blister} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)}\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} \quad (4.23)$$

Donde:

- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre ( $Cu$ ) en sulfuro de cobre ( $Cu_2S$ ).
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la mata [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)}$ : Masa relativa de cobre ( $Cu$ ) en óxido cuproso ( $Cu_2O$ ).
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre recuperado [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre recuperado [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso en escoria de salida [kg/h].

##### 4.2.1.2. Balance de masa del hierro

$$w_{\left(\frac{Fe}{FeS}\right)}\dot{m}_{FeS}^{mata} = w_{\left(\frac{Fe}{Fe_3O_4}\right)}\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} \quad (4.24)$$

- $w_{\left(\frac{Fe}{FeS}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en sulfuro de hierro ( $FeS$ ).
- $\dot{m}_{FeS}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de hierro [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Fe}{Fe_3O_4}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en óxido ferroso-férrico ( $Fe_3O_4$ ).
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido de ferroso-férrico [kg/h].

##### 4.2.1.3. Balance de masa del azufre

$$w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}\dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}\dot{m}_{Cu_2S}^{rec} + w_{\left(\frac{S}{FeS}\right)}\dot{m}_{FeS}^{mata} = w_{\left(\frac{S}{SO_2}\right)}\dot{m}_{SO_2,2} \quad (4.25)$$

- $w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $w_{\left(\frac{S}{FeS}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en sulfuro de hierro  $FeS$ .

- $\dot{m}_{FeS}^{mata}$ : Flujo másico de sulfuro de hierro en la mata [kg/h].
- $w_{(\frac{S}{SO_2})}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2,2}$ : Flujo másico de dióxido de azufre en la conversión [kg/h].

#### 4.2.1.4. Balance de masa del oxígeno

$$\dot{m}_{O_2}^{blast,2} + w_{(\frac{O}{Cu_2O})} \dot{m}_{Cu_2O}^{rec} = w_{(\frac{O}{Fe_3O_4})} \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} + w_{(\frac{O}{Cu_2O})} \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} + w_{(\frac{O}{CO_2})} \dot{m}_{CO_2,2} + w_{(\frac{O}{H_2O})} \dot{m}_{H_2O,2} + w_{(\frac{O}{SO_2})} \dot{m}_{SO_2,2} \quad (4.26)$$

- $\dot{m}_{O_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de  $O_2$  en la corriente de blast de la conversión [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{Cu_2O})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido cuproso  $Cu_2O$ .
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$ : Flujo másico de óxido cuproso en la corriente de cobre recuperado [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{Fe_3O_4})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido ferroso-férrico  $Fe_3O_4$ .
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso-férrico (III) [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{Cu_2O})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido cuproso  $Cu_2O$ .
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{CO_2})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de carbono  $CO_2$ .
- $\dot{m}_{CO_2,2}$ : Flujo másico de dióxido de carbono en la conversión [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{H_2O})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{H_2O,2}$ : Flujo másico de agua en la conversión [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{SO_2})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2,2}$ : Flujo másico de dióxido de azufre en la conversión [kg/h].

#### 4.2.1.5. Balance de masa $SiO_2$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{SiO_2}^{entrada,2} &= \dot{m}_{SiO_2}^{salida,2} \\ \dot{m}_{SiO_2} &:= \dot{m}_{SiO_2}^{entrada,2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

- $\dot{m}_{SiO_2}^{entrada,2}$ : Flujo másico de sílice (óxido de silicio) en la entrada de la conversión [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^{salida,2}$ : Flujo másico de sílice (óxido de silicio) en la salida de la conversión [kg/h].

#### 4.2.1.6. Balance de masa del nitrógeno

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,2} = \dot{m}_{N_2,2} \quad (4.28)$$

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de  $N_2$  en la corriente de blast de la conversión [kg/h].
- $\dot{m}_{N_2,2}$ : Flujo másico de nitrógeno a la salida de la conversión [kg/h].

#### 4.2.1.7. Balance de masa del carbono

$$r_{\left(\frac{C}{combustible}\right)} \dot{m}_{combustible,2} = w_{\left(\frac{C}{CO_2}\right)} \dot{m}_{CO_2,2} \quad (4.29)$$

- $r_{\left(\frac{C}{combustible}\right)}$ : Composición de carbono  $C$  en combustible (gas natural).
- $\dot{m}_{combustible,2}$ : Flujo másico de combustible en la conversión [kg/h].
- $w_{\left(\frac{C}{CO_2}\right)}$ : Masa relativa de carbono  $C$  en dióxido de carbono  $CO_2$ .
- $\dot{m}_{CO_2,2}$ : Flujo másico de dióxido de carbono en la conversión [kg/h].

#### 4.2.1.8. Balance de masa del hidrógeno

$$r_{\left(\frac{H}{combustible}\right)} \dot{m}_{combustible,2} = w_{\left(\frac{H}{H_2O}\right)} \dot{m}_{H_2O,2} \quad (4.30)$$

- $r_{\left(\frac{H}{combustible}\right)}$ : Composición de hidrógeno en combustible (gas natural).
- $\dot{m}_{combustible,2}$ : Flujo másico de combustible en la conversión [kg/h].
- $w_{\left(\frac{H}{H_2O}\right)}$ : Masa relativa de hidrógeno  $H$  en agua  $H_2O$ .
- $\dot{m}_{H_2O,2}$ : Flujo másico de agua en la conversión [kg/h].

### 4.2.2. Otras relaciones másicas importantes

#### 4.2.2.1. Masa escoria

$$\dot{m}_{escoria} = \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} + \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} + \dot{m}_{SiO_2}^{escoria} \quad (4.31)$$

- $\dot{m}_{escoria}$ : Flujo másico total de la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso en la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso-férrico en la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^{escoria}$ : Flujo másico de sílica en la corriente de escoria [kg/h].

#### 4.2.2.2. Relación $Fe_3O_4/SiO_2$

$$\dot{m}_{SiO_2}^{escoria} = r_{\left(\frac{Fe_3O_4}{SiO_2}\right)} \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} \quad (4.32)$$

- $\dot{m}_{SiO_2}^{escoria}$ : Flujo másico de sílica en escoria [kg/h].
- $r_{\left(\frac{Fe_3O_4}{SiO_2}\right)}$ : Razón entre contenido óxido ferroso-férrico y sílica en la corriente de escoria.
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido de hierro (III) en escoria [kg/h].

#### 4.2.2.3. Cobre arrastrado en escoria de conversión

$$\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} = r_{\left(\frac{Cu_2O}{escoria}\right)} \dot{m}_{escoria} \quad (4.33)$$

- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso en escoria [kg/h].
- $r_{\left(\frac{Cu_2O}{escoria}\right)}$ : Razón de cobre arrastrado en escoria de conversión.
- $\dot{m}_{escoria}$ : Flujo másico total de escoria [kg/h].

### 4.2.3. Balance de energía

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{Cu_2S}^{rec} \Delta H_{Cu_2S}^{25^\circ C} + \dot{m}_{Cu_2O}^{rec} \Delta H_{Cu_2O}^{25^\circ C} + \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} \Delta H_{Cu_2S}^{25^\circ C} + \dot{m}_{FeS}^{mata} \Delta H_{FeS}^{25^\circ C} + \\ & \dot{m}_{SiO_2}^{escoria} \Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C} + \dot{m}_{combustible} \Delta H_{combustible}^{25^\circ C} + Q_{blast,2} = \\ & \dot{m}_{Cu^0}^{blister} \Delta H_{Cu^0}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} \Delta H_{Cu_2O}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} \Delta H_{Fe_3O_4}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{SiO_2}^{escoria} \Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C} + \\ & \dot{m}_{CO_2} \Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{H_2O} \Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{SO_2} \Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{N_2} \Delta H_{N_2}^{1227^\circ C} + Q_{pérdida,2} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Donde:

- $Q_{blast,2}$ : Calor de precalentado del blast de la conversión  $\left[\frac{MJ}{t_{mata}}\right]$ .
- $\Delta H_i^{25^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $i$  en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atm y  $25^\circ C$ )  $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ .
- $\Delta H_j^{1227^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $j$  más la entalpía adicional por aumento de temperatura a  $1227^\circ C$   $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ .

### 4.2.4. Requerimiento de oxígeno

#### 4.2.4.1. Flujo másico oxígeno industrial

$$\dot{m}_{O_2}^{blast,2} = R_{O_2}^{ind} \dot{m}_{O_2}^{ind,2} + R_{O_2}^{aire} \dot{m}_{aire,2} \quad (4.35)$$

- $\dot{m}_{O_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la conversión [kg/h].

- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,2}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la conversión [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}_{O_2}^{aire,2}$ : Flujo másico de aire en la conversión [kg/h].

#### 4.2.4.2. Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,2} = (1 - R_{O_2}^{ind})\dot{m}_{O_2}^{ind,2} + (1 - R_{O_2}^{aire})\dot{m}_{O_2}^{aire,2} \quad (4.36)$$

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,2}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la conversión [kg/h].
- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,2}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la conversión [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}_{O_2}^{aire,2}$ : Flujo másico de aire en la conversión [kg/h].

#### 4.2.5. Reciclo desde limpieza de escorias

Para facilitar la lectura de las siguientes ecuaciones se recomienda ver las figuras 3.1 y 4.3.

##### 4.2.5.1. Cobre recuperado en forma de $Cu_2O$

$$\dot{m}_{Cu_2O}^{rec} = \beta \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} \quad (4.37)$$

- $\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$ : Flujo másico de óxido cuproso en corriente de cobre recuperado [kg/h].
- $\beta$ : Razón de recuperación de cobre.
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso en corriente de escoria [kg/h].

##### 4.2.5.2. Cobre recuperado en forma de $Cu_2S$

$$\dot{m}_{Cu_2S}^{rec} = \beta \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} \quad (4.38)$$

- $\dot{m}_{Cu_2S}^{rec}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en corriente de cobre recuperado [kg/h].
- $\beta$ : Razón de recuperación de cobre.
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en corriente de escoria [kg/h].

De esta forma, utilizando las ecuaciones presentadas, es equivalente escribir lo anterior como se muestra en las tablas 4.3 y 4.4:

Tabla 4.3: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de conversión. A su vez, para mayor comprensión, se detalla en la primera columna las ecuaciones a las que corresponden cada una de las filas, y, en la primera fila, las variables del sistema. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero asociado.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{fundente}$	$\dot{m}_{Cu^0}^{blister}$	$\dot{m}_{Fe_3O_4}$ <sup>escoria</sup>	$\dot{m}_{Cu_2O}$ <sup>escoria</sup>	$\dot{m}_{SiO_2}$ <sup>escoria</sup>	$\dot{m}_{escoria}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,2}$	$\dot{m}_{aire,2}$	$\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{rec}$
4.23	$w_{\frac{Cu_2}{Cu_2S}} \dot{m}_{Cu_2S}^{mata}$				1		$w_{\frac{Cu_2}{Cu_2O}}$										$-w_{\frac{Cu_2}{Cu_2O}}$	$-w_{\frac{Cu_2}{Cu_2S}}$
4.24	$w_{\frac{Fe}{FeS}} \dot{m}_{FeS}^{mata}$					$w_{\frac{Fe}{Fe_3O_4}}$												
4.25	$w_{\frac{S}{Cu_2S}} \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} + w_{\frac{S}{FeS}} \dot{m}_{FeS}^{mata}$									$w_{\frac{S}{SO_2}}$								$-w_{\frac{S}{Cu_2S}}$
4.26		-1				$w_{\frac{O}{Fe_3O_4}}$	$w_{\frac{O}{Cu_2O}}$			$w_{\frac{O}{SO_2}}$		$w_{\frac{O}{CO_2}}$	$w_{\frac{O}{H_2O}}$					
4.26				-1				1										
4.28			-1							1								
4.29												1		$-r_{\frac{C}{combustible}}$				
4.30													1	$-w_{\frac{H}{H_2O}}$				
4.31						-1	-1	-1	1									
4.32						$-r_{\frac{Fe_3O_4}{SiO_2}}$		1										
4.33							-1		$r_{\frac{Cu_2O}{escoria}}$									
	$\dot{m}_{combustible}$													1				
4.34	$Q_{blast,2} + \dot{m}_{Cu_2S}^{mata} \Delta H_{Cu_2S}^{25^\circ C} + \dot{m}_{FeS}^{mata} \Delta H_{FeS}^{25^\circ C} - Q_{perdida,2}$			$-\Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C}$	$\Delta H_{Cu^0}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{Fe_3O_4}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{Cu_2O}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C}$		$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	$-\Delta H_{combustible}^{25^\circ C}$			$-\Delta H_{Cu_2O}^{25^\circ C}$	$-\Delta H_{Cu_2S}^{25^\circ C}$
4.35		-1													$R_{O_2}^{ind}$	$R_{aire}^{aire}$		
4.36			-1												$(1 - R_{O_2}^{ind})$	$(1 - R_{aire}^{aire})$		
4.37																	1	
4.38	$\beta \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$																	1

Tabla 4.4: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de conversión. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{fundente}$	$\dot{m}_{Cu^0}^{blister}$	$\dot{m}_{Fe_3O-4}^{escoria}$	$\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$	$\dot{m}_{SiO_2}^{escoria}$	$\dot{m}_{escoria}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,2}$	$\dot{m}_{aire,2}$	$\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$	$\dot{m}_{Cu_2S}^{rec}$
4.23	298,69				1,00		0,89										-0,89	-0,80
4.24	79,23					0,72												
4.25	120,60									0,50								-0,20
4.26		-1,00				0,28	0,11			0,50		0,73	0,89					
4.27				-1,00				1,00										
4.28			-1,00								1,00							-0,01
4.29												0,27						-0,76
4.30													0,11					-0,23
4.31						-1,00	-1,00	-1,00	1,00									
4.32						-0,43		1,00										
4.33							1,00		-0,18									
	$\dot{m}_{combustible,2}$													1,00				
4.34	$Q_{blast,2} - 580,77$			15,16	0,75	-3,17	-0,07	-13,70		-3,66	1,37	-7,54	-10,75	4,13			1,18	0,50
4.36			-1,00												0,07	0,77		
4.37							-0,80										1,00	
4.38																		1,00
4.38	47,47																	1

### 4.3. Limpieza de Escorias

El cobre arrastrado en las escorias provenientes de la fusión y conversión posee dos formas físicas: la primera es iones disueltos y la segunda es en pequeñas gotas suspendidas. Para recuperarlo en cada una se puede utilizar la reducción de los cationes con hidrocarburos y la sedimentación, respectivamente. En este caso, debido a la disponibilidad de información y a la dificultad de realizar un modelo con mayor nivel de detalle, se considera que dentro de esta operación sólo ocurre la separación.

El diagrama de bloques de la etapa de limpieza de escorias se presenta en la figura 4.3 como apoyo para entender las ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de entalpía que se detallan en esta sección.

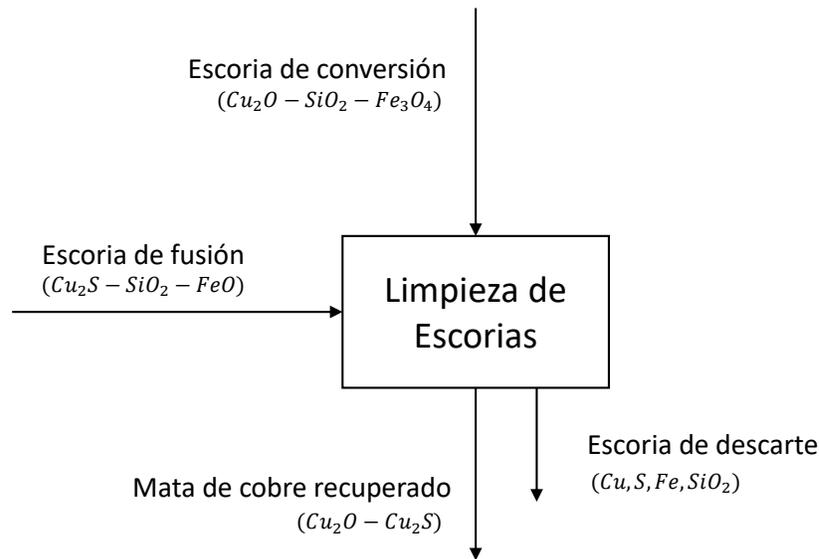


Figura 4.3: Diagrama de bloques limpieza de escorias.

Además de los supuestos anteriores que influyen en esta etapa, se realizaron los siguientes:

1. Como se mencionó al comienzo de la sección, en esta etapa se asume que sólo ocurre una sedimentación para recuperar el cobre suspendido en forma de pequeñas gotas suspendidas. Esto tiene dos consecuencias directas: en primer lugar, no se produce  $Cu^0$ , por lo que las salidas de cobre se encuentran únicamente como  $Cu_2O$  y  $Cu_2S$ ; en segundo lugar, disminuye el flujo de cobre que se puede recuperar. Adicionalmente, ocurre la separación entre los compuestos de cobre y el resto de las especies, que se constituye principalmente de  $SiO_2$ .
2. La temperatura de operación de la limpieza de escorias es la misma que en las operaciones anteriores ( $1227^\circ C$ ) y, a diferencia de ellas, no es necesario enfriar, solidificar y moler las entradas.
3. La sedimentación ocurre de manera similar para ambos compuestos cúpricos, por lo que su razón de recuperación ( $\beta = 0,8$ ) se simplifica considerando el mismo valor para ambas.

### 4.3.1. Balances de masa

#### 4.3.1.1. Balance de cobre

$$w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)} \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} = w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)} \dot{m}_{Cu_2O}^{rec} + w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{rec} + \dot{m}_{Cu}^{desc} \quad (4.39)$$

- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2O}\right)}$ : Masa relativa de cobre  $Cu$  en óxido cuproso  $Cu_2O$ .
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso en la corriente de escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Cu}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre  $Cu$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$ : Flujo másico de óxido cuproso en la corriente de cobre recuperado [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{rec}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la corriente de cobre recuperado [kg/h].

#### 4.3.1.2. Balance de azufre

$$w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{escoria} = w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)} \dot{m}_{Cu_2S}^{rec} + \dot{m}_S^{desc} \quad (4.40)$$

- $w_{\left(\frac{S}{Cu_2S}\right)}$ : Masa relativa de cobre  $Cu$  en sulfuro de cobre  $Cu_2S$ .
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{escoria}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2S}^{rec}$ : Flujo másico de sulfuro de cobre en la corriente de cobre recuperado [kg/h].
- $\dot{m}_S^{desc}$ : Flujo másico de azufre en la corriente de descarte [kg/h].

#### 4.3.1.3. Balance de oxígeno

$$w_{\left(\frac{O}{Cu_2O}\right)} \dot{m}_{Cu_2O}^{escoria} + w_{\left(\frac{O}{Fe_3O_4}\right)} \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} + w_{\left(\frac{O}{FeO}\right)} \dot{m}_{FeO}^{escoria} = w_{\left(\frac{O}{Cu_2O}\right)} \dot{m}_{Cu_2O}^{rec} \quad (4.41)$$

- $w_{\left(\frac{O}{Cu_2O}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido cuproso  $Cu_2O$ .
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido cuproso [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{Fe_3O_4}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido ferroso-férrico  $Fe_3O_4$ .
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso-férrico en escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{FeO}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en óxido ferroso  $FeO$ .
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Cu_2O}^{rec}$ : Flujo másico de óxido cuproso en la corriente de cobre recuperado [kg/h].

#### 4.3.1.4. Balance de hierro

$$w_{\left(\frac{Fe}{Fe_3O_4}\right)} \dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria} + w_{\left(\frac{Fe}{FeO}\right)} \dot{m}_{FeO}^{escoria} = \dot{m}_{Fe}^{desc} \quad (4.42)$$

- $w_{\left(\frac{Fe}{Fe_3O_4}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en óxido ferroso-férrico  $Fe_3O_4$ .
- $\dot{m}_{Fe_3O_4}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso-férrico en la corriente de escoria [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Fe}{FeO}\right)}$ : Masa relativa de hierro  $Fe$  en óxido ferroso  $FeO$ .
- $\dot{m}_{FeO}^{escoria}$ : Flujo másico de óxido ferroso en la corriente de escoria [kg/h].
- $\dot{m}_{Fe}^{desc}$ : Flujo másico de hierro en la corriente de descarte [kg/h].

#### 4.3.1.5. Balance de $SiO_2$

$$\dot{m}_{SiO_2}^1 + \dot{m}_{SiO_2}^2 = \dot{m}_{SiO_2}^{desc} \quad (4.43)$$

- $\dot{m}_{SiO_2}^1$ : Flujo másico de sílica proveniente de la escoria de fusión [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^2$ : Flujo másico de sílica proveniente de la escoria de conversión [kg/h].
- $\dot{m}_{SiO_2}^{desc}$ : Flujo másico de sílica en la corriente de descarte [kg/h].

## 4.4. Piro-refinación

El diagrama de bloques de la etapa de piro-refinación se presenta en la Figura 4.4 como apoyo para entenderlas ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de entalpía que se detallan en esta sección.

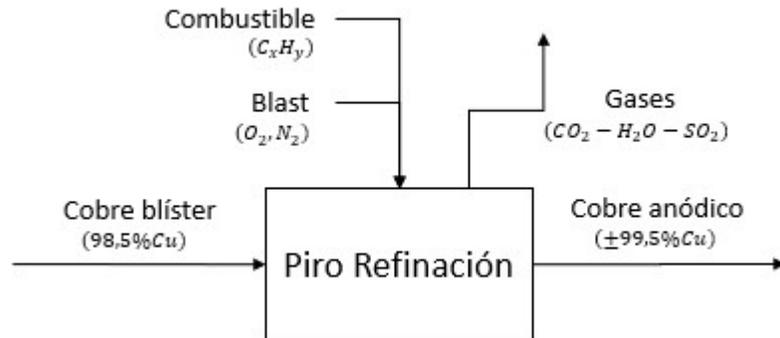


Figura 4.4: Diagrama de bloques piro-refinación.

La pérdida de calor por radiación, convección y conducción ( $Q_{pérdida,3}$ ) en el horno de piro-refinación es constante e igual a  $165 \left(\frac{MJ}{t_{blíster}}\right)$ . Este supuesto es el mismo que se aplicó en los hornos anteriores, pero escalado al blíster. A continuación, se presentan las ecuaciones de los balances de masa por especie, otras relaciones másicas importantes y el balance de entalpía de la etapa de piro-refinación.

#### 4.4.1. Balances de masa

##### 4.4.1.1. Balance de masa del cobre

$$w_{\left(\frac{C}{blister}\right)} \dot{m}^{blister} = w_{\left(\frac{C}{anodo}\right)} \dot{m}^{anodo} \quad (4.44)$$

- $w_{\left(\frac{Cu}{blister}\right)}$ : Composición másica de cobre  $Cu$  en corriente de cobre blíster.
- $\dot{m}^{blister}$ : Flujo másico de blíster [kg/h].
- $w_{\left(\frac{Cu}{anodo}\right)}$ : Composición másica de cobre  $Cu$  en corriente del cobre anódico.
- $\dot{m}^{anodo}$ : Flujo másico de la corriente de cobre anódico [kg/h].

##### 4.4.1.2. Balance de masa del azufre

$$w_{\left(\frac{S}{blister}\right)} \dot{m}^{blister} = w_{\left(\frac{S}{anodo}\right)} \dot{m}^{anodo} + w_{\left(\frac{S}{SO_2}\right)} \dot{m}_{SO_2,3} \quad (4.45)$$

- $w_{\left(\frac{S}{blister}\right)}$ : Composición de azufre  $S$  en corriente de blíster.
- $\dot{m}^{blister}$ : Flujo másico de blíster [kg/h].
- $w_{\left(\frac{S}{anodo}\right)}$ : Composición de azufre  $S$  en corriente de cobre anódico.
- $w_{\left(\frac{S}{SO_2}\right)}$ : Masa relativa de azufre  $S$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2,3}$ : Flujo másico de dióxido de azufre [kg/h].

##### 4.4.1.3. Balance de masa del oxígeno

$$w_{\left(\frac{O}{blister}\right)} \dot{m}^{blister} + \dot{m}_{O_2}^{blast,3} = w_{\left(\frac{O}{anodo}\right)} \dot{m}^{anodo} + w_{\left(\frac{O}{CO_2}\right)} \dot{m}_{CO_2,3} + w_{\left(\frac{O}{H_2O}\right)} \dot{m}_{H_2O,3} + w_{\left(\frac{O}{SO_2}\right)} \dot{m}_{SO_2,3}$$

- $w_{\left(\frac{O}{blister}\right)}$ : Composición másica de oxígeno  $O$  en la corriente de blíster.
- $\dot{m}^{blister}$ : Flujo másico de blíster [kg/h].
- $\dot{m}_{O_2}^{blast,3}$ : Flujo másico de oxígeno blast [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{anodo}\right)}$ : Composición másica de oxígeno  $O$  en la corriente de cobre anódico.
- $\dot{m}^{anodo}$ : Flujo másico de corriente de cobre anódico [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{CO_2}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de carbono  $CO_2$ .
- $\dot{m}_{CO_2,3}$ : Flujo másico de dióxido de carbono en la piro-refinación [kg/h].
- $w_{\left(\frac{O}{H_2O}\right)}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en agua  $H_2O$ .

- $\dot{m}_{H_2O,3}$ : Flujo másico de agua en la piro-refinación [kg/h].
- $w_{(\frac{O}{SO_2})}$ : Masa relativa de oxígeno  $O$  en dióxido de azufre  $SO_2$ .
- $\dot{m}_{SO_2,3}$ : Flujo másico de dióxido de azufre en la piro-refinación [kg/h].

#### 4.4.1.4. Balance de masa del nitrógeno

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,3} = \dot{m}_{N_2,3} \quad (4.46)$$

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,3}$ : Flujo másico de nitrógeno en el blast de la piro-refinación [kg/h].
- $\dot{m}_{N_2,3}$ : Flujo másico de nitrógeno en la salida de la piro-refinación [kg/h].

#### 4.4.1.5. Balance de masa del carbono

$$r_{(\frac{C}{combustible})} \dot{m}_{combustible,3} = w_{(\frac{C}{CO_2})} \dot{m}_{CO_2,3} \quad (4.47)$$

- $r_{(\frac{C}{combustible})}$ : Composición de carbono  $C$  en el combustible.
- $\dot{m}_{combustible,3}$ : Flujo másico de combustible en la piro-refinación [kg/h].
- $w_{(\frac{C}{CO_2})}$ : Masa relativa de carbono  $C$  en dióxido de carbono  $CO_2$ .
- $\dot{m}_{CO_2,3}$ : Flujo másico de dióxido de carbono en la piro-refinación [kg/h].

#### 4.4.1.6. Balance de masa del hidrógeno

$$r_{(\frac{H}{combustible})} \dot{m}_{combustible,3} = w_{(\frac{H}{H_2O})} \dot{m}_{H_2O,3} \quad (4.48)$$

- $r_{(\frac{H}{combustible})}$ : Composición de hidrógeno  $H$  en el combustible.
- $\dot{m}_{combustible,3}$ : Flujo másico de combustible en la piro-refinación [kg/h].
- $w_{(\frac{H}{H_2O})}$ : Composición de hidrógeno  $H$  en agua  $H_2O$ .
- $\dot{m}_{H_2O,3}$ : Flujo másico de vapor de agua en la piro-refinación [kg/h].

### 4.4.2. Balance de energía

$$\begin{aligned} \dot{m}_{blister} \Delta H_{blister}^{25^\circ C} + \dot{m}_{combustible} \Delta H_{combustible}^{25^\circ C} + Q_{blast,3} = \\ \dot{m}_{ánodo} \Delta H_{ánodo}^{1227^\circ C} + \\ \dot{m}_{CO_2} \Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{H_2O} \Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{SO_2} \Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C} + \dot{m}_{N_2} \Delta H_{N_2}^{1227^\circ C} + \\ Q_{pérdida,3} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Donde:

- $Q_{blast,3}$ : Calor de precalentado del blast de la piro-refinación [ $\frac{MJ}{t_{mata}}$ ].
- $\Delta H_i^{25^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $i$  en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atm y 25°C) [ $\frac{MJ}{kg}$ ].
- $\Delta H_j^{1227^\circ C}$ : Entalpía de formación del compuesto  $j$  más la entalpía adicional por aumento de temperatura a 1227°C [ $\frac{MJ}{kg}$ ].

### 4.4.3. Requerimiento de oxígeno

#### 4.4.3.1. Flujo másico oxígeno industrial

$$\dot{m}_{O_2}^{blast,3} = R_{O_2}^{ind} \dot{m}_{O_2}^{ind,3} + R_{O_2}^{aire} \dot{m}^{aire,3} \quad (4.50)$$

- $\dot{m}_{O_2}^{blast,3}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la piro-refinación [kg/h].
- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,3}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la piro-refinación [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}^{aire,3}$ : Flujo másico de aire en la piro-refinación [kg/h].

#### 4.4.3.2. Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{N_2}^{blast,3} = (1 - R_{O_2}^{ind}) \dot{m}_{O_2}^{ind,3} + (1 - R_{O_2}^{aire}) \dot{m}^{aire,3} \quad (4.51)$$

- $\dot{m}_{N_2}^{blast,3}$ : Flujo másico de oxígeno en el blast de la piro-refinación [kg/h].
- $R_{O_2}^{ind}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de oxígeno industrial enriquecido.
- $\dot{m}_{O_2}^{ind,3}$ : Flujo másico de oxígeno industrial enriquecido en la piro-refinación [kg/h].
- $R_{O_2}^{aire}$ : Contenido de oxígeno en la corriente de aire.
- $\dot{m}^{aire,3}$ : Flujo másico de aire en la piro-refinación [kg/h].

Tabla 4.5: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones para el modelo de la etapa de piro-refinación. A su vez, para mayor comprensión, se detalla en la primera columna las ecuaciones a las que corresponden cada una de las filas, y, en la primera fila, las variables del sistema. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero asociado.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast,3}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast}$	$\dot{m}_{ánodo}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$Q_{blast,3}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,3}$	$\dot{m}_{O_2}^{aire,3}$
4.44	$w_{\left(\frac{c}{blister}\right)} \dot{m}^{blister}$			$w_{\left(\frac{c}{ánodo}\right)}$								
4.45	$w_{\left(\frac{s}{blister}\right)} \dot{m}^{blister}$			$w_{\left(\frac{s}{ánodo}\right)}$	$w_{\left(\frac{s}{SO_2}\right)}$							
4.46	$w_{\left(\frac{o}{blister}\right)} \dot{m}^{blister}$	-1		$w_{\left(\frac{o}{ánodo}\right)}$	$w_{\left(\frac{o}{SO_2}\right)}$		$w_{\left(\frac{o}{CO_2}\right)}$	$w_{\left(\frac{o}{H_2O}\right)}$				
4.46			1			-1						
4.47							$-w_{\left(\frac{c}{CO_2}\right)}$		$r_{\left(\frac{c}{combustible}\right)}$			
4.48								$-w_{\left(\frac{H}{CO_2}\right)}$	$r_{\left(\frac{H}{combustible}\right)}$			
	$\dot{m}_{combustible}$								1			
	$Q_{blast,3}$									1		
4.49	$\dot{m}^{blister} \Delta H_{blister} - Q_{pérdida,3}$			$\Delta H_{ánodo}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	$-\Delta H_{combustible}^{25^\circ C}$	-1		
4.50		-1									$R_{O_2}^{ind}$	$R_{O_2}^{aire}$
4.51			-1								$(1 - R_{O_2}^{ind})$	$(1 - R_{O_2}^{aire})$

Tabla 4.6: Matriz expandida ( $b|A$ ) del sistema de ecuaciones con sus coeficientes reemplazados para el modelo de la etapa de piro-refinación. Se debe notar que las celdas vacías tienen coeficiente cero.

Ecuación	Término numérico	$\dot{m}_{O_2}^{blast,3}$	$\dot{m}_{N_2}^{blast}$	$\dot{m}^{ánodo}$	$\dot{m}_{SO_2}$	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{CO_2}$	$\dot{m}_{H_2O}$	$\dot{m}_{combustible}$	$Q_{blast,3}$	$\dot{m}_{O_2}^{ind,3}$	$\dot{m}_{O_2}^{aire,3}$
4.44	265,78			1,00								
4.45	1,61			0,00	0,50							
4.46	8,05	-1,00		0,00	0,25		0,36	0,89				
4.46			1,00			-1,00			0,01			
4.47							-0,27		0,76			
4.48								-0,06	0,23			
	$\dot{m}_{combustible}$								1,00			
	$Q_{blast,3}$									1,00		
4.49	-134,09			0,75	-3,66	1,37	-7,54	-10,75	4,13	-1,00		
4.50		-1,00									0,93	0,23
4.51			-1,00								0,07	0,77

Se debe considerar la importancia de conocer la mineralogía del concentrado, ya que si bien, en este trabajo se asume por simplificación que el concentrado está compuesto únicamente por calcopirita ( $CuFeS_2$ ), es decir, principalmente, cobre, hierro y azufre, cierta concentración de minerales complejos o con elementos adicionales como arsénico, antimonio y otros, crean la necesidad de adaptar las fundiciones para el tratamiento de ellos [22]. Específicamente, para el caso arsénico, se han puesto restricciones económicas en el mercado con el fin de penalizar los productos que superen la concentración límite estipulada. De esta manera, la presencia de los componentes mencionados, puede influir en el diseño de una fundición, ya que se requerirían operaciones adicionales, y por lo tanto, afectaría su demanda energética, por lo que este modelo, subestimaría su magnitud.

Por otro lado, también por simplificación, se decidió que el proceso estuviese en régimen continuo para poder modelarlo como estacionario. Ésto implica que las tecnologías involucradas deben operar en forma continua y el equipo seleccionado para eso es el horno Flash Outokumpu. Naturalmente, esta tecnología tiene parámetros de operación asociados, como la pérdida de calor ( $Q_{pérdida} = 500MJ/t_{concentrado\ Cu}$ ) y otros datos de eficiencia y composición en la salida que se pueden observar en el anexo B. En la actualidad no es la regla en las fundiciones utilizar tecnologías de operación continua [22]. Aún así, se proyecta que es necesario y se manifiesta que lo deseable es transicionar hacia ello.

Adicionalmente, otro supuesto importante es el valor de la pérdida de calor en el horno ( $Q_{pérdida}$ ), que considera disipación por conducción, convección y radiación, debido a que se considera proporcional a la entrada del flujo cúprico correspondiente (concentrado, mata o blíster) y su valor no varía con la escala de producción. Ésto es un comportamiento que no necesariamente se condice con la realidad, debido a que la escala de producción sí puede influir en el flujo de calor que se disipe hacia el entorno, por ejemplo con el tamaño de los hornos utilizados y/o el cambio de su geometría.

## 4.5. Producción de oxígeno

En la producción de oxígeno enriquecido (*blast*) que es suministrado a la fundición, se utiliza una unidad generadora de oxígeno, ver detalle en el anexo C. Dicha unidad se alimenta de energía a través de la corriente eléctrica. Luego, determinando el flujo volumétrico de  $O_2$  requerido en cada operación unitaria y conociendo la potencia unitaria del equipo  $p_c$ , se puede determinar la energía consumida, tal y como se muestra en la ecuación 4.52.

$$E_{O_2} = v_{O_2} p_c \quad (4.52)$$

Por su parte, el flujo volumétrico de oxígeno se puede calcular utilizando la ley de gases ideales, a partir de su flujo másico, tal y como se muestra a continuación.

$$P\dot{v}_{O_2} = \dot{n}_{O_2}RT \quad (4.53)$$

$$\Rightarrow \dot{v}_{O_2} = \dot{n}_{O_2} \frac{RT}{P} \quad (4.54)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\overline{m}w_{O_2}} \quad (4.55)$$

$$\Rightarrow \dot{v}_{O_2} = \left( \frac{\dot{m}_{O_2}}{\overline{m}w_{O_2}} \right) \frac{RT}{P} \quad (4.56)$$

## 4.6. Consumo eléctrico en la fundición

El consumo eléctrico en la fundición está dado por las etapas complementarias e intermedias de la fundición como i) movimiento y limpieza de gases, ii) granulación y iii) secado. Éste se obtiene como se muestra a continuación.

$$E_{fund} = E_{gran} + E_{secado} + E_{gases} \quad (4.57)$$

### Movimiento y limpieza de gases

$$E_{gases} = f_{gases}(m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{CO_2} + m_{H_2O}) \quad (4.58)$$

### Granulación

$$E_{gran} = f_{gran}m_{mata} \quad (4.59)$$

### Secado

$$E_{secado} = f_{secado}(m_{mata} + m_{escoria}) \quad (4.60)$$

## 4.7. Consumo eléctrico total

Adicionalmente, el consumo eléctrico total se define como el consumo de la fundición más el de producción de oxígeno, como se presenta en la ecuación 4.61.

$$E_{total} = E_{fund} + E_{O_2} \quad (4.61)$$

# Capítulo 5

## Implementación del modelo de demanda energética

En este capítulo se presenta la implementación del modelo de demanda energética, realizado a partir de las ecuaciones presentadas anteriormente. Los resultados exponen de manera numérica la implementación, y se pueden ver en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3. Dichas figuras tienen el objetivo de mostrar los puntos de operación posibles (o modos) de las variables que se pueden flexibilizar, en cada operación unitaria dentro de la fundición.

## 5.1. Fusión

El sistema presentado para la etapa de fusión (4.1) se resuelve para todas las combinaciones entre el calor de precalentado y el combustible, lo que entrega los modos de operar esta etapa, con  $Q_{blast,1} \in [0, 600]$  y  $m_{combustible,1} \in [0, 100]$ . El resultado gráfico de lo anterior se puede apreciar en la figura 5.1.

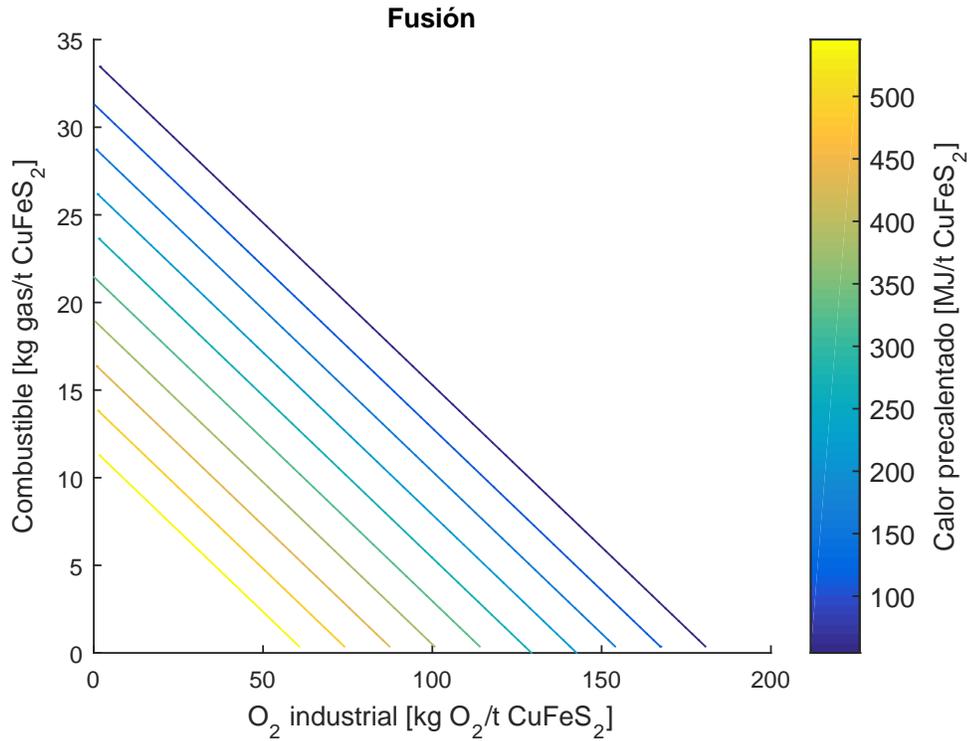


Figura 5.1: Requerimientos de energía en la operación de la fusión obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. El eje de las ordenadas muestra la masa de combustible (gas natural)  $\dot{m}_{combustible,1}$  en  $kg$ , el eje de las abscisas muestra la masa de oxígeno industrial requerido  $\dot{m}_{O_2}^{ind,1}$  en  $kg$  y el eje coloreado representa el calor de precalentamiento del blast  $Q_{blast,1}$  en  $MJ$ , todos por tonelada de calcopirita ( $CuFeS_2$ ).

## 5.2. Conversión

De manera análoga a la sección anterior, el sistema presentado para la etapa de conversión (4.2) se resuelve para todas las combinaciones de calor de precalentado y combustible, entregando los modos de operar esta etapa, con  $Q_{blast,2} \in [0, 300]$  y  $m_{combustible,2} \in [0, 20]$ . El resultado gráfico de lo anterior se puede apreciar en la figura 5.2.

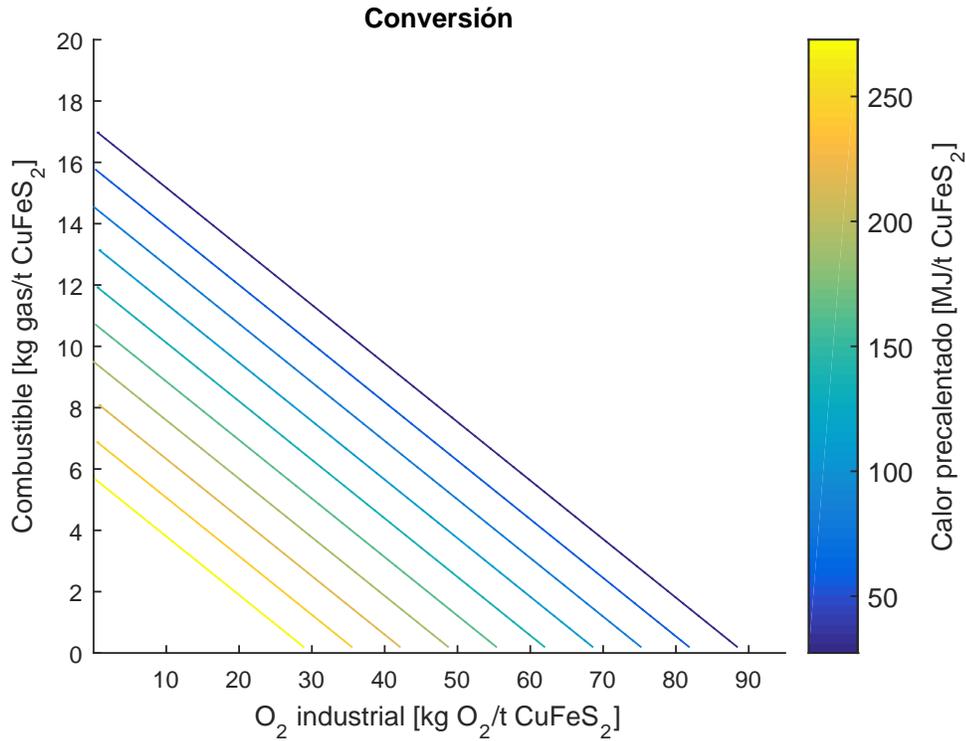


Figura 5.2: Requerimientos de energía en la operación de la conversión obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. El eje de las ordenadas muestra la masa de combustible (gas natural)  $\dot{m}_{combustible,2}$  en  $kg$ , el eje de las abscisas muestra la masa de oxígeno industrial requerido  $\dot{m}_{O_2}^{ind,2}$  en  $kg$  y el eje coloreado representa el calor de precalentamiento del blast  $Q_{blast,2}$  en  $MJ$ , todos por tonelada de calcopirita ( $CuFeS_2$ ).

### 5.3. Piro-refinación

El sistema presentado para la etapa de piro-refinación (4.4) se resuelve para todas las combinaciones de calor de precalentado y combustible, entregando los modos de operar esta etapa, con  $Q_{blast,3} \in [0, 200]$  y  $m_{combustible,3} \in [0, 18]$ . El resultado gráfico de lo anterior se puede apreciar en la figura 5.3.

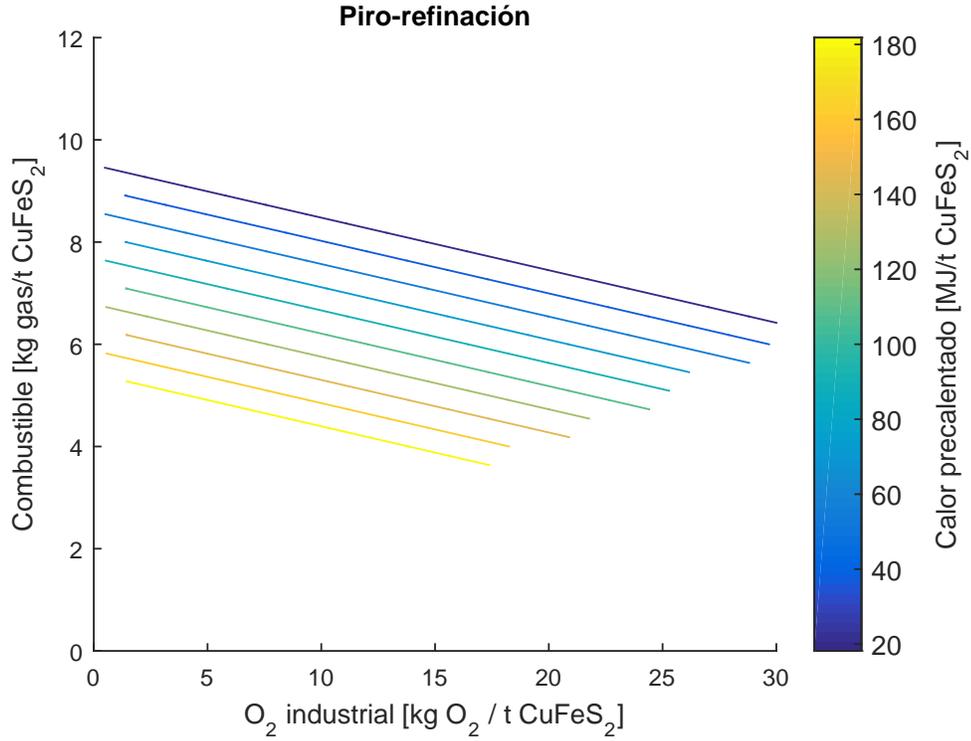


Figura 5.3: Requerimientos de energía en la operación de piro-refinación obtenidos a partir de la implementación del modelo de la demanda energética. El eje de las ordenadas muestra la masa de combustible (gas natural)  $\dot{m}_{combustible,3}$  en  $kg$ , el eje de las abscisas muestra la masa de oxígeno industrial requerido  $\dot{m}_{O_2}^{ind,3}$  en  $kg$  y la barra coloreada representa el calor de precalentamiento del blast  $Q_{blast,3}$  en  $MJ$ , todos por tonelada de calcopirita ( $CuFeS_2$ ).

A partir de las figuras previas (5.1, 5.2 y 5.3) se puede observar que el calor de precalentado es inversamente proporcional a la masa de combustible y a la de oxígeno industrial en todos los casos. Por su parte, la relación entre la masa de combustible y de oxígeno industrial es decreciente: mientras más combustible se proporciona, menos oxígeno se requiere. Lo anterior concuerda con lo esperado debido a que cada uno de los flujos másicos y calórico, suministran la energía para las corrientes de salida ( $1227\text{ }^\circ\text{C}$ ), que es constante debido a la forma en la que opera la fundición y se concibe el modelo. Observando los rangos de magnitud entre los que se mueven las variables, se puede notar que van disminuyendo aguas abajo (desde la fusión hasta la piro-refinación), es decir, debido a la magnitud de los flujos que se tratan en la fusión, los valores de  $Q_{blast,1}$ ,  $\dot{m}_{combustible,1}$  y  $\dot{m}_{O_2}^{blast,1}$  son también mayores en relación con

los mismos flujos de las demás operaciones unitarias. En el siguiente capítulo, se realiza un ejercicio que ilustra de mejor manera lo anterior.

Adicionalmente, se debe señalar que las líneas de cada gráfico corresponden a los puntos de operación factibles del modelo, y por lo tanto, no son extrapolables. Es en el gráfico de la piro-refinación (figura 5.3) donde esto es especialmente crítico, ya que existe una zona en la parte inferior derecha donde las líneas se cortan. En ese caso, las combinaciones de las variables que no entregaban soluciones factibles, simplemente no se representaron.

Finalmente, cabe destacar que si se quisiera modificar energéticamente el proceso, un modelo como el realizado puede ser muy útil. Lo anterior porque da una magnitud del requerimiento de cada recurso, ya sea en formato de insumos almacenables, como el oxígeno y combustible, o de flujo de energía, como lo es el calor de precalentado. En esa misma línea, se construyen los cimientos para la adaptación a energías renovables no convencionales que poseen una variabilidad intrínseca.

# Capítulo 6

## Escenarios energéticos para la operación de la fundición

En la tabla 6.1 se muestran las combinaciones de casos extremos de cada variable que conforman los escenarios de consumo. El objetivo de examinar el comportamiento de las variables de esta manera, es dimensionar visualmente la decisión de optar por no utilizar una fuente en particular, usarla al mínimo posible, o al contrario, utilizarla en su máxima capacidad, entendiendo con ello que la energía requerida neta en el proceso será la misma. A su vez, se pueden ver los rangos de magnitud entre los que se mueve el consumo de energía por variable. Esta sección está destinada a ser un ejercicio ilustrativo de cómo funcionaría el modelo al utilizarse en DSM.

Tabla 6.1: Combinaciones de casos extremos de cada variable que conforman los escenarios de consumo.

Escenario	$O_2$ industrial	Combustible	Calor precalentado
E1	máximo	mínimo	mínimo
E2	mínimo	máximo	mínimo
E3	mínimo	mínimo	máximo

De la tabla anterior (6.1), se debe notar que, para una variable fija, el valor extremo (mínimo o máximo) es la suma de los valores extremos en cada operación unitaria. Por ejemplo, para  $m_i^{máx}$ , el caso del máximo de la variable  $m_i$ , esto sería como se muestra en la ecuación 6.1, a continuación:

$$m_i^{máx} = m_{i,fusión}^{máx} + m_{i,conversión}^{máx} + m_{i,piro-ref}^{máx} \quad (6.1)$$

En la ecuación,  $m_i$  puede considerarse masa de oxígeno industrial ( $m_{O_2}^{ind}$ ), masa de combustible ( $m_{comb}$ ) o calor de precalentado ( $Q_{prec}$ ). Para el calor de precalentado, en el caso del máximo, quedaría de la siguiente forma (ecuación 6.2):

$$Q_{prec}^{máx} = Q_{prec,fusión}^{máx} + Q_{prec,conversión}^{máx} + Q_{prec,piro-ref}^{máx} \quad (6.2)$$

Se debe tener presente que este ejercicio es ilustrativo, y que, en la aplicación del modelo, no es necesario considerar el máximo en todas las operaciones unitarias ya que podría ser cualquier combinación basada en los resultados de la sección anterior. De hecho, una

estrategia para obtener valores intermedios de manera sencilla, sería enfocarse en buscarlos en la etapa de fusión, ya que es la que más afecta al consumo de energía.

Los escenarios E1, E2 y E3, mencionados anteriormente, se presentan en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3.

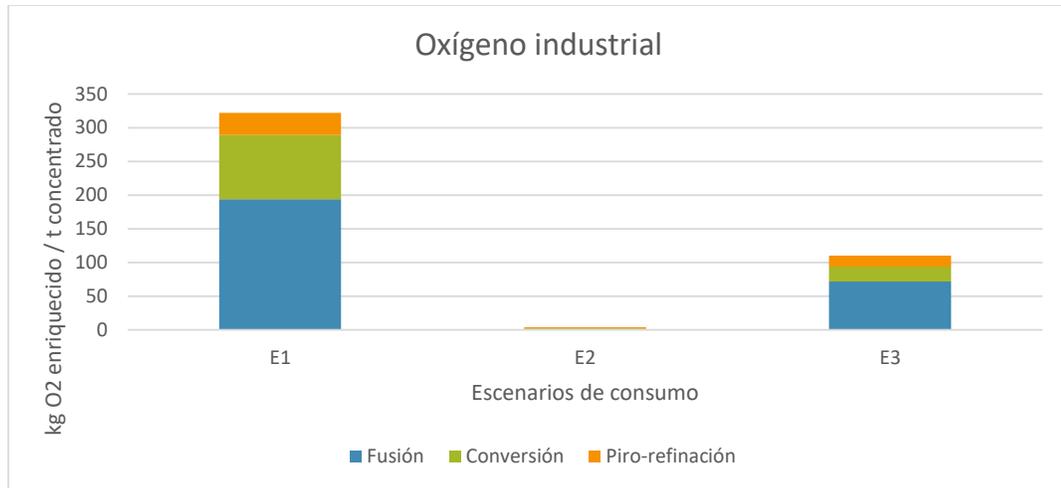


Figura 6.1: Consumo de oxígeno industrial ( $m_{O_2}^{ind}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. En cada escenario se muestra el desglose por operación unitaria en colores. En azul la fusión, en verde la conversión y naranja la pirorefinación.

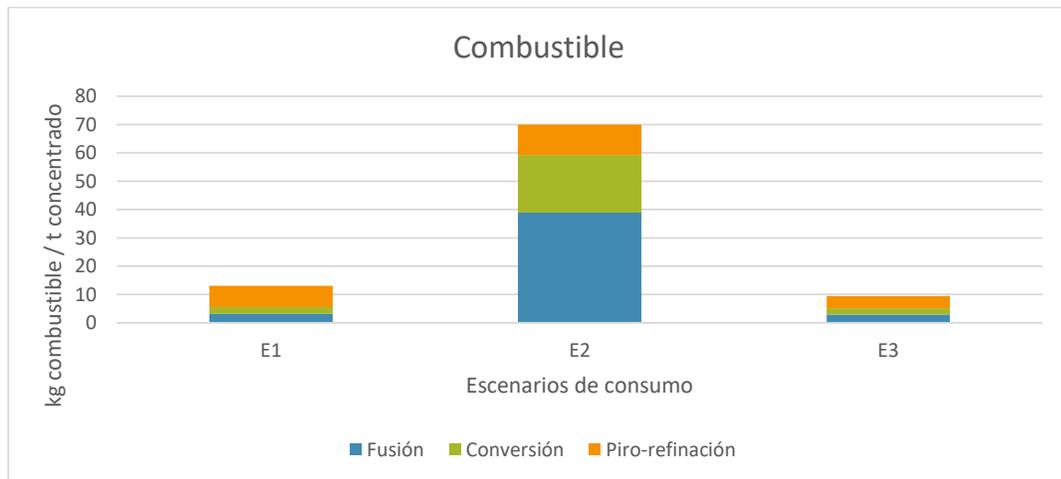


Figura 6.2: Consumo de combustible ( $m_{comb}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. En cada escenario se muestra el desglose por operación unitaria en colores. En azul la fusión, en verde la conversión y naranja la pirorefinación.

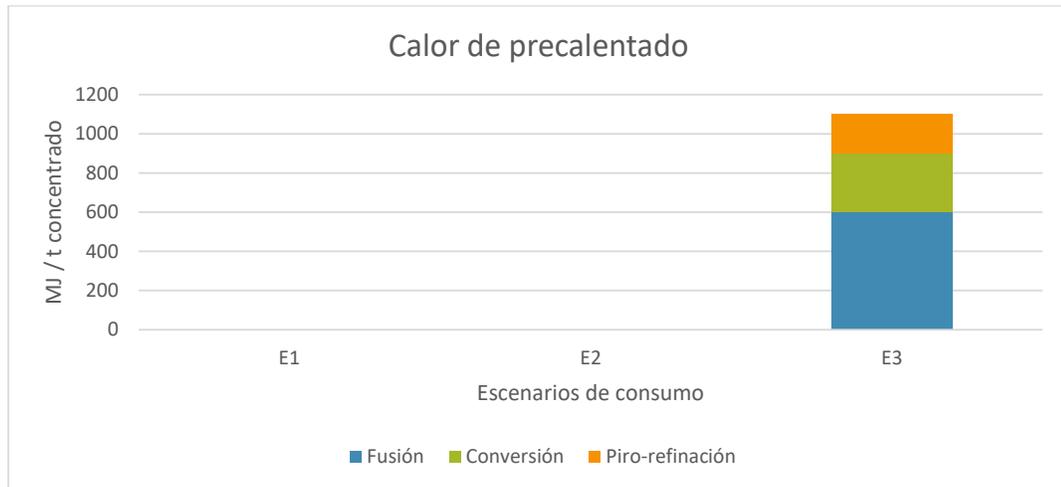


Figura 6.3: Consumo de calor de precalentado ( $Q_{prec}$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. En cada escenario se muestra el desglose por operación unitaria en colores. En azul la fusión, en verde la conversión y naranja la pirorefinación.

Adicionalmente, se presenta el consumo eléctrico de la fundición en la figura 6.4. Se puede notar que, a diferencia de las otras variables, ésta posee cambios de magnitud entre escenarios diferentes a la lógica anterior. La razón de esto se encuentra en su definición matemática, ecuación 4.57, ya que solo depende de los flujos másicos de mata, escoria y gases. Por otro lado, cabe notar que esta variable es relevante para la gestión energética debido a que la fundición necesita un mínimo de electricidad que debe considerar para su operación en cada escenario.

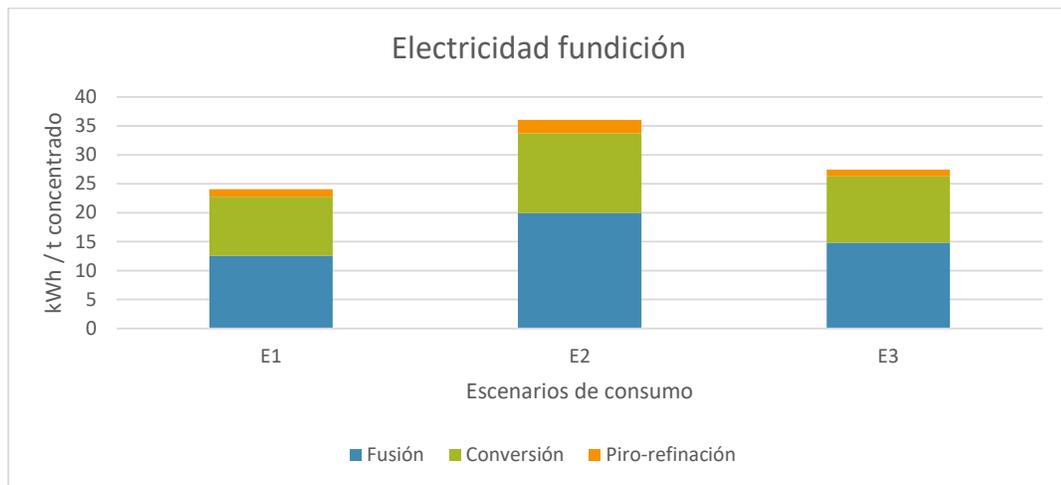


Figura 6.4: Consumo electricidad de la fundición ( $E_F$ ) a través de los escenarios E1, E2 y E3. En cada escenario se muestra el desglose por operación unitaria en colores, en azul la fusión, en verde la conversión y naranja la pirorefinación.

Por otro lado, observando el desglose por operación unitaria en cada gráfico, en general, se puede notar que la fusión (representada en azul) es la operación que más consume energía

lo que tiene sentido debido a que es la operación que trata el mayor flujo de materia y donde la pureza de cobre aumenta significativamente más. Luego de la fusión, se ordenan decrecientemente, primero la conversión y luego la piro-refinación, salvo cuando se mira con atención el caso del combustible para los escenarios E1 y E3. Lo anterior es coherente al observar el diagrama del proceso presentado en la figura 3.1, ya que en él se muestra que, a diferencia de la fusión y la conversión, la piro-refinación no tiene entrada de oxígeno, y por lo tanto, tampoco calor de precalentado. Acorde con ello, su consumo de combustible es mayor en los escenarios E1 y E3, por dos razones: la primera es que, para fundir el blíster, es su única fuente de calor; la segunda porque también es su fuente de reducción en la reacción que libera las impurezas del producto.

A diferencia del calor de precalentado, que se enciende y se apaga durante la operación, el oxígeno y el combustible son insumos que se almacenan para alimentar el proceso (sección 3.2), es decir, hay un *stock* limitado o en exceso. De esta manera, los escenarios E1 y E2, que contemplan oxígeno al máximo y combustible al máximo, respectivamente, son ideales para la baja disponibilidad de electricidad, o para cuando se desincentiva su uso con mayores precios. De forma análoga, el escenario E3, calor de precalentado al máximo, es ideal cuando hay más disponibilidad o precios más bajos de electricidad.

Por lo tanto, en un contexto en que la electricidad disponible sea limitada, se recomienda utilizar las reservas de oxígeno enriquecido y combustible para operar según los escenarios E1 o E2, y reponerlas una vez estabilizada la disponibilidad eléctrica para operar principalmente con calor de precalentamiento, es decir, según el escenario E3. La elección entre los escenarios E1 o E2 dependerá de criterios adicionales relevantes en cada decisión operativa del proceso. Por ejemplo, si se busca minimizar las emisiones directas de gases de efecto invernadero, se debe evitar el uso de combustibles para reducir la combustión y la generación de  $CO_2$ . En este caso, el escenario E1 sería más adecuado para cumplir con dicho objetivo. Por otro lado, si el consumo de oxígeno enriquecido es la variable crítica, se debe utilizar más combustible y operar según el escenario E2. Para simplificar el análisis, se pueden aplicar estos escenarios solo en la fusión, que es la operación más influyente en el proceso.

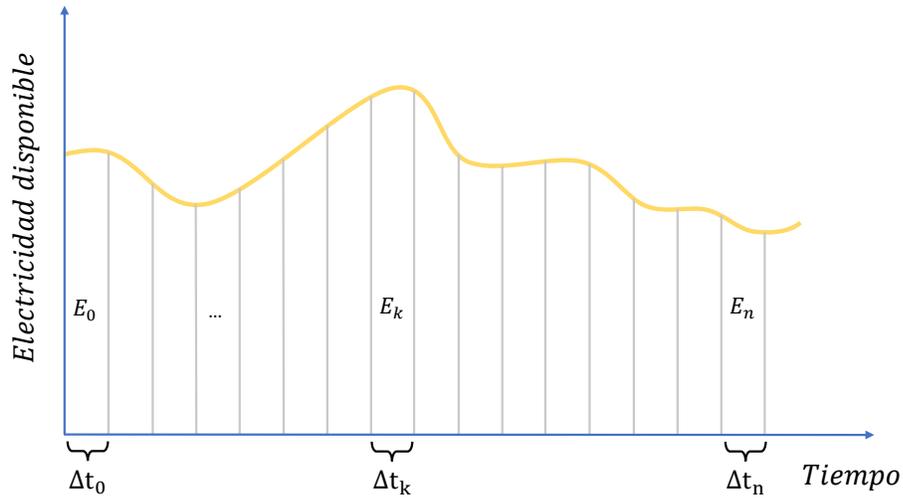


Figura 6.5: Electricidad disponible a través del tiempo. Para una ventana de tiempo establecida, es posible crear intervalos (representados por  $\Delta t_k$ ) en los que se opte por un escenario de operación  $E_k$ .

Escenario: $E_k$	Fusión	Conversión	Piro – refinación
$m_{O_2}^{ind}$	$m_{O_2}^{ind,1}$	$m_{O_2}^{ind,2}$	$m_{O_2}^{ind,3}$
$m_{comb}$	$m_{comb,1}$	$m_{comb,2}$	$m_{comb,3}$
$Q_{blast}$	$Q_{blast,1}$	$Q_{blast,2}$	$Q_{prec,3}$

Figura 6.6: Condiciones de operación en el proceso de fundición de cobre para un escenario de operación  $E_k$  dado.

El razonamiento presentado puede reproducirse en diferentes niveles de disponibilidad eléctrica (figura 6.5) y, para un horizonte de tiempo dado, sería posible encontrar la combinación más adecuada de condiciones de operación, en cada etapa del proceso, y cada nivel (figura 6.6), sin necesidad de acotarlo exclusivamente a los puntos extremos de mínimo y máximo como en el ejemplo. Comparar dichas posibilidades entre sí y obtener el escenario óptimo de acuerdo con criterios adicionales relevantes para el contexto de aplicación, como reducir las emisiones de  $CO_2$  y/o  $SO_2$ , el consumo de oxígeno enriquecido, u otros, a través de un problema de optimización, correspondería a realizar optimización para gestión de la demanda energética.

# Capítulo 7

## Conclusión

Comenzando desde las ecuaciones fundamentales de la fundición de cobre, fue posible construir un modelo de su demanda energética. Este modelo considera cuatro operaciones unitarias que son imprescindibles en toda fundición, además de operaciones intermedias complementarias para su funcionamiento, como el secado y granulado de las corrientes principales, y el filtrado de gases. Dichas operaciones unitarias son fusión, conversión, limpieza de escorias y piro-refinación, cada una de ellas con sus propios requerimientos energéticos.

Luego de ésta construcción fenomenológica, fue posible modelar la demanda energética del proceso de fundición de cobre, proponiendo, modos de operación con base en tres variables críticas: combustible, oxígeno industrial y calor de precalentado del oxígeno. Estos modos de operación, son combinaciones de las variables mencionadas, en las que se mantiene la producción, pero varía la forma en la que se suministra la energía al proceso. En este sentido, las variables tienen una relación complementaria entre sí, es decir, cuando aumenta el suministro de una, disminuye el suministro de otra.

El resultado principal de la modelación en este contexto es un ejercicio ilustrativo de su funcionamiento. A partir de esto, las conclusiones más relevantes son que, en los casos extremos de los modos de operación, se puede optar por utilizar principalmente oxígeno industrial para todas las operaciones y de esta manera, su consumo, por cada tonelada de calcopirita en la entrada, sería de 320 kg de oxígeno industrial, con 13 kg de combustible, 23 kWh de electricidad por funcionamiento de la planta y sin calor de precalentado. Análogamente, si se optara por utilizar principalmente calor de precalentado para el blast en todas las operaciones, su consumo sería de 1100 kWh, además de 10 kg de combustible, 114 kg de oxígeno industrial y 28 kWh de electricidad, por tonelada de calcopirita en la entrada.

Como fue mencionado previamente, los escenarios donde se prioriza el consumo de insumos, como oxígeno y combustible, son convenientes cuando hay menos electricidad disponible o su uso es desincentivado; mientras que los escenarios donde se prioriza el calor de precalentado, que es un flujo producido y suministrado al proceso en tiempo real, es más conveniente cuando hay más electricidad disponible. El modelo fue realizado de forma que se pueda implementar dentro de un programa de optimización de planificación energética para realizar gestión de la demanda en miras a su potencial adaptación a la oferta variable de las ERNC.

Para continuar este trabajo en un futuro, se podría modelar la transición de un modo de operación a otro, ya que esto puede afectar los resultados de la modelación. Si bien, a gran escala dicho efecto podría ser despreciado, para concluirlo con certeza, se debe evaluar de manera adecuada. Adicionalmente, en términos generales, sería valioso extender el modelo e incluir más etapas del proceso productivo del cobre para continuar explorando la flexibilidad con más requisitos operativos.

# Bibliografía

- [1] Allen, M., Dube, O., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., y Zickfeld, K., “Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming,” IPCC, pp. 51–83, 2018, [https://www.researchgate.net/publication/329866816/\\_Summary/\\_for/\\_Policymakers/\\_In/\\_Global/\\_warming/\\_of/\\_15C/\\_An/\\_IPCC/\\_Special/\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/329866816/_Summary/_for/_Policymakers/_In/_Global/_warming/_of/_15C/_An/_IPCC/_Special/_Report).
- [2] Gobierno de Chile, “Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile, Actualización 2020.”,
- [3] Comisión Chilena del Cobre, “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019,” rep. tec., 2020.
- [4] Anuario de la Minería de Chile 2020. 2021.
- [5] “Generadoras de Chile - Energía Solar.”, <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-solar>.
- [6] Molina, A., Falvey, M., y Rondanelli, R., “A solar radiation database for Chile,” Scientific Reports, vol. 7, 2017, [doi:10.1038/s41598-017-13761-x](https://doi.org/10.1038/s41598-017-13761-x).
- [7] Moreno-Leiva, S., Haas, J., Junne, T., Valencia, F., Godin, H., Kracht, W., Nowak, W., y Eltrop, L., “Renewable energy in copper production: A review on systems design and methodological approaches,” Journal of Cleaner Production, vol. 246, p. 118978, 2020, [doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.118978](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118978).
- [8] Lund, P. D., Lindgren, J., Mikkola, J., y Salpakari, J., “Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 45, pp. 785–807, 2015, [doi:10.1016/j.rser.2015.01.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057).
- [9] “Reporte energético julio 2022,” rep. tec., Coordinador Eléctrico Nacional, 2022.
- [10] Energía 2050: Política Energética de Chile. 2018, <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/611>.
- [11] Zhang, Q. y Grossmann, I. E., “Planning and scheduling for industrial demand side management: Advances and challenges,” Alternative Energy Sources and Technologies: Process Design and Operation, pp. 383–414, 2016, [doi:10.1007/978-3-319-28752-2\\_14\\_COVER](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28752-2_14_COVER).
- [12] CODELCO CHILE, “Codelco educa: El proceso productivo del cobre.”, [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso\\_productivo.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso_productivo.html).
- [13] Comisión Chilena del Cobre, “Boletín mensual electrónico.”, <https://www.cochilco.cl/>

- [14] CODELCO CHILE, “Codelco educa: ¿qué es el cobre?.”, [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/que\\_es\\_cobre.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/que_es_cobre.html).
- [15] Golmohamadi, H., “Demand-side management in industrial sector: A review of heavy industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111963, 2022, doi:10.1016/J.RSER.2021.111963.
- [16] Pamparana, G., Kracht, W., Haas, J., Díaz-Ferrán, G., Palma-Behnke, R., y Román, R., “Integrating photovoltaic solar energy and a battery energy storage system to operate a semi-autogenous grinding mill,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 273–280, 2017, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.110.
- [17] Cruz-Robles, I., Vaamonde, A. J., Alonso, E., Pérez-Rábago, C. A., y Estrada, C. A., “Potential of solar central tower systems for thermal applications in the production chain of copper by pyrometallurgical route,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, p. 020002, 2018, doi:10.1063/1.5067011.
- [18] Zhang, Q., Wei, Z., Ma, J., Qiu, Z., y Du, T., “Optimization of energy use with co2 emission reducing in an integrated iron and steel plant,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 157, p. 113635, 2019, doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.04.045.
- [19] Haas, J., Cebulla, F., Nowak, W., Rahmann, C., y Palma-Behnke, R., “A multi-service approach for planning the optimal mix of energy storage technologies in a fully-renewable power supply,” *Energy Conversion and Management*, vol. 178, pp. 355–368, 2018, doi:10.1016/j.enconman.2018.09.087.
- [20] Moreno-Leiva, S., Haas, J., Nowak, W., Kracht, W., Eltrop, L., y Breyer, C., “Integration of seawater pumped storage and desalination in multi-energy systems planning: The case of copper as a key material for the energy transition,” *Applied Energy*, vol. 299, 2021, doi:10.1016/j.apenergy.2021.117298.
- [21] Davenport, W. G. y Partelpoeg, E., *Flash Smelting: Analysis, Control and Optimization* - W. G. Davenport, E. H. Partelpoeg. 1987.
- [22] Dintrans, E. C. y Araya, J. C., “Tecnologías en fundiciones de cobre,” rep. tec., Comisión Chilena del Cobre, 2015.

# Anexos

# Anexo A

## Diagrama extendido

56

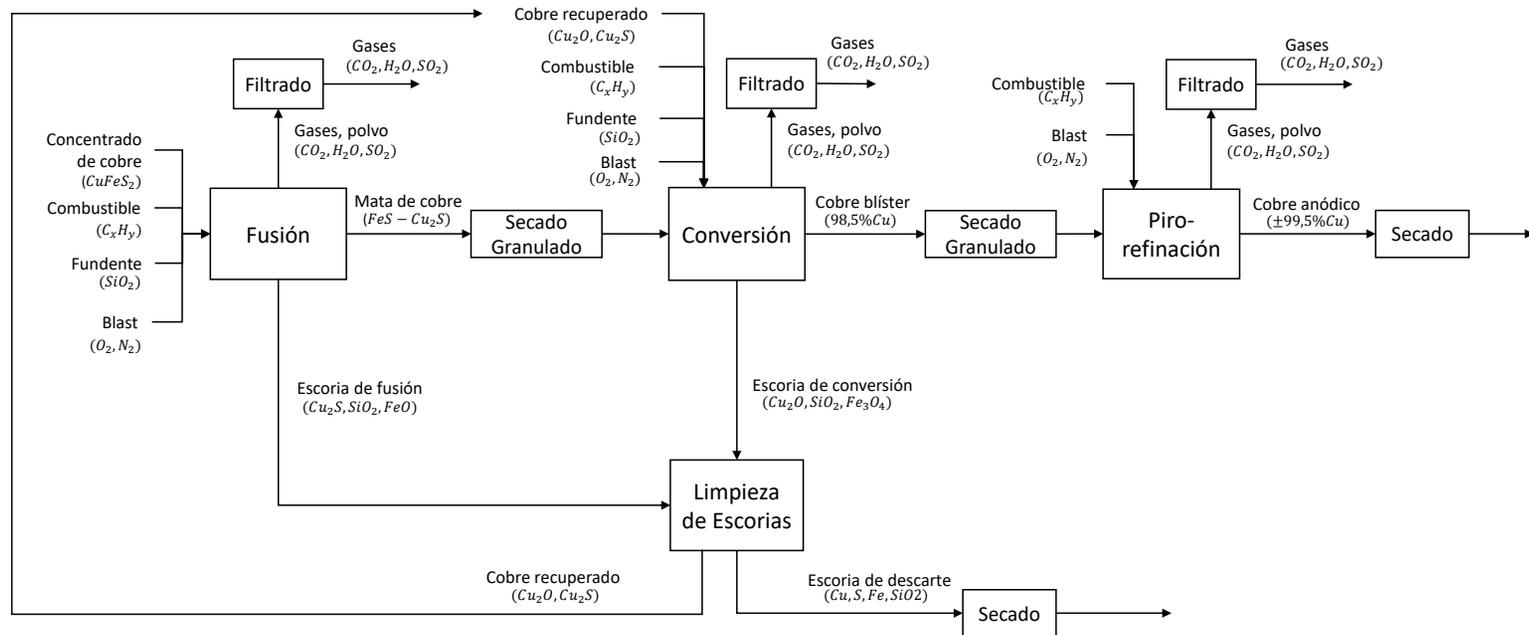


Figura A.1: Diagrama extendido del proceso de fundición de cobre. Se incluyen las operaciones unitarias relevantes del proceso presentadas en 3.1, junto con operaciones complementarias que son necesarias para entender el consumo de energía total dentro de la fundición. Elaboración propia.

# Anexo B

## Parámetros

### B.1. Parámetros Fusión

Tabla B.1: Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de fusión.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de operación	$T_{op}$	1227	°C
Grado de la mata de cobre	$x_{Cu}$	0,6	$(\frac{kg Cu}{kg mata})$
Razón $FeO - SiO_2$	$r_{FeO-SiO_2}$	0,43	-
Pérdida de calor en horno de Fusión	$Q_{pérdida,1}$	500	$\frac{MJ}{ton concentrado}$
Razón de oxígeno en aire	$R_{O_2}^{aire}$	0,232	$(\frac{kg O_2}{kg O_2 + kg N_2})$
Pureza de oxígeno en $O_2^{ind}$	$R_{O_2}^{ind}$	0,93	$(\frac{kg O_2}{kg O_2 + kg N_2})$
Composición de carbono en gas natural	$r_{(\frac{C}{combustible})}$	0,76	-
Composición de hidrógeno en gas natural	$r_{(\frac{H}{combustible})}$	0,23	-
<b>Entalpía reactivos (25 °C)</b>			
$CuFeS_2$	$\Delta H_{CuFeS_2}^{25^\circ C}$	-4,13	$\frac{MJ}{kg}$
Combustible (Gas natural)	$\Delta H_{combustible}^{25^\circ C}$	-1,04	$\frac{MJ}{kg}$
$SiO_2$	$\Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C}$	-15,16	$\frac{MJ}{kg}$
<b>Entalpía productos (1227 °C)</b>			
$Cu_2S$	$\Delta H_{Cu_2S}^{1227^\circ C}$	0,25	$\frac{MJ}{kg}$
$FeS$	$\Delta H_{FeS}^{1227^\circ C}$	0,11	$\frac{MJ}{kg}$
$SiO_2$	$\Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C}$	-13,7	$\frac{MJ}{kg}$
$FeO$	$\Delta H_{FeO}^{1227^\circ C}$	-2,49	$\frac{MJ}{kg}$
$CO_2$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	-7,54	$\frac{MJ}{kg}$
$H_2O$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	-3,66	$\frac{MJ}{kg}$
$SO_2$	$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	-10,75	$\frac{MJ}{kg}$
(Inerte) $N_2$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	1,36	$\frac{MJ}{kg}$

## B.2. Parámetros Conversión

Tabla B.2: Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de conversión.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de operación	$T_{op}$	1227	°C
Pérdida de calor en el horno de Conversión	$Q_{pérdida,2}$	249,25	$\frac{MJ}{t\ mata}$
Razón $FeO - SiO_2$	$r_{FeO-SiO_2}$	0,43	—
Razón de oxígeno en el aire	$R_{O_2}^{aire}$	0,232	$(\frac{kg\ O_2}{kg\ O_2 + kg\ N_2})$
Pureza de oxígeno en $O_2^{ind}$	$R_{O_2}^{ind}$	0,93	$(\frac{kg\ O_2}{kg\ O_2 + kg\ N_2})$
Razón de separación Limpieza de Escorias	$\beta$	0,8	—
Composición de carbono en gas natural	$r_{(\frac{C}{combustible})}$	0,76	—
Composición de hidrógeno en gas natural	$r_{(\frac{H}{combustible})}$	0,23	—
<b>Entalpía reactivos (25°C)</b>			
$Cu_2S$	$\Delta H_{Cu_2S}^{25^\circ C}$	-0,5	$\frac{MJ}{kg}$
$FeS$	$\Delta H_{FeS}^{25^\circ C}$	-1,16	$\frac{MJ}{kg}$
$SiO_2$	$\Delta H_{SiO_2}^{25^\circ C}$	-15,16	$\frac{MJ}{kg}$
$Cu_2O$	$\Delta H_{Cu_2O}^{25^\circ C}$	-1,178	$\frac{MJ}{kg}$
Gas natural	$\Delta H_{comb}^{25^\circ C}$	-1,04	$\frac{MJ}{kg}$
<b>Entalpía productos (1227°C)</b>			
$Cu$	$\Delta H_{Cu}^{1227^\circ C}$	0,75	$\frac{MJ}{kg}$
$Cu_2O$	$\Delta H_{Cu_2O}^{1227^\circ C}$	-0,07	$\frac{MJ}{kg}$
$Fe_3O_4$	$\Delta H_{Fe_3O_4}^{1227^\circ C}$	-3,17	$\frac{MJ}{kg}$
$SiO_2$	$\Delta H_{SiO_2}^{1227^\circ C}$	-13,7	$\frac{MJ}{kg}$
$SO_2$	$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	-3,66	$\frac{MJ}{kg}$
$CO_2$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	-7,54	$\frac{MJ}{kg}$
$H_2O$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	-10,75	$\frac{MJ}{kg}$
(Inerte) $N_2^{out}$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	1,37	$\frac{MJ}{kg}$

### B.3. Parámetros Piro-refinación

Tabla B.3: Parámetros utilizados en el modelo de la etapa de piro-refinación.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de operación	$T_{op}$	1227	°C
Pérdida de calor en el horno de Piro-refinación	$Q_{pérdida,3}$	165,25	$\frac{MJ}{t\ blister}$
Razón de oxígeno en el aire	$R_{O_2}^{aire}$	0,232	$(\frac{kg\ O_2}{kg\ O_2 + kg\ N_2})$
Pureza de oxígeno en $O_2^{ind}$	$R_{O_2}^{ind}$	0,93	$(\frac{kg\ O_2}{kg\ O_2 + kg\ N_2})$
Composición de carbono en gas natural	$r_{(\frac{C}{combustible})}$	0,76	—
Composición de hidrógeno en gas natural	$r_{(\frac{H}{combustible})}$	0,23	—
Composición de azufre en blíster	$r_{(\frac{S}{blister})}$	$6 \cdot 10^{-3}$	—
Composición de oxígeno en blíster	$r_{(\frac{O}{blister})}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—
Composición de azufre en ánodo	$r_{(\frac{S}{ánodo})}$	$3 \cdot 10^{-5}$	—
Composición de oxígeno en ánodo	$r_{(\frac{O}{ánodo})}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	—
<b>Entalpía reactivos (25°C)</b>			
Blíster (> 98,5 %Cu)	$\Delta H_{Cu}^{25^\circ C}$	0	$\frac{MJ}{kg}$
Gas natural	$\Delta H_{comb}^{25^\circ C}$	-1,04	$\frac{MJ}{kg}$
<b>Entalpía productos (1227°C)</b>			
Ánodo (> 99,5 %Cu)	$\Delta H_{Cu}^{1227^\circ C}$	0,75	$\frac{MJ}{kg}$
$SO_2$	$\Delta H_{SO_2}^{1227^\circ C}$	-3,66	$\frac{MJ}{kg}$
$CO_2$	$\Delta H_{CO_2}^{1227^\circ C}$	-7,54	$\frac{MJ}{kg}$
$H_2O$	$\Delta H_{H_2O}^{1227^\circ C}$	-10,75	$\frac{MJ}{kg}$
(Inerte) $N_2^{out}$	$\Delta H_{N_2}^{1227^\circ C}$	1,37	$\frac{MJ}{kg}$

## Anexo C

# Producción de Oxígeno

Para modelar la producción de oxígeno enriquecido dentro del modelo, se utiliza como dato principal la Declaración de Impacto Ambiental de una planta de producción de oxígeno gaseoso ubicada en la región de Antofagasta (Chile). El proyecto de desarrollar esta planta y ponerla en funcionamiento, se hace a partir de la solicitud de Fundición Alto Norte [] de producir oxígeno gaseoso necesario para su proceso, en el equivalente a 120 [ton/día], con una presión de 2,4 Bar y una pureza del 90 %. El equipo utilizado se presenta a continuación.

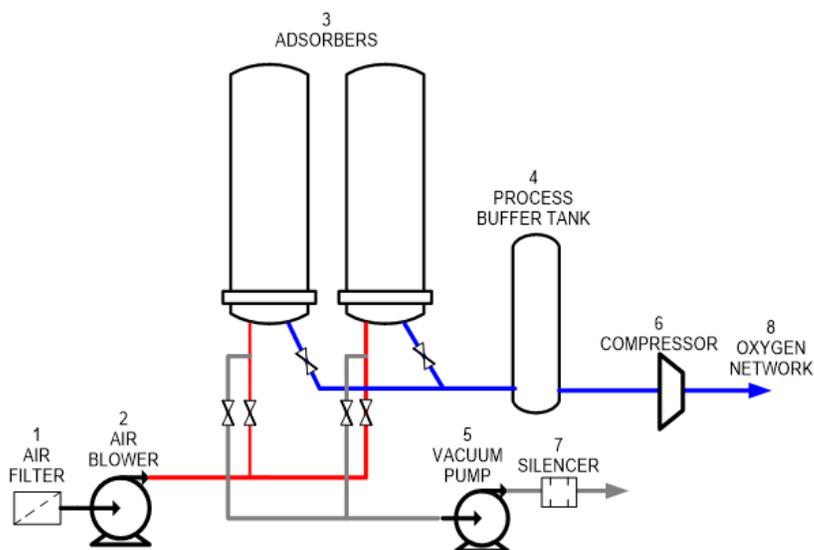


Figura C.1: Equipo Compact VSA serie M-900.

El generador de Oxígeno Compact VSA tipo M - 900, opera con dos adsorbedores (3) y un tanque acumulador (4) que permite una producción continua de oxígeno gaseoso (8). El aire de proceso es aspirado por un soplador de rotores (2), a través del filtro de entrada (1), e impulsado hacia la batería de adsorción (3), que se encuentra en su ciclo de operación. La otra batería que se encuentra en su ciclo de regeneración (operación alternada), se regenera mediante una bomba de vacío (5) y está confeccionada con un soplador de rotores tipo seco de una sola etapa, evacuando a través del silenciador (7). La presión del oxígeno a la salida en el process buffer tank (4), varía entre 1,1 a 1,5

bar abs. El oxígeno debe ser comprimido en el compresor (6), para alcanzar la presión requerida por el cliente 2,4 bar [].

# Anexo D

## Códigos

En esta sección se presentan los códigos utilizados en la simulación de las operaciones consideradas en el modelo.

### D.1. Código Fusión

A continuación se presenta el código utilizado en la simulación de la etapa de fusión:

```
1 % Requerimiento energético Outokumpu Flash Smelting
2 % Modelo
3
4 %Escoria producida en fusion
5 %m_Cu2Sslag;
6 %m_FeO;
7 %m_SiO2out1;
8
9 %Supuestos
10 m_CuFeS2=1000; %Base de calculo kg de CuFeS2 en concentrado
11 R_SiO2 = 0.3/0.7; %SiO2 en escoria (kg SiO2/kg FeO)
12 Q_loss = 500; %Perdida de calor MJ/ton concentrado
13 matte_grade = 0.6; %Grado de Cobre en la matta
14 r_Cuslag = 1*1e-1; %cobre en la escoria
15
16 y_O2air = 0.232; %Oxigeno en aire (O2 / (O2+ N2))
17 y_O2ind = 0.93; %Oxígeno vs Nitrógeno enriquecido
18
19 %%Otros Supuestos
20 %T_salida = 1500K
21 %Combustible utilizado es gas natural o petroleo, se debe configurar
22
23 % Datos
24 %Masa molar especies
25 MM_Cu = 63.55;
26 MM_Fe = 55.85;
27 MM_S = 32;
28 MM_O = 16;
29 MM_N = 14;
30 MM_Si = 28;
```

```

31 MM_C = 12;
32 MM_H = 1;
33 % Masa molar reactivos
34 MM_CuFeS2 = MM_Cu + MM_Fe + MM_S*2; %kg/kgmol
35 MM_O2 = MM_O*2;
36 MM_N2 = MM_N*2;
37 MM_SiO2 = MM_Si + MM_O*2;
38 % Masa molar productos
39 MM_FeO = MM_Fe + MM_O;
40 MM_Cu2S = MM_Cu*2 + MM_S;
41 MM_FeS = MM_Fe + MM_S;
42 MM_CO2 = MM_C + 2*MM_O;
43 MM_SO2 = MM_S + 2*MM_O;
44 MM_H2O = 2*MM_H + MM_O;
45
46
47 % Composición Gas Natural
48 r_Cgas = 0.765;
49 r_Hgas = 0.235;
50 r_Ngas = 1 - r_Cgas - r_Hgas;
51 H_gas = -4.13; %Gas natural
52
53 %Composición petroleo
54 % r_Cgas = 0.87;
55 % r_Hgas = 0.13;
56 % r_Ngas = 1 - r_Cgas - r_Hgas;
57 % H_gas = -1.2; %Petroleo
58
59 % Entalpias
60 % Entalpia reactivos 298K
61 H_CuFeS2 = -1.04; %MJ/kg
62 H_SiO2 = -15.16;
63 % Entalpia productos 1500K
64 H_SiO2out = -13.7;
65 H_FeO = -2.49;
66 H_Cu2S = 0.25;
67 H_FeS = 0.11;
68 H_CO2 = -7.54;
69 H_SO2 = -3.66;
70 H_H2O = -10.75;
71 H_N2out = 1.36;
72
73 %Definicion de m_gas
74 % [T, m_gas]= meshgrid(T_min:20:T_max,0:1:45);
75 % Q y m_gas tienen que tener el mismo rango y partición para coincidir en
76 % la limpieza de escorias
77 Q = linspace(0,600,100);
78 m_gas = linspace(0,36,100);
79 [mat_Q, mat_m_gas] = meshgrid(Q, m_gas);
80
81 % Definición de A
82 % x = [O2, N2, SiO2 in, Cu2S, FeS, matte, FeO, SiO2out, SO2, N2out, CO2,

```

```

83 % H2O, gas]
84 % Una fila es un balance o ecuación
85 % las columnas son variables o componentes de x
86 A = zeros(17,17); %A es 17x17
87 b = zeros(17,1,length(m_gas),length(Q)); %b es 1x17xm-gasxQprec, x es 17x1
88
89 % BM Cobre
90 b(1,1,,:) = (MM_Cu*m_CuFeS2)/MM_CuFeS2;
91 A(1,4) = (2*MM_Cu)/MM_Cu2S;
92 A(1,7) = (2*MM_Cu)/MM_Cu2S;
93 %BM Hierro
94 b(2,1,,:) = (MM_Fe*m_CuFeS2)/MM_CuFeS2;
95 A(2,5) = MM_Fe/MM_FeS;
96 A(2,8) = MM_Fe/MM_FeO;
97 % BM Azufre
98 b(3,1,,:) = (2*MM_S*m_CuFeS2)/MM_CuFeS2;
99 A(3,4) = MM_S/MM_Cu2S;
100 A(3,5) = MM_S/MM_FeS;
101 A(3,7) = MM_S/MM_Cu2S;
102 A(3,11,:) = MM_S/MM_SO2;
103 % BM Oxigeno
104 A(4,1) = -1;
105 A(4,8) = MM_O/MM_FeO;
106 A(4,11) = (2*MM_O)/MM_SO2;
107 A(4,13) = (2*MM_O)/MM_CO2;
108 A(4,14) = MM_O/MM_H2O;
109 % BM Silica
110 A(5,3) = -1;
111 A(5,9) = 1;
112 % BM Nitrogeno
113 A(6,2) = -1;
114 A(6,12) = 1;
115 % BM Carbono
116 A(7,13) = MM_C/MM_CO2;
117 A(7,15) = -r_Cgas;
118 % BM Hidrogeno
119 A(8,14) = 2*MM_H/MM_H2O;
120 A(8,15) = -r_Hgas;
121 % Composicion en slag (Escoria) R_SiO2 = 0.3/0.7; (kg SiO2/kg FeO)
122 A(9,8) = -R_SiO2;
123 A(9,9) = 1;
124 % BM en la mata de cobre
125 A(10,4) = -1;
126 A(10,5) = -1;
127 A(10,6) = 1;
128 % Grado de cobre en la mata de cobre
129 A(11,4) = -2*MM_Cu/MM_Cu2S;
130 A(11,6) = matte_grade;
131 % Cu escoria
132 A(12,7) = 2*MM_Cu/MM_Cu2S;
133 A(12,10) = -r_Cuslag;
134 % Composición escoria

```

```

135 A(13,7) = 1;
136 A(13,8) = 1;
137 A(13,9) = 1;
138 A(13,10) = -1;
139 % Combustible de entrada
140 A(14,15) = 1;
141 % Balance de energía
142 A(15,3) = -H_SiO2;
143 A(15,4) = H_Cu2S;
144 A(15,5) = H_FeS;
145 A(15,8) = H_FeO;
146 A(15,7) = H_Cu2S;
147 A(15,9) = H_SiO2out;
148 A(15,11) = H_SO2;
149 A(15,12) = H_N2out;
150 A(15,13) = H_CO2;
151 A(15,14) = H_H2O;
152 A(15,15) = -H_gas;
153
154 %Balance para el oxígeno y el nitrógeno en el O2 industrial enriquecido
155 %m_O2ind masa de oxígeno industrial (N2+O2)
156 A(16,1) = -1;
157 A(16,16) = y_O2ind;
158 A(16,17) = y_O2air;
159
160 A(17,2) = -1;
161 A(17,16) = (1 - y_O2ind);
162 A(17,17) = (1 - y_O2air);
163
164 % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
165 % x(:,T,m_gas)
166 %Vector de incógnitas
167 % x = [O2, N2, SiO2 in, Cu2S, FeS, matte, FeO, SiO2out, SO2, N2out, CO2,
168 % H2O, gas]
169 x = zeros(17,1,length(m_gas),length(Q));
170
171 %Inicialización de vectores
172 m_O2 = zeros(length(m_gas),length(Q));
173 m_N2 = zeros(length(m_gas),length(Q));
174 m_SiO2 = zeros(length(m_gas),length(Q));
175 m_Cu2S = zeros(length(m_gas),length(Q));
176 m_FeS = zeros(length(m_gas),length(Q));
177 m_matte = zeros(length(m_gas),length(Q));
178 m_Cu2Sslag = zeros(length(m_gas),length(Q));
179 m_FeO = zeros(length(m_gas),length(Q));
180 m_SiO2out1 = zeros(length(m_gas),length(Q));
181 m_slag = zeros(length(m_gas),length(Q));
182 m_SO2 = zeros(length(m_gas),length(Q));
183 m_N2out = zeros(length(m_gas),length(Q));
184 m_CO2 = zeros(length(m_gas),length(Q));
185 m_H2O = zeros(length(m_gas),length(Q));
186

```

```

187 m_O2ind = zeros(length(m_gas),length(Q));
188 m_air = zeros(length(m_gas),length(Q));
189
190 for m = 1:length(m_gas)
191     b(14,1,m,:) = m_gas(m);
192     for n = 1:length(Q)
193         b(15,1,:,n) = Q(n) + m_CuFeS2*H_CuFeS2 - Q_loss;
194         % x(:, :, Q, m_gas)
195         % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
196         x(:, :, m, n) = mldivide(A, b(:, :, m, n));
197         if all(all(x(:, :, m, n) >= 0))
198             m_O2(m, n) = x(1, 1, m, n);
199             m_N2(m, n) = x(2, 1, m, n);
200             m_SiO2(m, n) = x(3, 1, m, n);
201             m_Cu2S(m, n) = x(4, 1, m, n);
202             m_FeS(m, n) = x(5, 1, m, n);
203             m_matte(m, n) = x(6, 1, m, n);
204             m_Cu2Sslag(m, n) = x(7, 1, m, n);
205             m_FeO(m, n) = x(8, 1, m, n);
206             m_SiO2out1(m, n) = x(9, 1, m, n);
207             m_slag = x(10, 1, m, n);
208             m_SO2(m, n) = x(11, 1, m, n);
209             m_N2out(m, n) = x(12, 1, m, n);
210             m_CO2(m, n) = x(13, 1, m, n);
211             m_H2O(m, n) = x(14, 1, m, n);
212             m_O2ind(m, n) = x(16, 1, m, n);
213             m_air(m, n) = x(17, 1, m, n);
214         end
215     end
216 end
217
218 m_comb_1 = m_gas';
219 m_O2_1 = m_O2ind;
220 Qblast_1 = Q';
221
222 [row,col] = find(m_matte);
223 m_mata = m_matte(row(1),col(1)); %el primero que encuentre que es ~=0
224
225 maxO2_1 = max(max(m_O2_1));
226
227 % % %
228 % Electricidad
229
230 % 1. Electricidad producción de O2
231 % Para determinar el requerimiento eléctrico, se debe llevar el flujo O2
232 % a las unidades de Sm3/h.
233 R = 0.0821e-3; %atm*m3/(mol*K)
234 P = 0.9999999; %atm
235 T = 288.15; %°K
236 PM_O2 = 2*MM_O;
237 V_O2 = ((m_O2ind*1000/PM_O2)*R*T)/P; %Sm3/ton concentrado
238 % Power consumption

```

```

239 pc = 0.53; %kwh/m3;
240 E_O2_1 = V_O2*pc; %energía consumida
241 %%estoy un poco confundida con las unidades de kwh uwu
242
243 % 2. Electricidad otros
244 m_offgas = m_SO2 + m_N2out + m_CO2 + m_H2O;
245 % Offgas moving and cleaning
246 f2 = 0.006; %kWh/kg offgas
247 E_offgas1 = f2*m_offgas; %kWh
248
249 % 3. Electricidad para Mata Granulada
250 f3 = 10*1e-3; %kWh/kg granulated matte
251 E_grind1 = f3*m_mata; % kWh
252
253 % 4. Electricidad secado de mata y escoria
254 m_secadofusion = m_mata + m_slag;
255 f41 = 3*1e-3; %kWh/kg of material (kiln drive, blowers, compressors)
256 f42 = 3*1e-3; %kg oil/kg of material (energy of drying)
257 E_secado1 = m_secadofusion*f41; %kWh
258 Comb_secado1 = m_secadofusion*f42; %kg comb
259
260 Etotal_1 = E_O2_1 + E_offgas1 + E_grind1 + E_secado1; %kWh
261
262
263 %end
264 m_O2ind(m_O2ind==0)= nan;
265
266 % graficar el combustible vs el oxígeno, para cada valor de Q
267 figure
268 hold on
269 contour(m_O2ind, mat_m_gas, mat_Q, 10, 'ShowText','off') % Q(m,n) = f( m_O2(m
    ↔ ,n) + m_gas(m,n))
270 %scatter(m_O2ind(:), mat_m_gas(:)) % Q(m,n) = f( m_O2(m,n) + m_gas(m,n))
271 a = colorbar;
272 a.Label.String = 'Calor precalentado [MJ/t CuFeS_2]';
273 a.FontSize = 11;
274 title('Fusión')
275 xlabel('O_2 industrial [kg O_2/t CuFeS_2]')
276 ylabel('Combustible [kg gas/t CuFeS_2]')
277 xlim([0 200])
278 ylim([0 35])
279 hold off

```

## D.2. Código Conversión y Limpieza de Escorias

A continuación se presenta el código utilizado en la simulación de la etapa de conversión:

```

1 % Requerimiento energético Outokumpu Flash Converting
2 % Modelo v1, basado en Flash Smelting
3 %-> se agregan las ecuaciones del oxígeno industrial

```

```

4 %close
5 %clear all
6
7 % Supuestos
8
9 %function [m_comb_2, m_O2_2, Qblast_2, m_blister, m_Cu2Oslag,m_SiO2out2,
    ↪ m_Fe3O4,A,b] = convertidor(m_mata)
10
11 m_FeS = 0.25*m_mata;
12 m_Cu2S = 0.75*m_mata;
13 Q_loss2 = 500*(m_mata/1000); % MJ/ton mata solida
14 R_O2air = 0.232; %Oxigeno en aire (O2 / (O2+ N2))
15 R_O2ind = 0.93; %Oxígeno vs Nitrógeno enriquecido
16
17 % Composición Gas Natural
18 r_Cfuel = 0.76;
19 r_Hfuel = 0.23;
20 r_Nfuel = 1 - r_Cfuel - r_Hfuel;
21 H_fuel = -4.13; %Gas natural
22 %Composición petroleo
23 % r_Cfuel = 0.87;
24 % r_Hfuel = 0.13;
25 % r_Nfuel = 1 - r_Cfuel - r_Hfuel;
26 % H_fuel = -1.2; %Petroleo
27
28 R_slag = 30/70; % Composición Slag SiO2/Fe3O4
29 beta = 0.8;
30
31 % Parametros
32 % Masas molares elementos
33 MM_Cu = 63.55;
34 MM_Fe = 55.85;
35 MM_S = 32;
36 MM_O = 16;
37 MM_N = 14;
38 MM_Si = 28;
39 MM_C = 12;
40 MM_H = 1;
41
42 % Masa molar reactivos kg/kgmol
43 MM_Cu2S = MM_Cu*2 + MM_S;
44 MM_Cu2O = MM_Cu*2 + MM_O;
45 MM_FeS = MM_Fe + MM_S;
46 MM_O2 = MM_O*2;
47 MM_N2 = MM_N*2;
48 MM_SiO2 = MM_Si + MM_O*2;
49
50 % Masa molar productos
51 MM_Fe3O4 = 3*MM_Fe + 4*MM_O;
52 MM_Cu2O = 2*MM_Cu + MM_O;
53 MM_CO2 = MM_C + 2*MM_O;
54 MM_SO2 = MM_S + 2*MM_O;

```

```

55 MM_H2O = 2*MM_H + MM_O;
56
57 % Entalpías
58 % Entalpia compuestos entrada 25°C
59 Hc_matte = -665; %MJ/kg
60 Hc_SiO2 = -15.16;
61 H0_O2 = 0;
62 H0_N2 = 0;
63 Hc_Cu2O = -1.178;
64 Hc_Cu2S = -0.5;
65 % Entalpia productos 1227°C
66 H_Cu0 = 0.75;
67 H_Fe3O4 = -3.17;
68 Hh_SiO2slag = -13.7;
69 H_Cu2O = -0.07;
70 H_SO2 = -3.66;
71 H_N2out = 1.37;
72 H_CO2 = -7.54;
73 H_H2O = -10.75;
74
75 %Definicion de m_fuel
76 % [T, m_fuel]= meshgrid(T_min:20:T_max,0:1:45);
77 Q = linspace(0,300,100);
78 m_fuel = linspace(0,20,100);
79 %Q = 0;
80 %m_fuel = 0;
81 [mat_Q, mat_m_fuel] = meshgrid(Q, m_fuel);
82
83
84 % Definición de A
85 % x = [O2blast, N2blast, SiO2 in, Cu0, Fe3O4 slag, Cu2O slag, SiO2 slag,
86 %m_slag, SO2, N2out, CO2, H2O, m_fuel, mdust_out, mdust_in, m_O2ind, m_air]
87 % Una fila es un balance o ecuación
88 % las columnas son variables o componentes de x
89 % A es de 17x17
90 % x es 17x1
91 % b es 1x17 -> transpose(b) es de 17x1
92 A = zeros(17,17);
93 b = zeros(17,1,length(m_fuel),length(Q));
94
95 %Definir m_Cu2S, m_FeS
96 %Balance cobre
97 b(1,1,:,:) = (2*MM_Cu / MM_Cu2S)*m_Cu2S;
98 A(1,4) = 1;
99 A(1,6) = 2*MM_Cu/MM_Cu2O;
100 A(1,16) = -(2*MM_Cu/MM_Cu2O);
101 A(1,17) = -(2*MM_Cu/MM_Cu2S);
102 %Balance hierro
103 b(2,1,:,:) = ((MM_Fe*m_FeS) / MM_FeS);
104 A(2,5) = 3*MM_Fe / MM_Fe3O4;
105 %Balance azufre
106 b(3,1,:,:) = ((MM_S*m_FeS) / MM_FeS) + (MM_S / MM_Cu2S)*m_Cu2S;

```

```

107 A(3,9) = MM_S/MM_SO2;
108 A(3,17) = -(MM_S/MM_Cu2S);
109 %Balance oxigeno
110 A(4,1) = -1;
111 A(4,5) = 4*MM_O/MM_Fe3O4;
112 A(4,6) = MM_O/MM_Cu2O;
113 A(4,9) = 2*MM_O/MM_SO2;
114 A(4,11) = 2*MM_O/MM_CO2;
115 A(4,12) = MM_O/MM_H2O;
116 %Balance silica
117 A(5,3) = -1;
118 A(5,7) = 1;
119 %Balance Nitrogeno
120 A(6,2) = -1;
121 A(6,10) = 1;
122 A(6,13) = -r_Nfuel;
123 %Balance carbono
124 A(7,11) = MM_C / MM_CO2;
125 A(7,13) = -r_Cfuel;
126 %Balance hidrogeno
127 A(8,12) = 2*MM_H / MM_H2O;
128 A(8,13) = -r_Hfuel;
129 %Masa slag
130 A(9,5) = -1;
131 A(9,6) = -1;
132 A(9,7) = -1;
133 A(9,8) = 1;
134 %Razon de SiO2 en slag
135 A(10,5) = -R_slag; %Composición Slag SiO2/Fe3O
136 A(10,7) = 1;
137 %Razon de Cu2O en slag
138 A(11,6) = 1;
139 A(11,8) = -0.18; %%revisar
140 %Cantidad de combustible
141 A(12,13) = 1;
142
143 %Balance de energía
144 A(13,3) = -Hc_SiO2;
145 A(13,4) = H_Cu0;
146 A(13,5) = H_Fe3O4;
147 A(13,6) = H_Cu2O;
148 A(13,7) = Hh_SiO2slag;
149 A(13,9) = H_SO2;
150 A(13,10) = H_N2out;
151 A(13,11) = H_CO2;
152 A(13,12) = H_H2O;
153 A(13,13) = -H_fuel;
154 A(13,16) = -Hc_Cu2O;
155 A(13,17) = -Hc_Cu2S;
156
157 %Balance para el oxígeno y el nitrogeno en el O2 industrial enriquecido
158 %m_O2ind masa de oxigeno industrial (N2+O2)

```

```

159 A(14,1) = -1;
160 A(14,14) = R_O2ind;
161 A(14,15) = R_O2air;
162
163 A(15,2) = -1;
164 A(15,14) = (1 - R_O2ind);
165 A(15,15) = (1 - R_O2air);
166
167 A(16,6) = -beta;
168 A(16,16) = 1;
169
170 [row2,col2] = find(m_Cu2Sslag);
171 m_Cu2Sslag = m_Cu2Sslag(row2(1),col2(1));
172 b(17,1,:) = beta*m_Cu2Sslag;
173 A(17,17) = 1;
174
175 %Solver
176 % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
177 % x(:,T,m_fuel)
178 x = zeros(size(A,1),1,length(m_fuel),length(Q));
179
180 %Inicialización de vectores
181 m_O2blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
182 m_N2blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
183 m_SiO2in = zeros(length(m_fuel),length(Q));
184 m_Cu0 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
185 m_Fe3O4 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
186 m_Cu2Oslag = zeros(length(m_fuel),length(Q));
187 m_SiO2out2 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
188 m_slag = zeros(length(m_fuel),length(Q));
189 m_SO2 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
190 m_N2out = zeros(length(m_fuel),length(Q));
191 m_CO2 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
192 m_H2O = zeros(length(m_fuel),length(Q));
193 m_O2ind = zeros(length(m_fuel),length(Q));
194 m_air = zeros(length(m_fuel),length(Q));
195 m_Cu2Orec = zeros(length(m_fuel),length(Q));
196 m_Cu2Srec = zeros(length(m_fuel),length(Q));
197
198 %Vector de incógnitas
199 % x = [O2blast, N2blast, SiO2 in, Cu0, Fe3O4 slag, Cu2O slag, SiO2 slag,
200 % m_slag, SO2, N2out, CO2, H2O, m_fuel, mdust_out, mdust_in, m_O2ind, m_air]
201 for m = 1:length(m_fuel)
202     b(12,1,m,:) = m_fuel(m);
203     for n = 1:length(Q)
204         b(13,1,:,n) = Q(n) + (m_mata*1e-3)*Hc_matte - Q_loss2;
205         % x(:,n, Q, m_fuel)
206         % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
207         x(:,n,m,n) = mldivide(A,b(:,n,m,n));
208         if all(all(x(:,n,m,n) >= 0))
209             m_O2blast(m,n) = x(1,1,m,n);
210             m_N2blast(m,n) = x(2,1,m,n);

```

```

211     m_SiO2in(m,n) = x(3,1,m,n);
212     m_Cu0(m,n) = x(4,1,m,n);
213     m_Fe3O4(m,n) = x(5,1,m,n);
214     m_Cu2Oslag(m,n) = x(6,1,m,n);
215     m_SiO2out2(m,n) = x(7,1,m,n);
216     m_slag(m,n) = x(8,1,m,n);
217     m_SO2(m,n) = x(9,1,m,n);
218     m_N2out(m,n) = x(10,1,m,n);
219     m_CO2(m,n) = x(11,1,m,n);
220     m_H2O(m,n) = x(12,1,m,n);
221     m_O2ind(m,n) = x(14,1,m,n);
222     m_air(m,n) = x(15,1,m,n);
223     m_Cu2Orec = x(16,1,m,n);
224     m_Cu2Srec = x(17,1,m,n);
225     end
226     end
227 end
228
229 %O2_blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
230 %O2_blast = m_O2blast / (m_O2blast + m_N2blast);
231
232 m_comb_2 = m_fuel'; % (m,n)
233 m_O2_2 = m_O2ind; % (m,n)
234 Qblast_2 = Q'; % vector
235
236 [row,col] = find(m_Cu0);
237 m_blistier = m_Cu0(row(1),col(1)); %el primero que encuentre que es ~=0
238 maxO2_2 = max(max(m_O2_2));
239
240 % Flujos de la limpieza de escorias
241
242 [row3,col3] = find(m_FeO);
243 M1_FeO = m_FeO(row3(1),col3(1));
244
245 [row4,col4] = find(m_Fe3O4);
246 M1_Fe3O4 = m_Fe3O4(row4(1),col4(1));
247
248 [row5,col5] = find(m_SiO2out1);
249 m_SiO2out1 = m_SiO2out1(row5(1),col5(1));
250
251 [row6,col6] = find(m_SiO2out2);
252 m_SiO2out2 = m_SiO2out2(row6(1),col6(1));
253
254 M1_SiO2 = m_SiO2out1 + m_SiO2out2;
255
256
257 % % %
258 % Electricidad
259
260 % 1. Electricidad producción de O2
261 % Para determinar el requerimiento eléctrico, se debe llevar el flujo O2
262 % a las unidades de Sm3/h.

```

```

263 R = 0.0821e-3; %atm*m3/(mol*K)
264 P = 0.9999999; %atm
265 T = 288.15; %°K
266 PM_O2 = 2*MM_O;
267 V_O2 = ((m_O2ind*1000/PM_O2)*R*T)/P; %Sm3/ton concentrado
268 % Power consumption
269 pc = 0.53; %kwh/m3;
270 E_O2_2 = V_O2*pc; %energía consumida
271 %%estoy un poco confundida con las unidades de kwh uwu
272
273 % 2. Electricidad otros
274 m_offgas = m_SO2 + m_N2out + m_CO2 + m_H2O;
275 % Offgas moving and cleaning
276 f2 = 0.006; %kWh/kg offgas
277 E_offgas2 = f2*m_offgas; %kWh
278
279 % 3. Electricidad para Mata Granulada
280 f3 = 10*1e-3; %kWh/kg granulated matte
281 E_grind2 = f3*m_mata; % kWh
282
283 % 4. Electricidad secado de mata y escoria
284 m_secadofusion = m_mata + m_slag;
285 f41 = 3*1e-3; %kWh/kg of material (kiln drive, blowers, compressors)
286 f42 = 3*1e-3; %kg oil/kg of material (energy of drying)
287 E_secado2 = m_secadofusion*f41; %kWh
288 Comb_secado2 = m_secadofusion*f42; %kg comb
289
290 Etotal_2 = E_O2_2 + E_offgas2 + E_grind2 + E_secado2; %kWh
291
292
293 %end
294
295 m_O2ind(m_O2ind==0)= nan;
296 % graficar el combustible vs el oxígeno, para cada valor de Q
297 figure
298 hold on
299 contour(m_O2ind, mat_m_fuel, mat_Q,10) % Q(m,n) = f( m_O2(m,n) + m_fuel(m,
    ↪ n))
300 %scatter(m_O2ind(:), mat_m_gas(:))
301 a = colorbar;
302 a.Label.String = 'Calor precalentado [MJ/t CuFeS_2]';
303 a.FontSize = 11;
304 title('Conversión')
305 xlabel('O_2 industrial [kg O_2/t CuFeS_2]')
306 %xlim([0 50])
307 ylabel('Combustible [kg gas/t CuFeS_2]')
308 %ylim([0 15])
309 hold off
310 %

```

## D.3. Código Piro-refinación

A continuación se presenta el código utilizado en la simulación de la etapa de piro-refinación:

```
1 % Requerimiento energético Outokumpu Flash Fire Refining
2 % Modelo v1, basado en Flash Smelting
3
4 % close
5 % clear all
6
7 %function [m_comb_3, m_O2_3, Qblast_3, m_anode] = piro_ref(m_blister)
8 % Parametros
9 Q_loss3 = 500*(m_blister/1000); %
10 R_O2air = 0.232; %Oxigeno en aire (O2 / (O2+ N2))
11 R_O2ind = 0.93; %Oxígeno vs Nitrógeno enriquecido
12
13 % Composiciones blister y anodo
14 %Extractive Metallurgy of Copper
15 S_blister = 0.6/100;
16 O_blister = 0.3/100;
17 Cu_blister = 1 - S_blister - O_blister;
18 S_anode = 0.003/100;
19 O_anode = 0.16/100;
20 Cu_anode = 1 - S_anode - O_anode;
21
22 % Composición Gas Natural
23 r_Cfuel = 0.76;
24 r_Hfuel = 0.23;
25 r_Nfuel = 1 - r_Cfuel - r_Hfuel;
26 H_fuel = -4.13; %Gas natural
27 %Composición petroleo
28 % r_Cfuel = 0.87;
29 % r_Hfuel = 0.13;
30 % r_Nfuel = 1 - r_Cfuel - r_Hfuel;
31 % H_fuel = -1.2; %Petroleo
32
33 % Masas molares elementos
34 MM_Cu = 63.55;
35 MM_Fe = 55.85;
36 MM_S = 32;
37 MM_O = 16;
38 MM_N = 14;
39 MM_Si = 28;
40 MM_C = 12;
41 MM_H = 1;
42
43 % Masas molares compuestos
44 MM_CO2 = MM_C + 2*MM_O;
45 MM_SO2 = MM_S + 2*MM_O;
46 MM_H2O = 2*MM_H + MM_O;
47
```

```

48 %Entalpias de compuestos
49 %reactantes a 298K
50 H_blistier = 0; %esta compuesto por Cu0
51 %productos a 1500K
52 H_anode = 0.75; %compuesto por Cu0
53 H_SO2 = -3.66;
54 H_N2out = 1.37;
55 H_CO2 = -7.54;
56 H_H2O = -10.75;
57
58 %Definicion de m_fuel
59 % [T, m_fuel]= meshgrid(T_min:20:T_max,0:1:45);
60 Q = linspace(0,200,100);
61 m_fuel = linspace(0,18,100); %este rango fue escogido mediante análisis gráfico de
62 % las soluciones factibles (m_i>0 para todo i)
63 [mat_Q, mat_m_fuel] = meshgrid(Q, m_fuel);
64
65 % Definición de A
66 % x = [O2blast, N2blast,Cu_anode, m_anode, m_slag, SO2, N2out, CO2, H2O,
67 % m_fuel, Q_blast, m_O2ind, m_air]
68 % Una fila es un balance o ecuación
69 % las columnas son variables o componentes de x
70 % A es de 11x11
71 % x es 11x1
72 % b es 1x11 -> transpose(b) es de 11x1
73 A = zeros(11,11);
74 b = zeros(11,1,length(m_fuel),length(Q));
75
76 %Balance cobre
77 b(1,1,,:) = Cu_blistier*m_blistier;
78 A(1,3) = Cu_anode;
79
80 %Balance azufre
81 b(2,1,,:) = S_blistier*m_blistier;
82 A(2,3) = S_anode;
83 A(2,4) = MM_S/MM_SO2;
84
85 %Balance oxigeno
86 b(3,1,,:) = O_blistier*m_blistier;
87 A(3,1) = -1;
88 A(3,3) = O_anode;
89 A(3,4) = MM_O/MM_SO2;
90 A(3,6) = MM_O/MM_CO2;
91 A(3,7) = MM_O/MM_H2O;
92
93 %Balance Nitrogeno
94 A(4,2) = 1;
95 A(4,5) = -1;
96 A(4,8) = r_Nfuel;
97
98 %Balance carbono
99 A(5,6) = -MM_C/MM_CO2;

```

```

100 A(5,8) = r_Cfuel;
101
102 %Balance hidrogeno
103 A(6,7) = -MM_H/MM_H2O;
104 A(6,8) = r_Hfuel;
105
106 %Flujo combustible
107 A(7,8) = 1;
108
109 %Calor de precalentado
110 A(8,9) = 1;
111
112 %Entalpia
113 b(9,1,:) = (m_blistar*1e-3)*H_blistar - Q_loss3;
114 A(9,3) = H_anode;
115 A(9,4) = H_SO2;
116 A(9,5) = H_N2out;
117 A(9,6) = H_CO2;
118 A(9,7) = H_H2O;
119 A(9,8) = -H_fuel;
120 A(9,9) = -1;
121
122 %Balance para el oxígeno y el nitrógeno en el O2 industrial enriquecido
123 %m_O2ind masa de oxígeno industrial (N2+O2)
124 A(10,1) = -1;
125 A(10,10) = R_O2ind;
126 A(10,11) = R_O2air;
127
128 A(11,2) = -1;
129 A(11,10) = (1 - R_O2ind);
130 A(11,11) = (1 - R_O2air);
131
132 %Solver
133 % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
134 % x(:,T,m_fuel)
135 x = zeros(size(A,1),1,length(m_fuel),length(Q));
136
137 %Inicialización de vectores
138 m_O2blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
139 m_N2blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
140 m_anode = zeros(length(m_fuel),length(Q));
141 m_SO2 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
142 m_N2out = zeros(length(m_fuel),length(Q));
143 m_CO2 = zeros(length(m_fuel),length(Q));
144 m_H2O = zeros(length(m_fuel),length(Q));
145
146 m_O2ind = zeros(length(m_fuel),length(Q));
147 m_air = zeros(length(m_fuel),length(Q));
148 O2_blast = zeros(length(m_fuel),length(Q));
149
150 %Vector de incógnitas
151 % x = [O2blast, N2blast, m_anode, SO2, N2out, CO2, H2O, m_fuel, m_O2ind,

```

```

152 % m_air]
153 for m = 1:length(m_fuel)
154     b(7,1,m,:) = m_fuel(m);
155     for n = 1:length(Q)
156         b(8,1,:,n) = Q(n);
157         % x(:, :, Q, m_fuel)
158         % Nota: mldivide(A,b) es equivalente a usar A\b
159         x(:, :, m, n) = mldivide(A, b(:, :, m, n));
160         if all(all(x(:, :, m, n) >= 0))
161             m_O2blast(m, n) = x(1, 1, m, n);
162             m_N2blast(m, n) = x(2, 1, m, n);
163             m_anode(m, n) = x(3, 1, m, n);
164             m_SO2(m, n) = x(4, 1, m, n);
165             m_N2out(m, n) = x(5, 1, m, n);
166             m_CO2(m, n) = x(6, 1, m, n);
167             m_H2O(m, n) = x(7, 1, m, n);
168
169             m_O2ind(m, n) = x(10, 1, m, n);
170             m_air(m, n) = x(11, 1, m, n);
171         end
172     end
173 end
174
175 %O2_blast = m_O2blast / (m_O2blast + m_N2blast);
176
177 m_comb_3 = m_fuel;
178 m_O2_3 = m_O2ind;
179 Qblast_3 = Q;
180
181 [row,col] = find(m_anode);
182 m_anodo = m_anode(row(1),col(1)); %el primero que encuentre que es ~=0
183 maxO2_3 = max(max(m_O2_3));
184
185 %%%
186 % Electricidad
187
188 % 1. Electricidad producción de O2
189 % Para determinar el requerimiento eléctrico, se debe llevar el flujo O2
190 % a las unidades de Sm3/h.
191 R = 0.0821e-3; %atm*m3/(mol*K)
192 P = 0.99999999; %atm
193 T = 288.15; %°K
194 PM_O2 = 2*MM_O;
195 V_O2 = ((m_O2ind*1000/PM_O2)*R*T)/P; %Sm3/ton concentrado
196 % Power consumption
197 pc = 0.53; %kwh/m3;
198 E_O2_3 = V_O2*pc; %energía consumida
199 %%%estoy un poco confundida con las unidades de kwh uwu
200
201 % 2. Electricidad otros
202 m_offgas = m_SO2 + m_N2out + m_CO2 + m_H2O;
203 % Offgas moving and cleaning

```

```

204 f2 = 0.006; %kWh/kg offgas
205 E_offgas3 = f2*m_offgas; %kWh
206
207 % 4. Electricidad secado de mata y escoria
208 m_secadofusion = m_anode;
209 f41 = 3*1e-3; %kWh/kg of material (kiln drive, blowers, compressors)
210 f42 = 3*1e-3; %kg oil/kg of material (energy of drying)
211 E_secado3 = m_secadofusion*f41; %kWh
212 Comb_secado3 = m_secadofusion*f42; %kg comb
213
214 Etotal_3 = E_O2_3 + E_offgas3 + E_grind3 + E_secado3; %kWh
215
216
217 %end
218
219
220 m_O2ind(m_O2ind==0)= nan;
221 mat_m_fuel(m_O2ind==0)= nan;
222
223 %graficar el combustible vs el oxígeno, para cada valor de Q
224 figure
225 hold on
226 contour(m_O2ind, mat_m_fuel, mat_Q, 10) % Q(m,n) = f( m_O2(m,n) + m_fuel(m,
    ↪ n))
227 %scatter(m_O2ind(:), mat_m_fuel(:))
228 a = colorbar;
229 a.Label.String = 'Calor precalentado [MJ/t CuFeS_2]';
230 a.FontSize = 11;
231 xlabel('O_2 industrial [kg O_2 / t CuFeS_2]')
232 xlim([0 30])
233 title('Piro-refinación')
234 ylabel('Combustible [kg gas/t CuFeS_2]')
235 ylim([0 12])
236 hold off
237 %
238
239 % m_O2ind(m_O2ind==0)= nan;
240 % mat_m_fuel(m_O2ind==0)= nan;
241 % %graficar el combustible vs el oxígeno, para cada valor de Q
242 % figure
243 % hold on
244 % scatter(m_O2ind(:), mat_m_fuel(:)) % Q(m,n) = f( m_O2(m,n) + m_fuel(m,n))
245 % xlabel('O2 [kg O2/ton CuFeS2]')
246 % xlim([0 30])
247 % ylabel('Combustible [kg gas/ton CuFeS2]')
248 % ylim([0 12])
249 % hold off
250 % %

```