

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA



*Evaluación y Análisis del Comportamiento
Actual y Futuro de las Escorias de la
Fundición de Cobre de
Southern Perú Copper Corporation*

TESIS

Para optar el título profesional de

INGENIERO QUIMICO

MIGUEL EDUARDO PIMENTEL CASAFRANCA

Lima - Perú
1995

PROLOGO

El complejo minero metalúrgico operado por Southern Peru Copper Corporation en el sur del país, comprende las Minas y Concentradoras de Toquepala y Cuajone, la Fundición y la Refinería de Ilo.

Los minerales obtenidos en las minas de Toquepala y Cuajone son tratados en las respectivas concentradoras, obteniendo como producto principal concentrados de cobre, y como subproducto concentrados de molibdeno.

Los concentrados de cobre producidos son tratados en la Fundición de Ilo, además de concentrados comprados de otras empresas, con la finalidad de llegar a su máxima capacidad de fusión.

La Fundición de Ilo, opera un proceso convencional de fusión y conversión. Esta cuenta con tres hornos de fusión tipo reverbero (uno de los cuales tiene el récord mundial de 34 años continuos de operación sin apagarlo), los productos fundidos, ricos en sulfuros de cobre pasan a la etapa de conversión, contando la fundición con siete convertidores Peirce-Smith, de los cuales seis están en operación continua y uno en reparación. El producto final de esta etapa es el cobre blister, el cual es transportado a las plantas de moldeo, de donde se obtendrá el producto final de la fundición que son las barras de cobre blister.

Parte de estas barras son llevadas a la Refinería de Ilo, en la cual se obtendrá como producto final los cátodos de cobre; siendo la parte restante comercializadas como tales.

La Fundición de Cobre de Southern Peru Copper Corporation, ha decidido realizar ciertas modificaciones en el proceso actual de obtención de cobre blister; la implementación de un Reactor Modificado Teniente cambiará en forma sustancial las operaciones actuales.

Este nuevo reactor tendrá funciones tanto de fusión como de conversión, por lo cual uno de los hornos reverberos y dos de los convertidores serán puestos fuera de operación, manteniendo la capacidad actual de fusión y producción de cobre anual.

La construcción de una planta de oxígeno y una planta de ácido sulfúrico complementarán esta modernización.

INTRODUCCIÓN

Uno de los productos de mayor importancia dentro del proceso productivo de la Fundición de Ilo, son las escorias; que son productos básicamente formados por silicatos de fierro, calcio y alúmina, contienen cantidades de cobre, que para el caso de las escorias de horno reverbero, significan pérdidas para la empresa.

Las escorias se producen tanto en la etapa de fusión, como en la etapa de conversión, llegando los contenidos de cobre hasta 0.55% en las escorias de fusión y 2.75% en las escorias de conversión. Estas últimas, dado su alto contenido de cobre, son retornadas a los hornos de fusión para la recuperación de éste.

Con la implementación de la nueva tecnología, se esperan grandes cambios en éstos productos. Las escorias generadas en el Convertidor Modificado Teniente, tendrán aproximadamente un 8% de contenido de cobre, el cual al ser retornado a los hornos reverberos causarán un impacto directo sobre las pérdidas de cobre en las escorias de fusión. Se espera por lo tanto, un incremento del contenido de cobre en las escorias de fusión.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad caracterizar las propiedades más importantes de las escorias, tanto de fusión como de conversión para el proceso actual, así con esta información modelada predecir las propiedades de las escorias en el proceso futuro (implementación de la nueva tecnología). Además se tiene como finalidad predecir el impacto en las pérdidas de cobre en las escorias de fusión con este cambio, a la vez se dan también métodos alternativos

de tratamiento de escorias de CMT para disminuir las pérdidas de cobre durante el proceso productivo.

En el Capítulo I se presenta a forma de introducción los procesos de obtención de cobre más conocidos, dando mayor énfasis a los procesos pirometalúrgicos, dado que el tratamiento de concentrados de cobre (campo en el cual nos vamos a desenvolver) es un proceso netamente pirometalúrgico.

En el Capítulo II se presenta una descripción completa del proceso actual de producción de cobre blister de la Fundición de Ilo, así como también una descripción del proceso futuro. Se presentan además los balances completos de materia y energía de cada uno de los procesos a tratar.

En el Capítulo III se presentan las más importantes características de las escorias de la Fundición de Ilo, tales como propiedades físicas, químicas, estructurales; también se ve la influencia que tiene cada una de estas propiedades sobre las pérdidas de cobre en las escorias. Los resultados obtenidos en esta parte del trabajo sirven como base para la estructuración de un programa, el cual nos ayudará a predecir las características más importantes de las escorias en el proceso futuro, y también cual será la influencia de estas sobre las pérdidas de cobre en las escorias.

En el Capítulo IV se tratan aspectos relacionados con los métodos alternativos de tratamiento de escorias en la operación futura. Se buscará calcular cual sería el impacto de tratar las escorias del Convertidor Teniente, usando métodos alternativos al retorno de estas a los hornos reverberos.

En el Capítulo V se muestran cálculos económicos de los beneficios a obtenerse si reducimos las pérdidas de cobre en escorias, debido a tratamientos alternativos planteados en el Capítulo IV.

En el Apéndice A se muestra en forma general el modelo METSIM planteado para la Fundición de Ilo, especificando las asunciones tomadas y la estrategia de programación de cada bloque involucrado en el proceso.

En el Apéndice B se muestran los cálculos detallados de la propiedades de las escorias, tanto de fusión como de conversión, además de cuadros resumen de los principales análisis químicos tomados como base para estos cálculos.

En los Apéndices C y D se muestra todo lo relacionado con el tratamiento de escorias. Se muestran los balances de materia planteados para cada método de tratamiento (pirometalúrgico y flotación); se presenta la base teórica del tratamiento pirometalúrgico, así como también el dimensionamiento y la capacidad instalada de los reactores en la Fundición de Ilo.

En el Apéndice E se muestran todos los cálculos usados para la evaluación económica del método propuesto para tratamiento de escorias de CMT (método pirometalúrgico), tanto la evaluación para el porcentaje óptimo a tratar como también un análisis de sensibilidad en base a la variación de dos parámetros importantes: Precio de cobre y precio del petróleo.

Finalmente, en el Apéndice F se muestra un resumen de las propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en el proceso productivo del cobre.

INDICE

Prologo	4
Introducción	6
Indice	10

CAPITULO I : PROCESOS DE OBTENCIÓN DE COBRE 15

1.1 Procesos Hidrometalúrgicos	15
--------------------------------	----

1.2 Procesos Pirometalúrgicos	19
-------------------------------	----

1.2.1 Procesos de Fusión	19
--------------------------	----

1.2.1.1 Fusión en Hornos de Cuba	19
----------------------------------	----

1.2.1.2 Fusión en Hornos Reverberos	22
-------------------------------------	----

1.2.1.3 Fusión en Hornos Eléctricos	24
-------------------------------------	----

1.2.1.4 Fusión en Hornos Flash	24
--------------------------------	----

1.2.1.5 Fusión en Hornos Isasmelt	27
-----------------------------------	----

1.2.2 Proceso de Conversión	29
-----------------------------	----

1.2.3 Procesos de Fusión y Conversión Continuos	29
---	----

1.2.3.1 Proceso Noranda	29
-------------------------	----

1.2.3.2 Proceso El Teniente	31
-----------------------------	----

1.2.3.3 Proceso Mitsubishi	33
----------------------------	----

CAPITULO II : DESCRIPCIÓN DEL PROCESO 35

2.1 Descripción del Proceso Actual	35
------------------------------------	----

2.1.1	Proceso de Fusión	36
2.1.1.1	Caracterización de los Hornos Reverberos	36
2.1.1.2	Materias Primas	39
2.1.1.3	Descripción del Proceso	41
2.1.1.3.1	Físico-Química de la Fusión de Mata	42
2.1.1.3.2	Formación, Constitución y Características de las Escorias	45
2.1.2	Proceso de Conversión	45
2.1.2.1	Caracterización de los Convertidores	45
2.1.2.2	Materias Primas	46
2.1.2.3	Descripción del Proceso	47
2.1.2.3.1	Etapas del Proceso de Conversión	48
2.2	Descripción del Proceso Futuro	52
2.2.1	Proceso Productivo General	52
2.3	Balance de Materia y Energía del Proceso Actual	55
2.3.1	Preparación de Camas	55
2.3.2	Balance de Materia Hornos Reverberos	57
2.3.2.1	Parámetros de Combustión	57
2.3.2.2	Balance de Materia	58
2.3.3	Balance de Materia Convertidores	63
2.3.4	Balance de Energía	65
2.4	Balance de Materia y Energía del Proceso Futuro	71
2.4.1	Preparación de Camas	71
2.4.2	Balance de Materia Hornos Reverberos	72
2.4.2.1	Parámetros de Combustión	72
2.4.2.2	Balance de Materia	72

2.4.3 Balance de Materia Convertidores	76
2.4.4 Balance de Materia Convertidor Teniente	77
2.4.5 Balance de Energía	82
CAPITULO III : ESCORIAS	88
3.1 Introducción	88
3.2 Caracterización de las Escorias de Reverbero	88
3.2.1 Físico-Química de las Escorias de Fusión	89
3.2.1.1 Sistemas Ternarios	89
3.2.1.2 Propiedades Físicas	89
3.2.1.2.1 Viscosidad de las Escorias	89
3.2.1.2.2 Grado de Silicatación	95
3.2.2 Pérdidas de Cobre en Escorias de Fusión	97
3.2.2.1 Efecto del Grado de Mata	97
3.2.2.2 Efecto de la Composición de la Escoria	97
3.3 Caracterización de las Escorias de Convertidor	103
3.3.1 Físico-Química de las Escorias de Conversión	103
3.3.1.1 Sistemas Ternarios	103
3.3.1.2 Propiedades Físicas	105
3.3.2 Pérdidas de Cobre en Escorias de Conversión	105
3.3.2.1 Efecto de la Viscosidad	105
3.3.2.2 Química de las Escorias	105
3.3.2.3 Efecto de la Sílica	110
3.3.2.4 Efecto del Grado de Silicatación	113

3.4 Caracterización de la Propiedades de las Escorias del Proceso	115
Futuro	
3.4.1 Físico-Química de las Escorias	115
3.4.1.1 Sistemas Ternarios	115
3.4.2 Propiedades Físicas	116
3.4.2.1 Viscosidad de las Escorias	116
3.4.2.2 Grado de Silicatación	119
3.4.3 Pérdidas de Cobre en Escorias	120
CAPITULO IV : TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE ESCORIAS	122
4.1 Introducción	122
4.2 Efecto del Tratamiento de Escorias del CMT sobre el Proceso	122
4.3 Técnicas de Tratamiento de Escorias	127
4.3.1 Técnicas Pirometalúrgicas	127
4.3.1.1 Balance de Materia	127
4.3.1.2 Especificaciones de Tratamiento	130
4.3.2 Flotación de Escorias	134
4.3.2.1 Balance de Materia	135
4.4 Comparación de Métodos de Tratamiento	136
CAPITULO V : EVALUACIÓN ECONÓMICA	141
5.1 Introducción	141
5.2 Estimación del Costo de Inversión	141

5.3 Estimación de Costos por Concentrado Extra Fundido	142
5.4 Estimación de Costo de Tratamiento	144
5.5 Análisis Económico	148
5.5.1 Base de Estimación	148
5.5.2 Análisis de Rentabilidad	148
5.5.3 Análisis de Sensibilidad	149
CONCLUSIONES	154
REFERENCIAS	158
APÉNDICES	
Apéndice A : Modelo METSIM de la Fundición de Ilo	
Apéndice B : Cálculo de Propiedades de Escorias	
Apéndice C : Tratamiento de Escorias de CMT vía Pirometalurgia	
Apéndice D : Balances de Materia para Tratamientos de escorias de CMT	
Apéndice E : Evaluación Económica, Tablas	
Apéndice F : Calor de Formación, Entalpía y Energía Libre de diferentes compuestos.	

CAPITULO I

PROCESOS DE OBTENCIÓN DE COBRE

En los procesos hidrometalúrgicos, la mena se somete a la acción de un disolvente acuoso (ejemplo ácido sulfúrico), estas soluciones diluidas disuelven los compuestos de cobre, pero no afectan a los minerales de la ganga. El residuo insoluble es separado por decantación o filtración y la solución rica en cobre será tratada por métodos de precipitación química o eléctrica recuperando así el cobre. En la Figura 1.1, se muestra un diagrama de flujo de los principales procesos hidrometalúrgicos.

Como regla, los procesos pirometalúrgicos se realizan en sistemas de varias fases. Las separaciones de metales se logran dando condiciones adecuadas para que los elementos a ser separados pasen por diferentes fases para que puedan ser removibles como productos separados. Cada proceso unitario para la obtención de metales, implica una combinación característica de fases, es decir, son las fases a tratar las que determinan el uso de ciertas técnicas y equipos para un proceso dado. En la Figura 1.2, se muestra un diagrama de flujo de los principales procesos pirometalúrgicos.

1.1 Procesos Hidrometalúrgicos

En su más amplia definición, el campo de la hidrometalurgia comprende la recuperación de componentes valiosos de materiales primarios y secundarios por reacciones efectuadas a temperatura relativamente baja en una fase acuosa.

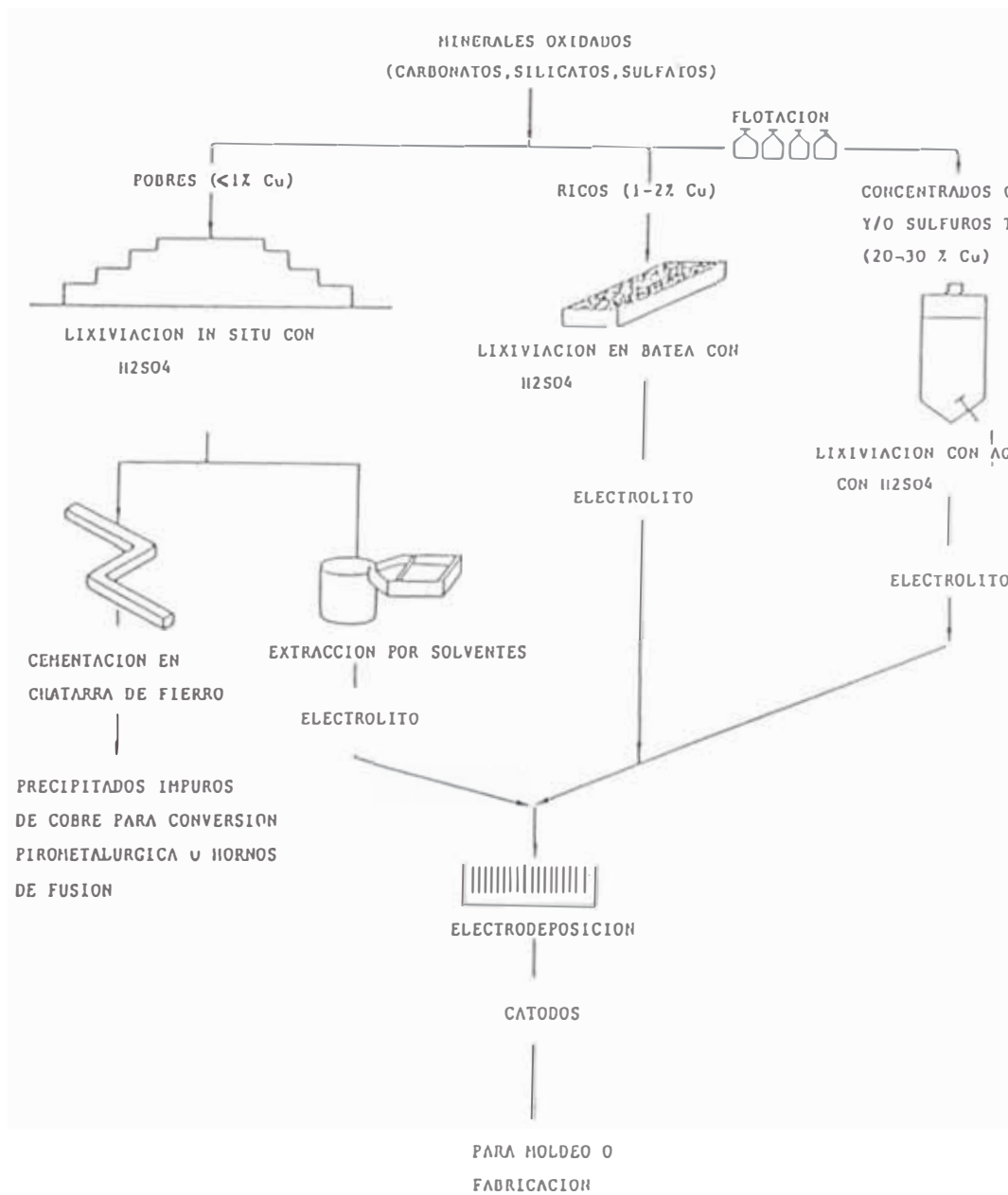


Figura 1.1 Principales Procesos Hidrometalúrgicos

Generalmente, tres operaciones distintas pueden ser identificadas en cualquier diagrama de flujo hidrometalúrgico:

- Lixiviación
- Concentración de soluciones y/o purificación
- Recuperación del producto.

Las técnicas hidrometalúrgicas para la extracción de cobre son aplicadas principalmente a minerales de cobre oxidado y sulfuros de baja ley en minerales de desecho.

a) Lixiviación.- Los procesos de lixiviación pueden ser clasificados con respecto a la reacción química. Generalmente, el lixiviante particular seleccionado para un material dado, es uno que posee buena selectividad para los componentes valiosos a ser recuperados. Si muchos componentes en el material son disueltos, entonces la concentración de la solución subsecuente y la etapa de purificación serán más dificultosas. Los sistemas de lixiviación se extienden desde la lixiviación de menas marginales, hasta la lixiviación de concentrados de alta ley producidos de separaciones físico-químicas por tecnologías de procesamiento de minerales.

b) Solución de Lixiviación, Concentración y Purificación.- La remoción de impurezas es afectada por un número de técnicas, con la finalidad de preparar la solución de lixiviación para la recuperación del producto. Estas técnicas son más convenientemente clasificadas de acuerdo a la reacción química e incluyen las siguientes categorías: (1) Precipitación, (2) Cementación, (3) Extracción por solventes, (4) Intercambio iónico. La aplicación de cualquiera de estos procesos, depende principalmente de las impurezas a ser removidas y los componentes a ser

recuperados. En algunos ejemplos, este estado intermedio de procesamiento comprenderá la recuperación selectiva de una fase sólida que contiene los componentes valiosos, por ejemplo la cementación de cobre de soluciones de lixiviación en botaderos.

c) Recuperación del Producto.- El componente valioso, es entonces convertido en un producto comercializable con especificaciones de calidad asociados. Esta fase de recuperación del producto puede comprender : purificación de una fase sólida o recuperación de una solución acuosa concentrada purificada. Las técnicas comunes empleadas para recuperación de productos incluyen: (1) Electrólisis, (2) Reducción gaseosa, (3) Precipitación.

Por ejemplo, en el caso de lixiviación de cobre en botaderos, la concentración de la solución y purificación es efectuada mediante extracción por solventes, y la recuperación del producto es obtenida por electrólisis.

1.2 Procesos Pirometalúrgicos

Aproximadamente el 90% de la producción mundial de cobre, se origina de minerales sulfurados. Los sulfuros no son fácilmente tratados por métodos hidrometalúrgicos (no son fácilmente lixiviables) así, la mayor parte se obtiene por medio de técnicas pirometalúrgicas, las cuales se inician a partir de concentrados de cobre. La extracción consiste de los siguientes pasos:

- Concentración mediante flotación de espumas
- Tostación
- Fusión de mata
- Conversión a cobre blister

El producto final de esta sucesión de pasos es la obtención de cobre blister impuro, el cual pasará a un proceso posterior de refinación antes de estar en condiciones de fabricación y uso.

1.2.1 Procesos de Fusión

1.2.1.1 Fusión en Hornos de Cuba

La fusión en hornos de cuba, fue usada extensamente en el pasado para la producción de grandes cantidades de mata a partir de trozos de minerales sulfurados. Sin embargo, el agotamiento de las menas ricas en minerales gruesos y el constante desarrollo de la flotación de espumas de concentrados, han eliminado gradualmente la fusión a mata de estos hornos.

El horno de cuba es un equipo a contracorriente, en el cual una carga fría de materiales (que consiste en concentrados sinterizados, minerales en trozos, sílica flux, escoria de convertidor solidificada y coque metalúrgico) desciende

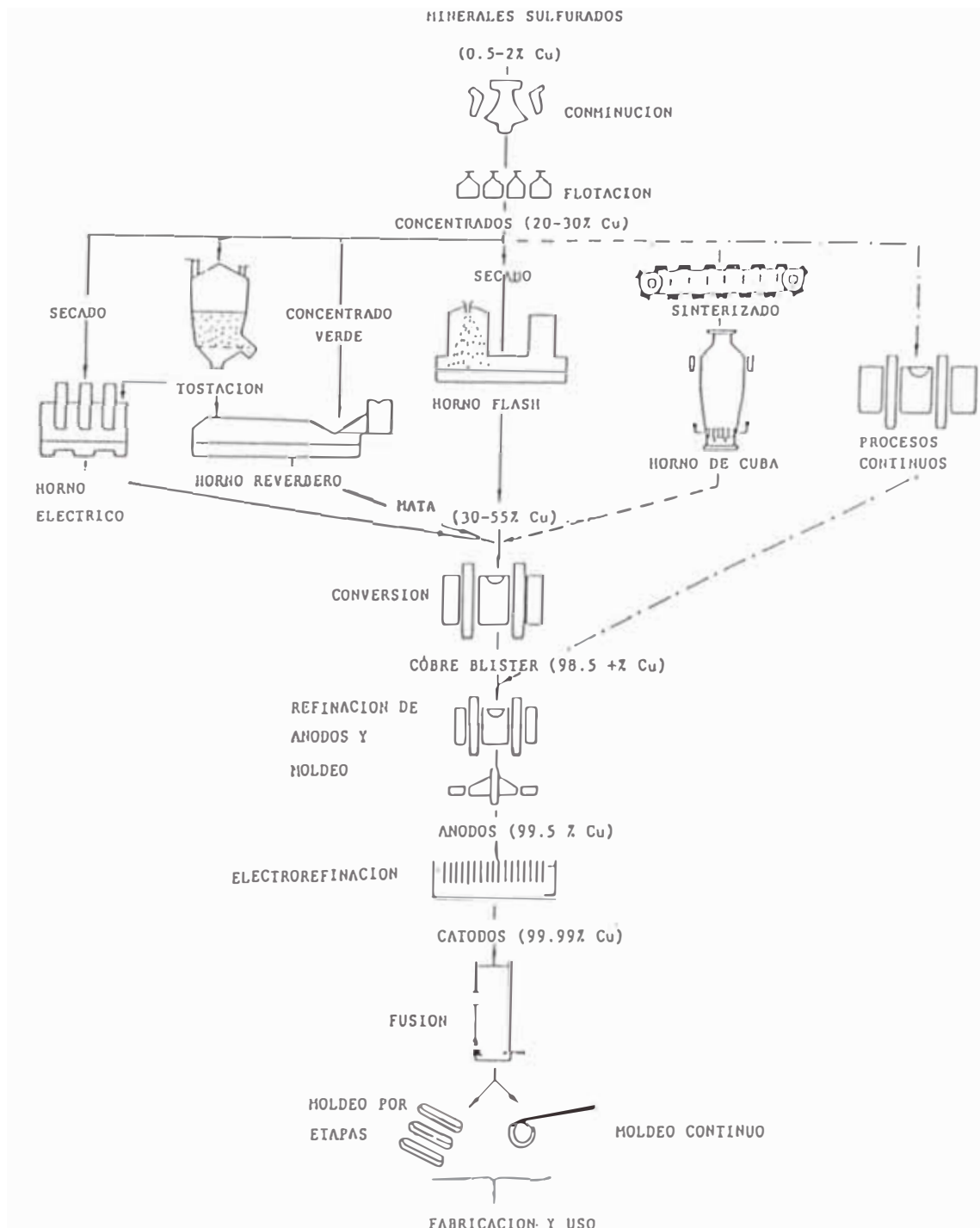


Figura 1.2 Principales Procesos Pirometalúrgicos

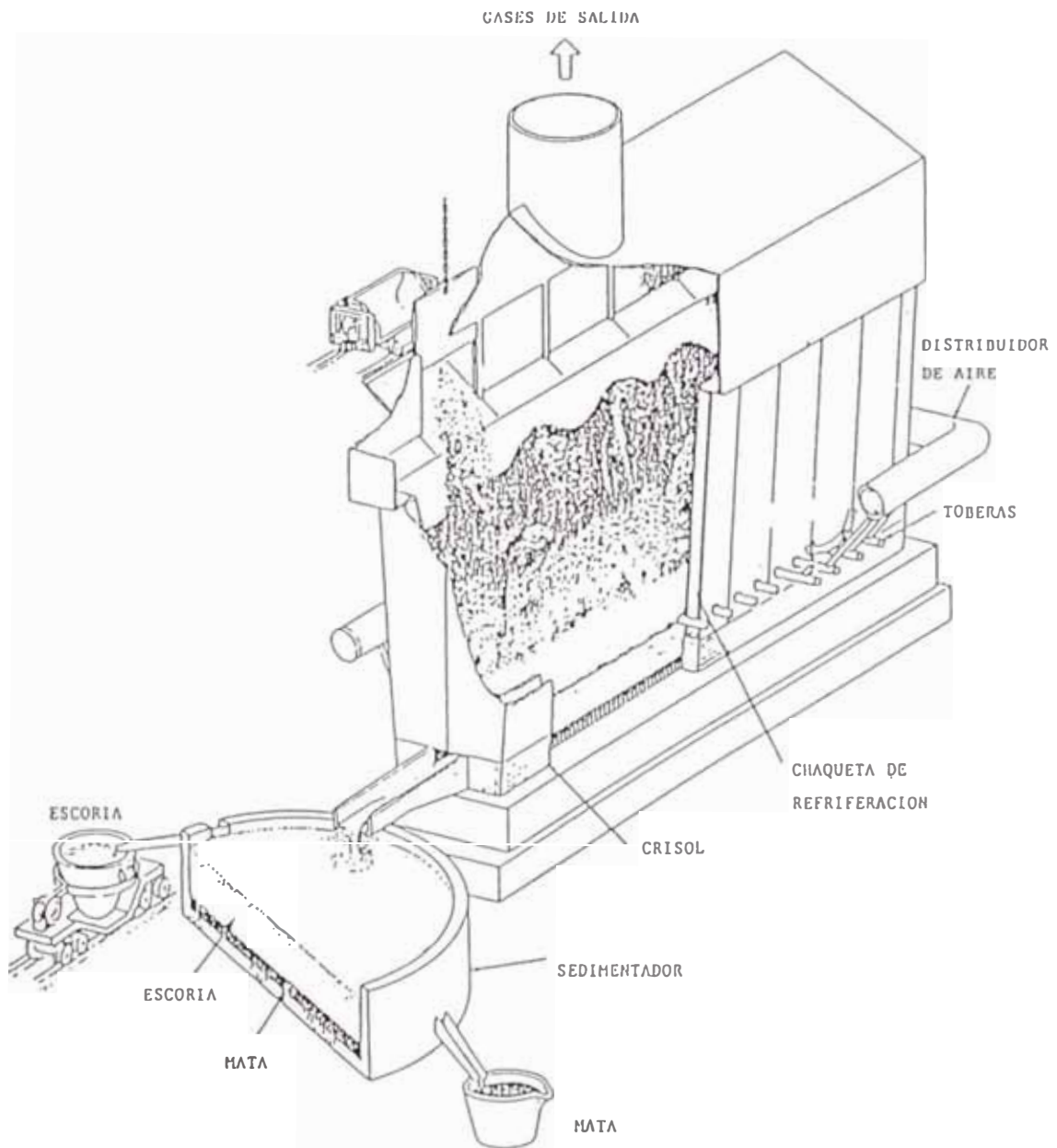


Figura 1.3 Vista de un Horno de Cuba para la producción de mata de minerales de cobre sulfurados

verticalmente mientras que gases calientes (producidos por la combustión de coque y sulfuros con aire inyectado cerca de la base del horno) ascienden. Esta configuración da como resultado un eficiente secado, calentado y fundido de la carga, que desciende al fondo del horno formando mata y escoria. En la Figura 1.3, se muestra una vista de un horno de cuba.

En forma general, los sólidos tienen un tamaño superior a 1 cm. de diámetro, para prevenir que estos sean arrastrados por los gases salientes y asegurar un flujo uniforme de gases a través de la columna de carga.

Los productos de los hornos de cuba son escoria fundida y mata fundida; las cuales son periódicamente evacuadas y acumuladas.

El calor requerido para la fusión es generado por la combustión de coque y sulfuros; combustibles líquidos o gaseosos pueden ser inyectados a través de las toberas, si se requiere calor adicional para el proceso.

1.2.1.2 Fusión en Hornos Reverberos

Los hornos reverberos son esencialmente hornos de hogar, en los cuales una carga sólida consistente en concentrados o calcinas, fundentes, junto a materiales de retorno con contenido de cobre y escoria fundida de convertidor, se funden debido al calor transferido por los gases (resultantes de la combustión de carbón pulverizado, combustibles líquidos o gas natural) que atraviesan toda la longitud del baño, para luego ser evacuados del horno.

Los productos de un horno reverbero son: (1) Escoria fundida, la cual es evacuada y descartada, y (2) mata fundida, la cual es transferida al convertidor para su posterior oxidación a cobre blister. En la Figura 1.4, se muestra una vista de un horno reverbero.

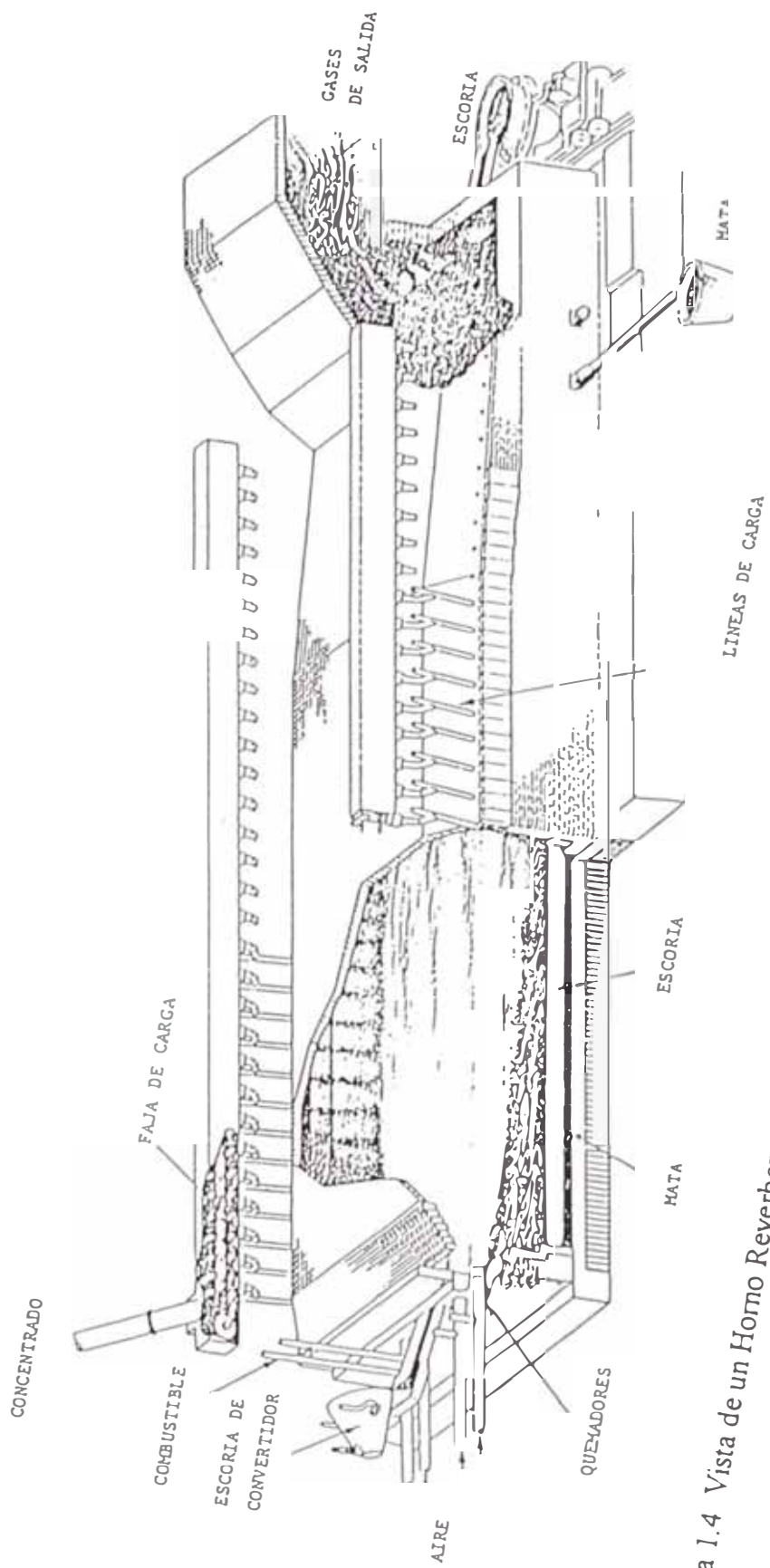


Figura 1.4 Vista de un Homo Reverbero para la producción de mata a partir de concentrados de cobre sulfurados

Los hornos reverberos tienen dos grandes desventajas: (1) Comparado con otras unidades de fusión, consumen una considerable cantidad de energía, y (2) producen grandes volúmenes de gases de combustión con un contenido aproximado de 1% en volumen de SO_2 , dificultando la remoción de éste, generando así problemas de contaminación de aire.

1.2.1.3 Fusión en Hornos Eléctricos

La fusión en hornos eléctricos es similar que en hornos reverberos, excepto que no se usa combustible como medio de generación de calor. El calor necesario para fusión es generado por la resistencia de la escoria al paso de una alta corriente entre electrodos de carbón inmersos en ésta. En la Figura 1.5, se muestra una vista de un horno eléctrico de arco suspendido.

Los hornos eléctricos usan su energía eléctrica en forma eficiente, porque un pequeño calor sensible es arrastrado por una pequeña cantidad de gas (principalmente aire infiltrado) producido por el proceso. Sin embargo, la energía eléctrica es costosa, así los hornos eléctricos son usados donde la electricidad tiene relativamente bajo costo.

Los hornos eléctricos tienen las ventajas de una gran flexibilidad y control de la temperatura, y debido a la ausencia de gases de combustión, un buen control sobre las condiciones de oxidación. Estos factores llevan a un excelente control de las propiedades de las escorias (concentración de magnetita, viscosidad, etc.) lo cual permite bajas pérdidas de cobre en las escorias de fusión.

1.2.1.4 Fusión en Hornos Flash

Los hornos flash utilizan el calor desarrollado por la oxidación de la carga sulfurada, para proporcionar la energía de fusión. La ventaja principal de estos

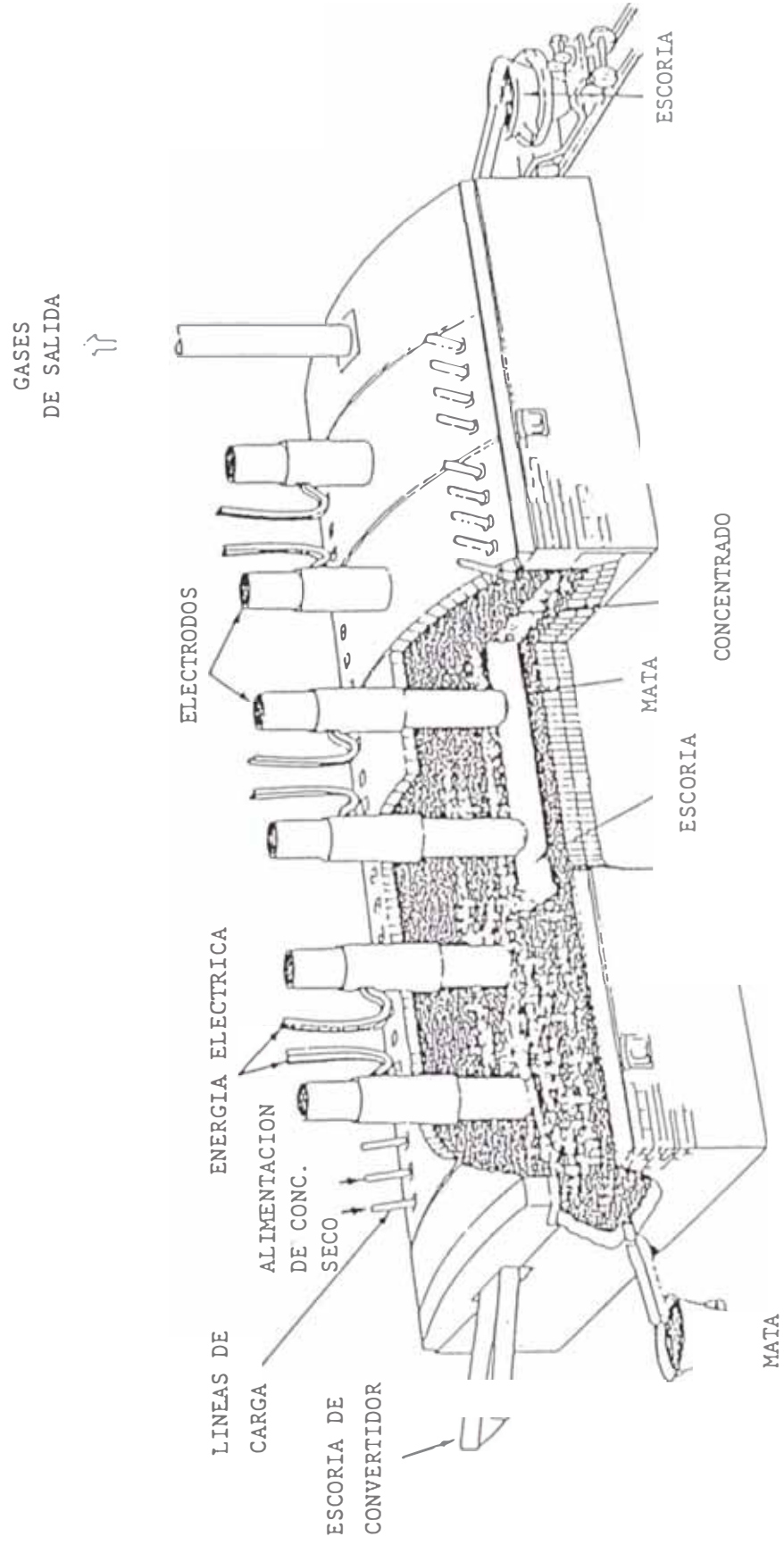


Figura 1.5 Vista de un Horno Eléctrico de arco suspendido para la producción de mata a partir de concentrados secos de cobre sulfurado

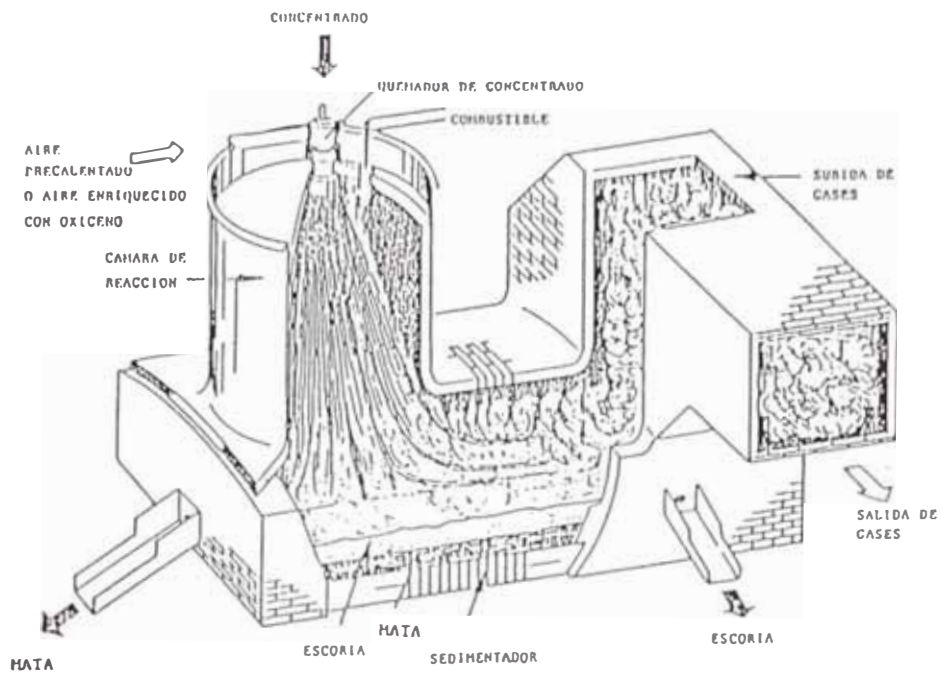


Figura 1.6 a Vista de un Horno Flash Outokumpu

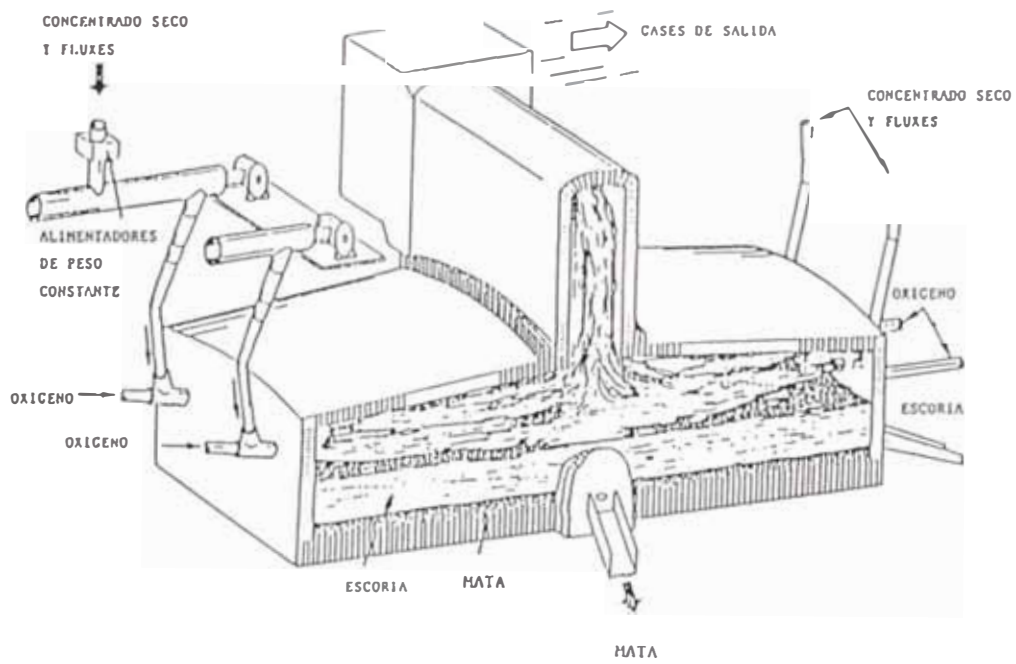


Figura 1.6 b Vista de un Horno Flash Inco

hornos es que sus costos de energía son más bajos con respecto a los hornos reverbero y eléctrico. Los hornos flash son también excelentes desde el punto de vista ambiental, ya que producen gases ricos en SO_2 , el cual es fácilmente removible como H_2SO_4 o como SO_2 líquido.

El principal producto de los hornos flash es una mata fundida de alto grado (45-65%). La fusión en hornos flash consiste en la inyección de concentrados secos junto con oxígeno, aire caliente o una mezcla de ambos en un horno tipo hogar. Una vez en el horno, las partículas de sulfuros reaccionan rápidamente con los gases oxidantes. Esto da como resultado: (1) un control de oxidación parcial de concentrados, y (2) una gran generación de calor.

Las reacciones de oxidación son exotérmicas y proporcionan una gran parte de la energía térmica para calentar, fundir y sobre calentar la carga del horno.

Existen dos tipos básicos de fusión flash: (1) El proceso INCO, que utiliza oxígeno comercial, y es totalmente autógeno, y (2) el proceso OUTOKUMPU, que utiliza aire precalentado, o aire precalentado enriquecido con oxígeno. Este proceso no es autógeno. En las Figuras 1.6a y 1.6b, se muestran vistas de los tipos básicos de hornos flash.

1.2.1.5 Fusión en Hornos Isasmelt

La fusión en hornos Isasmelt (Sirosmelt) se basa en la técnica de inyección de combustible y aire por medio de una lanza sumergida en el baño, formado por mata y escoria. El corazón de esta tecnología es la lanza, la cual opera con un sistema de enfriamiento por medio de aire de proceso, éste enfriamiento origina una solidificación de la capa de escoria que rodea a la lanza, protegiendo así a esta. La introducción de la lanza dentro del baño origina una gran turbulencia dentro de éste, generando una buena transferencia de masa y calor dentro del seno

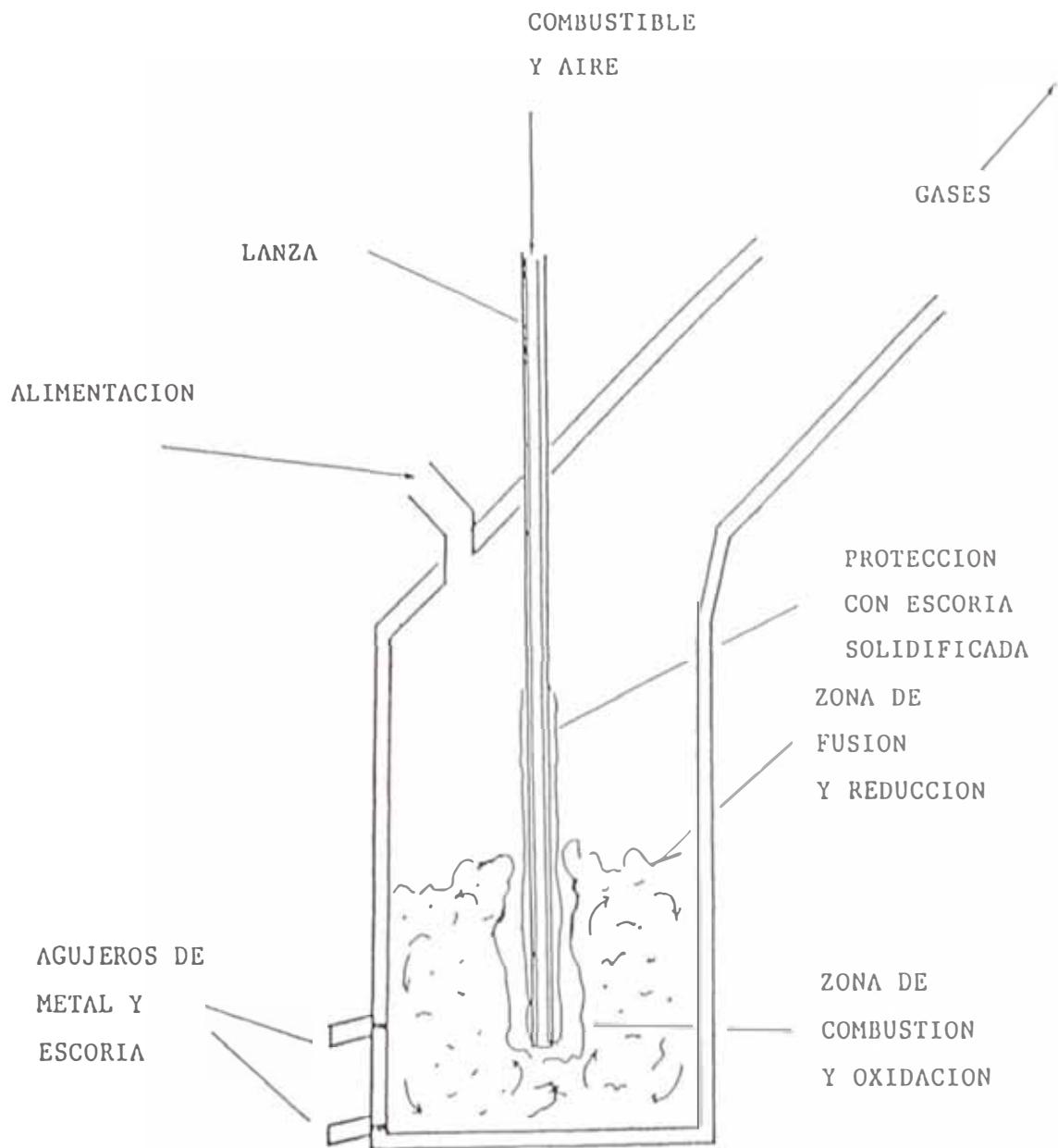


Figura 1.7 Diagrama esquemático de un Horno Isasmelt

del material fundido. En la Figura 1.7, se muestra un diagrama esquemático de un horno isasmelt.

1.2.2 Proceso de Conversión

El proceso de conversión de cobre, consiste en la oxidación de la mata fundida producida en la etapa de fusión de concentrados. La mata es vaciada en éste a través de la "boca" del convertidor, la oxidación se produce con aire inyectado a través de toberas, ubicadas a lo largo del eje del convertidor.

La conversión consta de dos etapas bien definidas: (1) La etapa de soplado a escoria, que consiste en la remoción del fierro de la mata por oxidación del FeS y escorificación, dejando sólo sulfuros de cobre y formando así el llamado metal blanco (70-75% Cu); y (2) etapa de soplado a cobre, en el cual el azufre de los sulfuros de cobre es removido, obteniendo cobre blister (99% Cu).

Este proceso es casi universalmente llevado a cabo en Hornos Convertidores Peirce-Smith. En las Figuras 1.8a y 1.8b, se muestran vistas de un convertidor Peirce-Smith y las diferentes posiciones que adopta este convertidor durante sus etapas de operación.

1.2.3 Procesos de Fusión y Conversión Continuos

1.2.3.1 Proceso Noranda

El reactor Noranda tiene una forma parecida a la de un convertidor convencional ligeramente más alargado, en él un baño constante de mata y escoria es soplado continuamente con aire o aire enriquecido con oxígeno, inyectado a través de toberas ubicadas a lo largo del eje del reactor. Las toberas permanecen

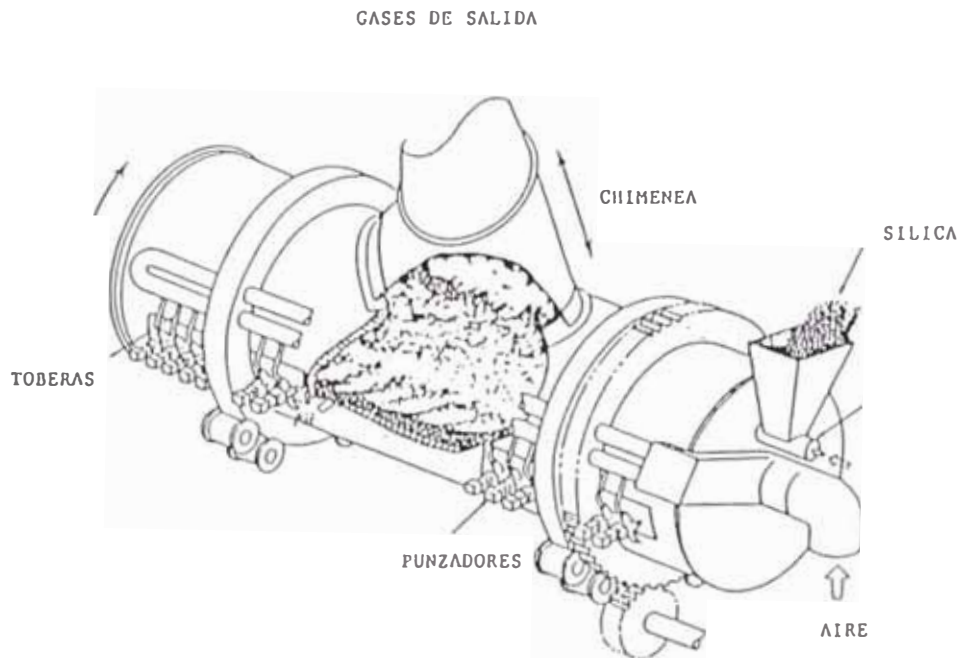


Figura 1.8 a Vista de un Convertidor Peirce-Smith

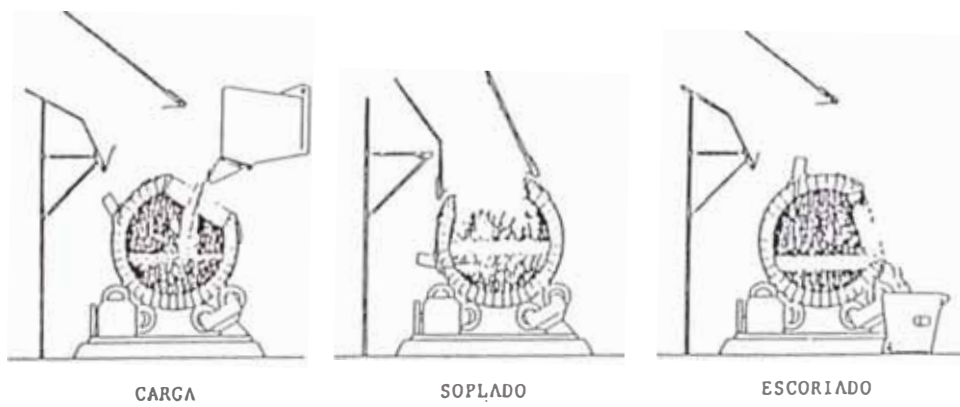


Figura 1.8 b Posiciones de un Convertidor Peirce-Smith para las etapas de carga, soplado y escoriado (escoria o cobre)

sumergidas durante todo el proceso y sólo son levantadas fuera del líquido en caso de paradas, fallas en los sopladores u otra situación de emergencia. La carga húmeda es alimentada al baño por uno de los lados del reactor. El tambor y las paredes laterales del reactor están equipadas con salidas para la mata de alto grado (70-75% Cu) y la escoria. Normalmente se requiere combustible para mantener la temperatura del baño.

Reactores Noranda han sido instalados en dos fundiciones aparte la fundición Noranda's Horne, tres han sido instalados en la fundición de Garfield (Kennecott) en Utha, y otra unidad en la fundición de Southern Copper en Australia, actualmente dos unidades están en diseño para China. En la Figura 1.9, se muestra un diagrama esquemático de un reactor Noranda.

1.2.3.2 Proceso El Teniente

El Convertidor Modificado Teniente (CMT) fue desarrollado por Codelco (Chile) en la fundición de Caletones, y actualmente unas 5 unidades están operativas en Chile. Usando este sistema, dos unidades más están en construcción, una en la fundición de Nkana, en Zambia, y la otra en la fundición de Chuquicamata, en Chile. Una unidad más esta bajo desarrollo para la Fundición de Southern Peru, en Perú.

El reactor es similar, en diseño, al reactor Noranda, pero la diferencia fundamental es que el CMT no usa combustible para mantener la temperatura del baño, siendo la mata agregada la que compensa el déficit de calor.

Actualmente la Fundición de Caletones está operando los CMT en forma autógena por inyección de concentrado seco a través de toberas, incrementando la capacidad de fusión. En la Figura 1.10, se muestra una representación esquemática de un Convertidor Modificado Teniente.

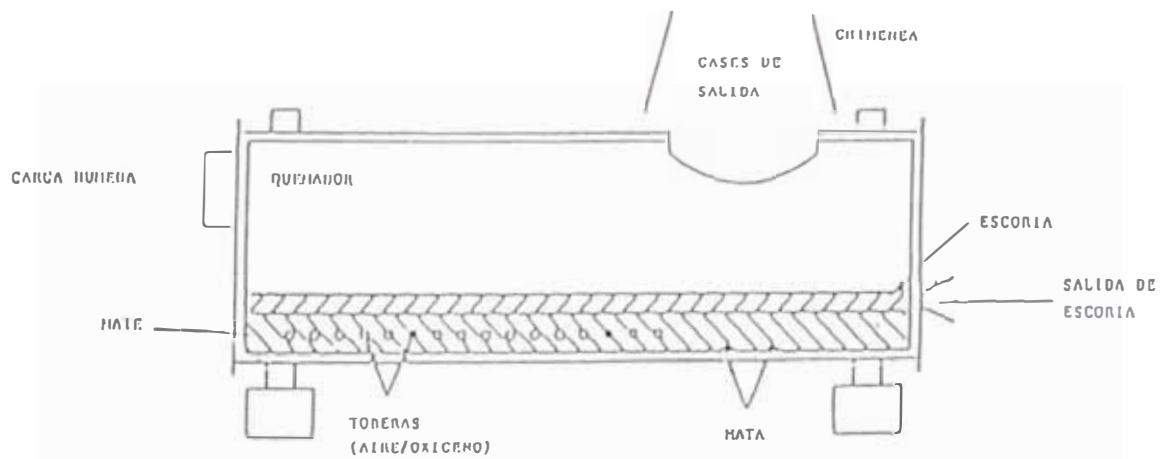


Figura 1.9 Reactor Noranda

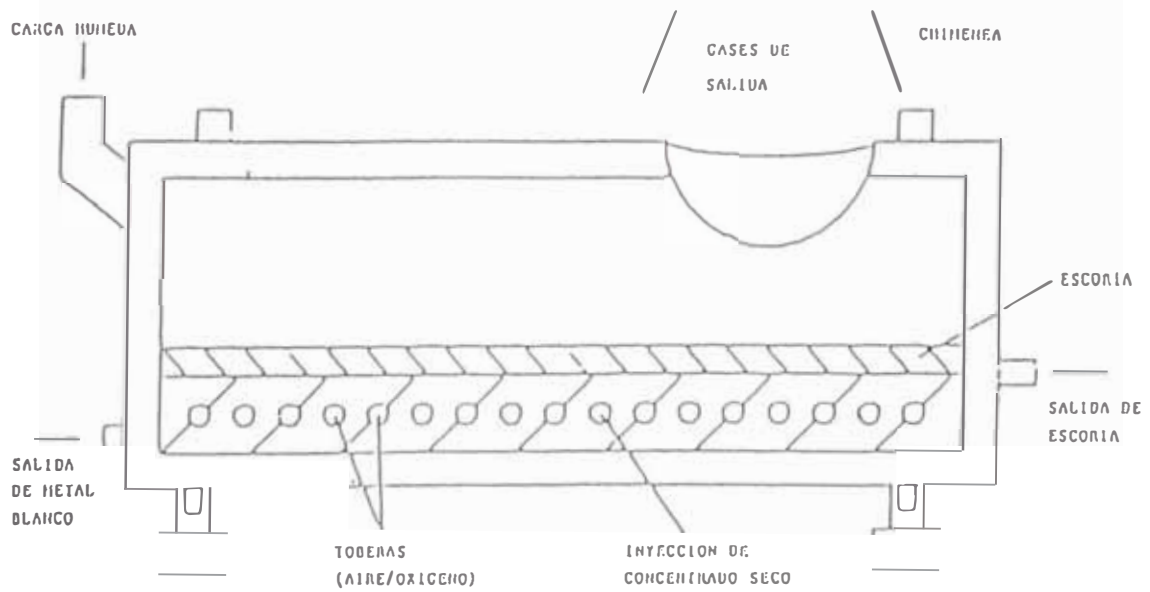


Figura 1.10 Convertidor Modificado Teniente (CMT)

1.2.3.3 Proceso Mitsubishi

El Proceso Mitsubishi (desarrollado inicialmente en Naoshima, Japón), es un proceso continuo de fusión de cobre, con un sistema multi-hornos, un horno de fusión, un horno de limpieza de escorias y un horno de conversión, todos unidos por medio de canales.

Entre las más importantes características tenemos: (1) Concentrados, fluxes y otros materiales son inyectados al horno a través de lanzas de soplado, fundiéndose rápidamente, (2) en el horno de fusión se obtiene mata de alto grado (65-70% Cu); la mata y la escoria son separadas en el horno de limpieza de escorias, manteniendo las pérdidas de cobre entre 0.5-0.6% Cu, y (3) la mata es convertida continuamente a cobre blister en el horno de conversión.

En adición a estas características básicas de funcionamiento, ciertas ventajas han sido confirmadas en el tiempo de operación de este proceso, tales como: (1) incremento de la productividad con el uso de aire enriquecido con oxígeno en las lanzas de soplado, (2) flexibilidad del grado del concentrado con respecto al cobre, y (3) campañas largas de fusión usando chaquetas de enfriamiento en los hornos. En la Figura 1.11, se muestra un flujo esquemático del proceso Mitsubishi.

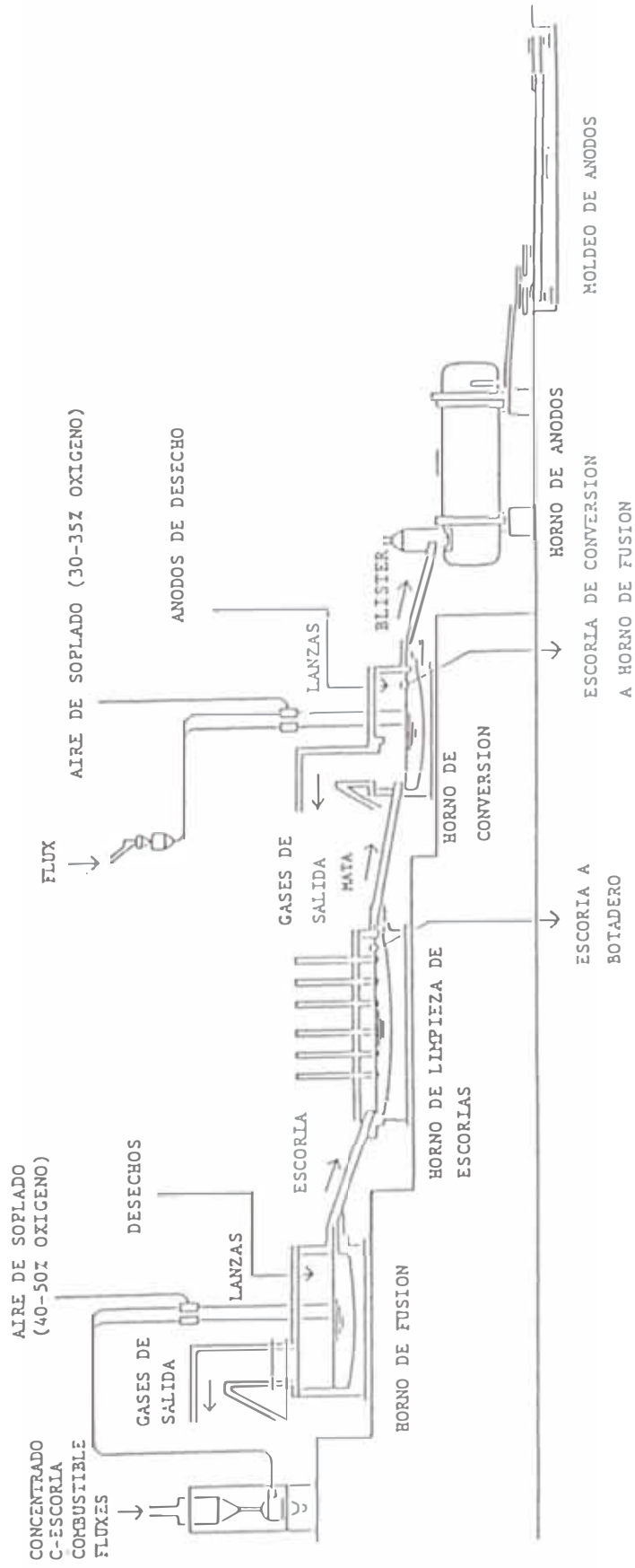


Figura 1.11 Flujo esquemático del Proceso Mitsubishi

CAPITULO II

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.1 Descripción del Proceso Actual

La Fundición de Cobre de Southern Peru Copper Corporation, ubicada en Ilo, opera una fundición convencional, con una capacidad nominal de fusión de 952,550 toneladas métricas por año de concentrado, con una producción de 272,160 toneladas métricas al año de cobre blister.

El concentrado de cobre producido en las concentradoras de Cuajone y Toquepala es recibido en la Fundición de Ilo en la Planta de Preparación de Minerales; dichos concentrados son enviados a la Fundición de Ilo por medio de ferrocarril. Los carros cargados de concentrado son pesados uno por uno en una balanza de plataforma de ferrocarril, luego pasan al volteador de carros, donde el material es descargado y transportado a la sección de camas (cama es una mezcla uniforme de concentrados, fundentes, materiales recirculantes y otros, en las proporciones adecuadas para obtener las mejores propiedades de fusión de esta mezcla).

Los concentrados y demás materiales que se encuentran en las camas, son removidos por medio de un cargador frontal, el cual deja caer el material en tolvas de recepción ubicadas sobre una faja que transporta los materiales a las tolvas de alimentación de los hornos reverberos.

La sección de reverberos consta de un horno de tipo arco radial suspendido de ladrillos silica-alúmina, con una capacidad nominal de fusión de 680 toneladas métricas secas diarias de concentrado, y dos hornos de tipo techo plano panelizado de ladrillos cromo-magnesio, con una capacidad nominal de fusión de 1,043 toneladas métricas secas diarias de concentrado.

La sección de convertidores consta de siete convertidores Peirce-Smith (4 de 4m × 9m y 3 de 4m × 11m). La planta de moldeo esta equipada con dos ruedas de moldeo de 25 moldes cada una y de cuatro hornos de retención, teniendo una capacidad de moldeo de 790 toneladas métricas de cobre blister diarias.

Los gases producidos en los hornos de fusión son aprovechados para la generación de energía eléctrica por medio de calderos de calor residual, ubicados a la salida de gases de cada uno de los hornos (dos calderos por horno); dichos gases luego son limpiados en precipitadores electrostáticos, para posteriormente ser descargados al ambiente vía dos chimeneas. Los gases producidos en los convertidores son evacuados a un ducto común de gases y luego limpiados en precipitadores electrostáticos, para finalmente ser evacuados al medio ambiente vía dos chimeneas. La Figura 2.1, muestra el diagrama de flujo de la operación actual de la fundición.

2.1.1 Proceso de Fusión

2.1.1.1 Caracterización de los Hornos Reverberos

Los tres hornos reverberos son de tipo carga húmeda y alimentación por las paredes, uno con impulsor, y dos con caída directa sobre la pared. Todos utilizan petróleo residual No.6 como medio de generación de calor.

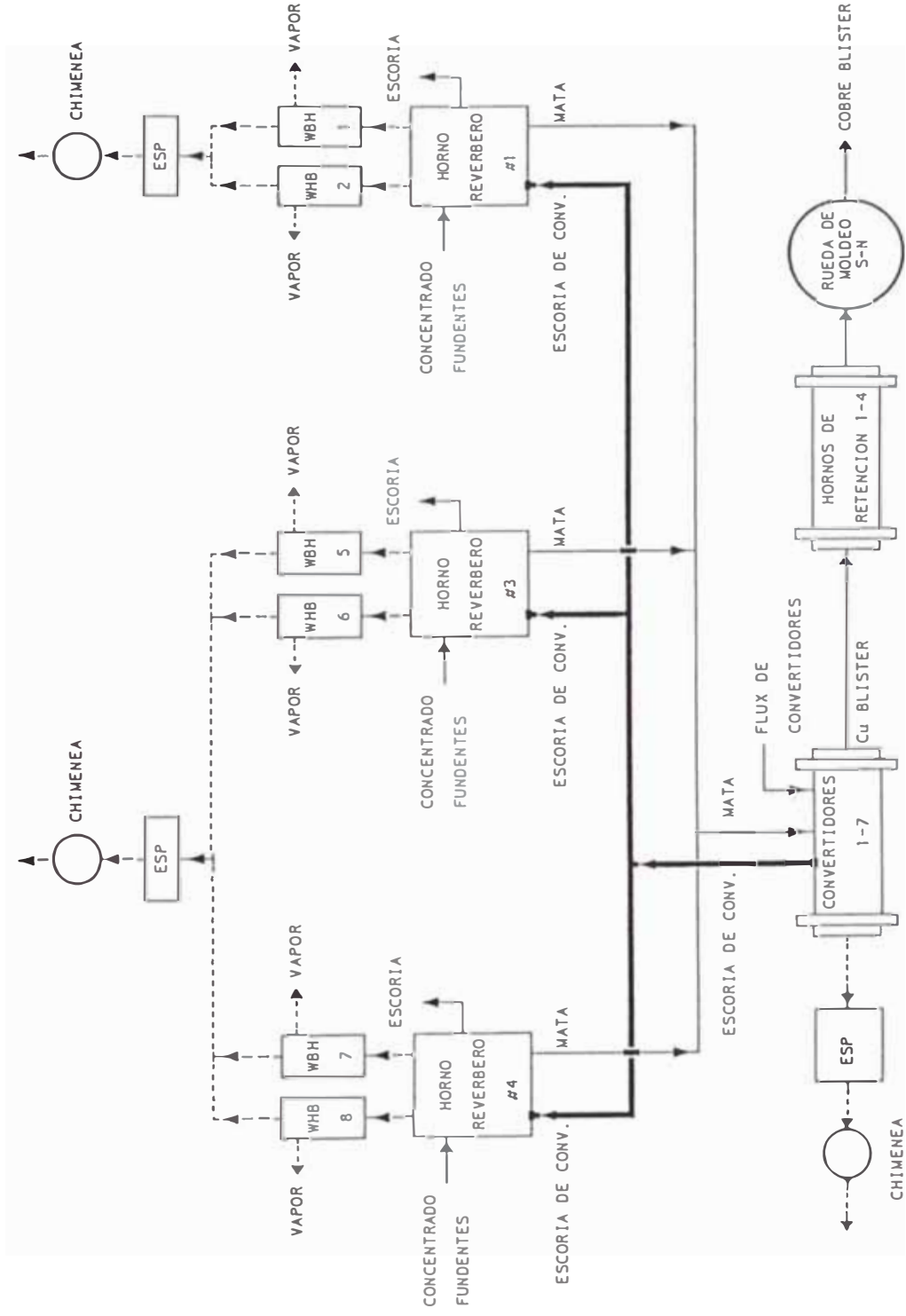


Figura 2.1 Diagrama actual de proceso de la Fundición de Cobre de Southern Peru

a) **Horno Reverbero No.1.-** Un sistema de fajas transportadoras, recibe el concentrado descargado por el cargador frontal y lo deposita dentro de una de las cuatro tolvas con las que cuenta este horno; cada una de estas tolvas descarga sobre un alimentador de faja que suministra concentrado a los cuatro alimentadores (Slinger), los cuales están equipados con un pistón neumático que permite acercarse a la ventana de alimentación cuando se va a inyectar concentrado dentro del horno, y retraerlo cuando se termina la alimentación.

Este horno ha sido construido sobre bases de concreto reforzado tipo flotante, lo que permite absorber la expansión térmica. Incluye el crisol del horno construido de capas de arcilla compactada, mineral de magnetita molida y escoria de reverbero fundida con incursiones de mineral de magnetita; la sección transversal del horno es constante a través de toda su longitud.

A lo largo de las paredes laterales, "línea de baño", se han colocado chaquetas de enfriamiento construidas de cobre y refrigeradas por medio de agua tratada con inhibidores de corrosión (hidróxido de potasio y dicromato de sodio). Estas chaquetas de refrigeración, que descansan sobre la parte plana del crisol, proporcionan un excelente medio de protección del crisol y de la parte inferior de las paredes laterales del horno, contribuyendo al mismo tiempo a un mínimo de pérdida de calor.

La parte superior de las paredes y el arco del horno son protegidos con "Slurry" (lodo de sílica molida muy finamente clasificada y espesada, a la cual se le agrega bentonita). El slurry almacenado en tanques es transportado por tuberías a lo largo del horno, para luego ser inyectado a presión con aire a través de ventanas, construidas y distribuidas a lo largo del horno para este propósito.

El reverbero No.1 cuenta con siete quemadores frontales marca COEN y un quemador vertical. Las dimensiones del horno son de 35m de largo, 9m de ancho.

La cantidad actual promedio que procesa este horno es de 680 toneladas métricas por día de concentrado, utilizando un flujo promedio de petróleo de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ y un flujo de aire de $57,766 \text{ m}^3/\text{h}$.

b) Hornos Reverberos No.3 y No.4.- Un sistema de fajas transportadoras, recibe el concentrado descargado por el cargador frontal y a su vez lo deposita dentro de dos tolvas que tiene cada horno, de cada tolva se descarga el concentrado a una faja móvil que se desplaza a lo largo de la parte lateral del horno, dejando caer concentrado directamente al baño a través de tolvas colocadas en la parte superior del mismo, formándose un talud de concentrado junto a las paredes laterales. En la zona de evacuación de mata y escoria, se tienen chaquetas de enfriamiento construidas de cobre y refrigeradas por medio de agua tratada, al igual que en el horno No.1, colocadas en forma vertical. Se puede apreciar que hay ciertas zonas del horno que no poseen chaquetas, esto se debe -a diferencia del horno No.1- a que el talud formado por concentrado brinda protección a las paredes del horno y al crisol a lo largo de toda la zona de alimentación de concentrado.

Las dimensiones de estos hornos son de 36m de largo, 10m de ancho. Ambos utilizan 8 quemadores frontales marca COEN. La cantidad actual promedio que procesa cada uno de estos hornos es de 1,043 toneladas métricas por día de concentrado, utilizando un flujo promedio de petróleo de $7 \text{ m}^3/\text{h}$ y un flujo de aire de $129,124 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.1.1.2 Materias Primas

Las principales materias primas de los hornos reverberos son el concentrado (Cuajone, Toquepala o concentrados comprados) y los fundentes (sílica, cal y coquina). Otros materiales tales como cemento de cobre y productos de

recirculación, son también materiales de alimentación a los hornos. La escoria de convertidores es también considerada como materia prima.

Tabla 2.1 Análisis Químicos de Concentrados (base seca)

Componente	Concentrado Toquepala (%)	Concentrado Cuajone (%)
Cobre (Cu)	27.70	29.20
Fierro (Fe)	28.33	26.38
Azufre (S)	34.68	32.42
Sílica (SiO ₂)	4.86	5.54
Alúmina (Al ₂ O ₃)	2.42	2.67
Otros	2.02	3.79
Humedad (<u>base húmeda</u>)	7.50	7.50

Tabla 2.2 Análisis Mineralógicos de Concentrados (base seca)

Componente	Concentrado Toquepala (%)	Concentrado Cuajone (%)
Chalcopyrita (CuFeS ₂)	57.80	71.00
Chalcocita (Cu ₂ S)	6.61	3.14
Pirita (FeS)	22.52	10.06
Covalita (CuS)	1.43	2.40
Bornita (<u>Cu₅FeS₄</u>)	2.30	0.81

Tabla 2.3 Análisis Químico de Sílica (base seca)

Componente	Sílica Baja Ley (%)	Sílica Alta Ley (%)
Cobre (Cu)	0.78	0.00
Sílica (SiO ₂)	63.64	90.24
Oxido ferroso(FeO)	4.80	2.56
Cal (CaO)	0.89	0.96
Alúmina (Al ₂ O ₃)	15.69	2.41
Otros	14.20	3.83
Humedad (<u>base húmeda</u>)	2.00	0.50

Tabla 2.4 Análisis Químico de Cal y Coquina (base seca)

Componente	Coquina (%)	Cal (%)
Sílica (SiO ₂)	3.93	0.00
Cal (CaO)	0.00	78.32
Carbonato Calcio (CaCO ₃)	90.39	16.14
Alúmina (Al ₂ O ₃)	0.49	0.00
Otros	5.19	5.54
Humedad (<u>base húmeda</u>)	4.50	0.00

2.1.1.3 Descripción del Proceso

La fusión en hornos reverberos es un proceso continuo. El horno es calentado continuamente produciendo mata y escoria (la mata es una mezcla de sulfuros de cobre y fierro, mientras que la escoria es una mezcla de silicatos de fierro, calcio, y alúmina principalmente). La carga sólida es alimentada en forma intermitente a lo largo de las paredes laterales del horno, la mata y la escoria son evacuados del horno también en forma intermitente. Durante los procesos de escoriado y evacuación de mata, el horno es parcialmente drenado, tratando de mantener niveles constantes de baño dentro del horno.

Las dos funciones más importantes del horno son: (1) la fusión, en la cual la carga sólida es fundida formando mata y escoria, y (2) la sedimentación de la mata a través de la escoria. La mata es evacuada por un lado del horno, siendo ésta recibida por ollas que la transportarán a los convertidores para su posterior conversión a cobre blister. La escoria es evacuada también por uno de los lados del horno, la ubicación del agujero de escoriado se encuentra al lado opuesto de la zona de fusión, esto permite que la mata producida tenga el tiempo suficiente de sedimentación y no sea arrastrado fuera del horno en el proceso de escoriado. La

escoria es recibida en ollas acopladas a una locomotora, la cual llevará a esta a botaderos ubicados tierra adentro.

El calor de fusión es suministrado mediante la combustión de petróleo en quemadores ubicados en la parte frontal del horno. La llama y los gases de combustión atraviesan la longitud del horno, suministrando así la mayor cantidad de calor a la carga sólida y asegurando un proceso continuo de fusión y la consecuente formación de mata y escoria.

En estos hornos, la escoria producida en la etapa de conversión, es tratada para poder recuperar las cantidades de cobre que se encuentra en ésta. La escoria de convertidor es vaciada al horno por la parte frontal de éste, a través de canales.

Tabla 2.5 Análisis Químicos de Mata y Escoria de Fusión

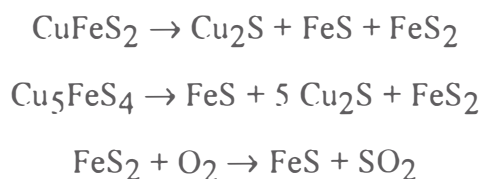
<u>Compuesto (%)</u>	Mata	Escoria
Cu	35.58	0.55
Fe	33.57	36.06
FeO		38.88
SiO ₂	0.68	33.70
Al ₂ O ₃		7.44
Fe ₃ O ₄	9.85	8.05
CaO		5.10
S	24.00	1.04

2.1.1.3.1 Físico-Química de la Fusión a Mata

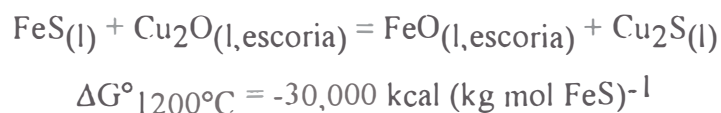
Los mayores constituyentes de la carga del horno son los sulfuros y óxidos de fierro y cobre. La carga también presenta otros óxidos tales como: Al₂O₃, CaO, MgO y principalmente SiO₂, el cual está presente en el concentrado y además es agregado como fundente. Así, son el fierro, cobre, azufre, oxígeno y los

respectivos óxidos los que controlan largamente la fisico-química del sistema mata-escoria.

Las principales reacciones de descomposición de los minerales de cobre y fierro están dadas por las siguientes ecuaciones químicas:



El principal propósito de la etapa de fusión es asegurar una sulfuración de todo el cobre presente en la carga, de modo garantizar el paso de todo el cobre a la mata. La presencia del FeS en la mata nos asegura lo anteriormente dicho, ya que éste compuesto tiende virtualmente a sulfurar todo el cobre que no esté en forma de sulfuro, mediante la siguiente reacción:



La constante de equilibrio de esta reacción:

$$K_E = \frac{a_{\text{FeO}} a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{FeS}} a_{\text{Cu}_2\text{O}}}$$

está dada por:

$$\log K_E = \frac{-\Delta G^\circ}{4.576 T^\circ\text{K}}$$

donde K_E a la temperatura de fusión, aproximadamente 1200°C , es 10^{+4} . Este alto valor muestra que el Cu_2O es casi completamente sulfurado por el FeS a dicha temperatura, y lo cual es demostrado en la práctica.

En simples palabras, la mata puede ser considerada como una solución homogénea de Cu_2S y FeS , como se indica en el diagrama de fase binario Cu_2S - FeS . Mejores análisis se pueden ver en el sistema Cu - Fe - S [2].

La Tabla 2.6, nos da las más importantes propiedades de la mata; cabe resaltar que entre las más importantes características tenemos su alta densidad y su baja viscosidad, lo cual muestra la facilidad que tiene la mata para sedimentarse a través de la escoria dentro del horno.

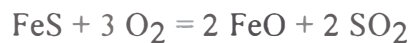
Tabla 2.6 Propiedades Físicas de la Mata, Escoria y otros Compuestos

Material	Punto de Fusión ($^\circ\text{C}$)	Densidad (líquido a 1200°C) (g cm^{-3})	Viscosidad (líquido a 1200°C) cP
Cobre Blister	1,080	7.8	3.3
Cu_2S	1,130	5.2	
FeS	1,190	4.0	
Mata (Cu_2S - FeS)			
30%Cu	1,050	4.1	
50%Cu	1,000	4.6	10
80%Cu	1,130	5.2	
FeO	1,377		
Fe_3O_4	1,597	5.0-5.5 (sólido)	
SiO_2	1,723	2.6 (sólido)	
Escoria de fusión	1,150	3.0-3.7	500-2,000
Escoria de conversión	1,150	3.2-3.6	

2.1.1.3.2 Formación, Constitución y Características de las Escorias

Las escorias de fusión están formadas básicamente a partir de los óxidos de la carga al horno, y de los óxidos formados durante la etapa de fusión. Las escorias de fusión contienen: Fe (en forma de FeO, Fe₃O₄), SiO₂ (fundentes y escoria de retorno de convertidores), Al₂O₃ y CaO. Las escorias deben: (1) ser inmisible en la mata, (2) tener una baja solubilidad para el Cu₂S, y (3) ser suficientemente fluidas para minimizar el atrapamiento de mata y concentrado. Las características más importantes de las escorias de fusión se muestran en la Tabla 2.6.

Durante la etapa de formación de escoria se presentan las reacciones siguientes:



La magnetita reducida durante esta etapa es aquella que se forma en la etapa de soplado a escoria en los convertidores, y que es retornada a los hornos para la recuperación de cobre.

2.1.2 Proceso de Conversión

2.1.2.1 Caracterización de los Convertidores

Los Convertidores han sido ubicados transversalmente al eje de los hornos reverberos, con el objeto de conseguir el más corto transporte de materiales entre éstos y las plantas de moldeo. Se cuenta con siete convertidores Peirce-Smith, cuatro pequeños (4m × 9m) y tres grandes (4m × 11m) de los cuales seis están en operación normal y uno en mantenimiento. Los convertidores pequeños cuentan cada uno con 44 toberas mientras que los grandes cuentan con 48 toberas cada

uno; todos ellos revestidos con ladrillos refractarios básicos (Nucon 60). Todos los convertidores cuentan con máquinas de punzar de motor neumático para limpieza de toberas, todas ellas operadas en forma manual.

El aire necesario para las reacciones de oxidación es suministrado por medio de sopladores. Se cuenta con 7 unidades, 4 Oerlikon cada uno con capacidad de 50,970 m³/h con dos etapas y una presión de descarga de 103 kpa, estos suministran aire a los convertidores pequeños; los convertidores grandes reciben el aire de 3 sopladores Allis Chalmers, cada uno con capacidad de 56,407 m³/h, cuentan con una sola etapa y una presión de descarga de 103 kpa.

Pirómetros de radiación instalados en las chimeneas de los convertidores indican y registran la temperatura de baño. Cada convertidor es operado directamente desde un tablero de control.

En la parte lateral y superior de cada convertidor existen tolvas para sílica ("Flux"), la cual es alimentada al convertidor por medio de un sistema de vibrador y faja.

Los convertidores son servidos por tres grúas tipo puente montadas sobre rieles. Las grúas además, sirven a las Plantas de Moldeo. Estas están equipadas con un gancho principal y dos ganchos auxiliares, que son usados de acuerdo al lado que sea necesario.

2.1.2.2 Materias Primas

Las materias primas fundamentales del convertidor son la mata generada en los hornos reverberos y la sílica flux. También son considerados materias primas el material frío formado por ciertos materiales recirculantes tales como: escoria de hornos con alto contenido de cobre (FS), polvo de convertidores (CFD), polvo de

chimeneas de convertidores (CSD), polvo de calderos (WHBD) y material frío (CDM).

Tabla 2.7 Análisis Químicos de Materiales de Recirculación a Convertidores

Compuesto (%)	MEZCLA (%)
Cu	24.50
SiO ₂	14.90
Fe	32.90
FeO	21.47
Fe ₃ O ₄	22.41
CaO	1.31
Al ₂ O ₃	3.16
S	6.18

2.1.2.3 Descripción del Proceso

El propósito de la operación de conversión es remover el fierro, azufre y demás impurezas de la mata, produciendo así cobre blister. Esto se consigue mediante la oxidación de la mata a alta temperatura, con aire.

La mata producida en los hornos reverberos es transportada mediante ollas a los convertidores, siendo alimentada al convertidor por la boca de éste; luego aire es inyectado al convertidor para las posteriores reacciones de oxidación. La conversión de mata a cobre blister es un proceso por lotes; así durante este proceso se presentan dos etapas bien definidas: (1) La etapa de soplado a escoria, en la cual la mata es oxidada formando metal blanco (70-75% Cu). En esta etapa el fierro es removido del convertidor en forma de silicatos (sílica es agregada al convertidor en esta etapa de soplado), parte del azufre de la carga es también removido en forma de anhídrido sulfuroso; la escoria formada (con un contenido promedio de 2.75% Cu) es retornada a los hornos reverberos para la recuperación

de cobre. (2) Etapa de soplado a cobre, donde el metal blanco es oxidado formando así el cobre blister. En esta etapa el azufre es removido en forma de anhídrido sulfuroso.

Las reacciones llevadas a cabo en las dos etapas de conversión son exotérmicas, el exceso de calor generado en el convertidor es aprovechado para la fusión de materiales fríos (materiales ricos en cobre), y así no solo se consigue un equilibrio térmico en el convertidor sino también nos permite la recuperación de cobre de estos materiales.

Tabla 2.8 Análisis Químicos de Escoria de Convertidor y Cobre Blister

Compuesto (%)	Escoria Convertidor	Cobre Blister
Cu	2.75	99.20
Fe	46.22	0.01
FeO	37.88	
SiO ₂	26.25	
Al ₂ O ₃	5.52	
Fe ₃ O ₄	23.18	
S	0.54	0.03

2.1.2.3.1 Etapas del Proceso de Conversión

El proceso de conversión se lleva a cabo en dos etapas físico-químicas, ambas incluyen el soplado con aire de los materiales a transformar: (1) La formación de escoria, en la cual FeS es oxidado a FeO, Fe₃O₄ y a SO₂. Durante esta etapa de soplado, el SiO₂ es agregado, el cual se combina con FeO y parte del Fe₃O₄ en la formación de escoria de convertidor. La etapa de soplado a escoria finaliza cuando el FeS de la mata ha sido casi totalmente oxidado (mata con un contenido menor de 1% de FeS). La escoria (2FeO.SiO₂) saturada con magnetita es evacuada del

convertidor en esta etapa; el principal producto formado es el metal blanco, Cu_2S impuro. (2) La etapa de formación de cobre, en la cual los sulfuros remanentes de la etapa de soplado a escoria son oxidados a SO_2 . El principal producto de esta etapa de soplado es el cobre blister.

En operaciones industriales, la carga de mata y la evacuación de escoria se realizan en varias etapas. Un esquema clásico de operación de un convertidor se muestra en la Tabla 2.9.

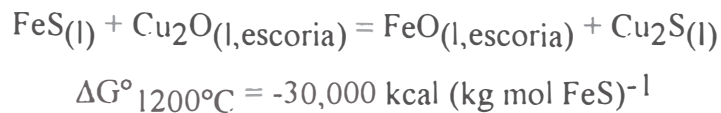
Tabla 2.9 Operación típica de un Convertidor

Convertidor	#Ollas de mata cargadas	#Ollas de m frío cargadas	Tiempo soplado a escoria min	#Ollas de escoria prod.	Tiempo escoriado y carga	Tiempo soplado a cobre min.	#Ollas de cobre prod.
4m x 9m	4	1	90	2.5	30		
	2	1	75	2	25		
	2		70	2	20		
	2		70	2	20		
	2		70	2	20		
		1				145	2.5
					50		
4m x 11m	5	1	80	3	35		
	3	1	75	2.5	25		
	3		75	2	20		
	2		70	2	20		
	2		70	2	20		
		1				155	3
					55		

La escoria formada dentro del convertidor es evacuada y enviada a los hornos reverberos para su limpieza y recuperación de cobre, utilizando ollas y grúas.

La etapa de soplado de los sulfuros de cobre y fierro, $\text{CuS}_2.\text{FeS}$, tiene una acción preferencial en la oxidación del FeS a FeO y Fe_3O_4 .

Cualquier fracción de Cu_2O formado es resulturado a Cu_2S mediante la siguiente reacción:

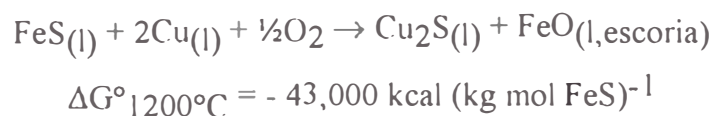


siendo la constante de equilibrio de esta reacción:

$$K = \frac{a_{\text{FeO}} a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{FeS}} a_{\text{Cu}_2\text{O}}}$$

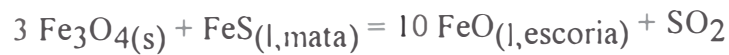
igual a 10^{+4} a 1200°C , lo cual muestra que el FeS sulfurará casi completamente al Cu_2S . En consecuencia, es fácil demostrar que al finalizar la etapa de soplado a escoria la baja en concentración de FeS implica un decaimiento en su actividad, lo cual origina una tendencia a la formación de Cu_2O .

Es también posible la formación de cobre metálico durante la etapa de soplado a escoria, pero éste también es resulturado de acuerdo a la siguiente reacción:



Una de las reacciones más importantes durante esta etapa, es la de formación de magnetita. A pesar ésta es un compuesto deseado durante la etapa de soplado en un convertidor, ya que forma capas en las paredes protegiendo de esta manera el ladrillo refractario; una excesiva formación de ésta genera escorias muy viscosas que tienden al atrapamiento de mata, aumentando la cantidad de cobre retornado al los hornos.

La tendencia de formación o reducción de magnetita dentro del convertidor, está representada mediante la siguiente reacción:

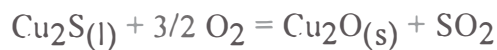


cuya constante de equilibrio está representada por:

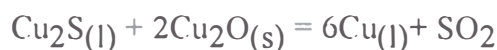
$$K = \frac{(a_{\text{FeO}})^{10} p_{\text{SO}_2}}{(a_{\text{Fe}_3\text{O}_4})^3 a_{\text{FeS}}}$$

y es igual a 10^{-4} a 1200°C . La formación de magnetita es controlada con la adición SiO_2 en esta etapa; disminuyendo la actividad del FeO la reacción tiende a desplazarse a la derecha.. La formación de magnetita se ve favorecida al final de esta etapa, la baja concentración de FeS y su consecuente disminución de actividad favorecen el desplazamiento de la reacción hacia la izquierda.

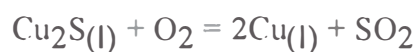
Durante la etapa de soplado a cobre, cobre metálico es formado mediante la combinación de las siguientes reacciones:



$$\Delta G^\circ_{1200^\circ\text{C}} = -54,500 \text{ kcal (kg mol SO}_2\text{)}^{-1}$$



$$\Delta G^\circ_{1200^\circ\text{C}} = -11,500 \text{ kcal (kg mol SO}_2\text{)}^{-1}$$



$$\Delta G^\circ_{1200^\circ\text{C}} = -40,200 \text{ kcal (kg mol SO}_2\text{)}^{-1}$$

El proceso de conversión es llevado a cabo hasta que trazas de Cu_2O aparecen, en dicho momento el metal líquido puede contener hasta 1.8% de oxígeno.

2.2 Descripción del proceso Futuro

La Fundición de cobre de Southern Peru Copper Corporation ha decidido hacer cambios en su proceso actual. La implementación de un Convertidor Modificado Teniente (CMT) originará cambios drásticos en el actual proceso productivo. El horno reverbero No.1 y dos de los convertidores convencionales serán puestos fuera de operación. En la Figura 2.2, se muestra el diagrama de flujo de la operación futura de la fundición.

2.2.1 Proceso Productivo General

El proceso productivo en la fundición, después de la implementación del CMT, consistirá en la fusión de concentrados en los hornos reverberos No.3 y No.4 y en el CMT.

La capacidad de fusión de los hornos reverberos será de 2,114 toneladas métricas diarias. Aproximadamente el 27% de la mata producida en los hornos será procesada en el CMT, en adición a las 744 toneladas métricas diarias de concentrado que éste fundirá, para la producción de metal blanco (75% Cu). La mezcla formada por el metal blanco producido por el CMT y el 73% de la mata remanente producida en los hornos, serán tratados en los convertidores convencionales para la producción de cobre blister.

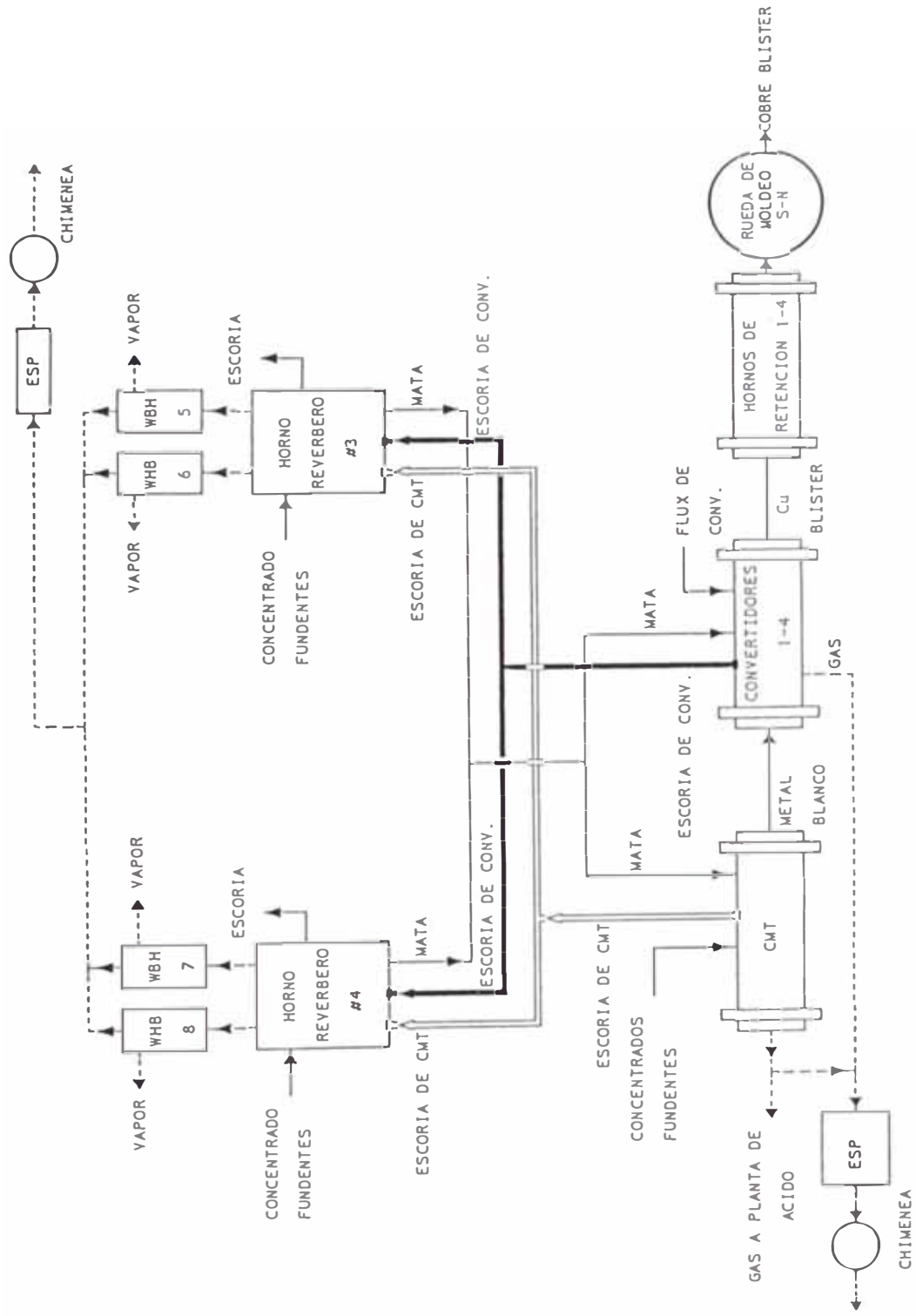


Figura 2.2 Diagrama futuro de proceso de la Fundición de Cobre de Southern Peru

Por otro lado, la escoria generada en el CMT y la escoria generada en los convertidores convencionales, serán tratadas en los hornos reverberos para su limpieza y recuperación de cobre. En el capítulo de técnicas de tratamiento de escorias, otros métodos alternativos serán tratados y puestos en discusión.

Un incremento en la producción de escorias de reverberos será observado; pero, se espera que no haya un incremento en las pérdidas de cobre.

Aproximadamente un 60% de los gases producidos en el CMT serán usados en la producción de ácido sulfúrico en la nueva planta que se instalará en la Fundición de Ilo. El remanente será evacuado al medio ambiente junto con los gases producidos en los convertidores convencionales.

2.3 Balance de Materia y Energía del Proceso Actual

Para el balance de materia y energía del proceso actual, se ha tomado como base una razón de fusión diaria de 2,992 toneladas métricas húmedas de concentrado y un consumo de 359 toneladas métricas húmedas de fundentes.

El balance se ha realizado individualmente para cada horno y en forma conjunta para todo el bloque de conversión.

Para el presente balance se ha usado como herramienta de trabajo el Software METSIM, el cual es un software que nos permite realizar balances de materia y energía de procesos químicos y metalúrgicos, siendo actualmente considerado como el de mayor potencial a nivel mundial (ver Apéndice A)..

2.3.1 Preparación de Camas

La cama se prepara mezclando en forma uniforme el concentrado y los fundentes, buscando la mejor distribución de los componentes dentro de la mezcla. Para la preparación de camas, el punto más importante es el cálculo de la relación eutéctica de la mezcla

Para el cálculo de esta relación se toman los siguientes criterios:

Peso total de SiO_2 en la mezcla = $\sum \text{Peso SiO}_2 \text{ ;}$

Peso total de CaO en la mezcla = $\sum \text{Peso CaO ;}$

Peso total de Al_2O_3 en la mezcla = $\sum \text{Peso Al}_2\text{O}_3 \text{ ;}$

Siendo "i" cada componente de la mezcla.

i : -Concentrado

-Sílica

-Coquina

-Cal

Para el caso del CaO, se toma todo el CaO presente en cada componente de la mezcla, y el equivalente de CaCO₃ como CaO en cada componente de la mezcla; así:

$$\Sigma \text{Peso CaO } _i = \Sigma \text{Peso CaO } _i + 0.56 \times \Sigma \text{Peso CaCO}_3 _i$$

Cálculo de la Relación Eutéctica

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{\Sigma \text{Peso SiO}_2 _i}{\Sigma \text{Peso SiO}_2 _i + \Sigma \text{Peso CaO } _i + \Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 _i}$$

$$\% \text{CaO} = \frac{\Sigma \text{Peso CaO } _i}{\Sigma \text{Peso SiO}_2 _i + \Sigma \text{Peso CaO } _i + \Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 _i}$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{\Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 _i}{\Sigma \text{Peso SiO}_2 _i + \Sigma \text{Peso CaO } _i + \Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 _i}$$

Siendo la relación teórica (a la cual se obtiene la menor temperatura de fusión de la mezcla) la siguiente:

%SiO ₂	62.00%
%CaO	24.00%
%AL ₂ O ₃	14.00%

Tabla 2.10 Componentes de las Camas

<u>Componente</u>	<u>Concentrado</u>	<u>Silica</u>	<u>Coquina</u>	<u>Cal</u>
TM/día				
Horno No.1	736	38	39	8
Horno No.3	1,128	59	61	12
Horno No.4	1,128	59	61	12
%Cu	26.46	0.00	0.00	0.00
%Fe	25.13	1.98	0.35	0.00
%S	30.85	0.00	0.00	0.00
%FeO	0.00	2.54	0.46	0.00
%Fe ₃ O ₄	0.00	0.00	0.00	0.00
%SiO ₂	4.61	89.92	2.51	0.00
%Al ₂ O ₃	2.47	2.40	0.56	0.00
%CaO	0.00	0.96	0.00	75.92
%CaCO ₃	0.54	0.00	90.11	16.81

Tabla 2.11 Determinación de la Relación Eutéctica

<u>Componente</u>	<u>TM/día</u>	<u>Relación Calculada (%)</u>	<u>Relación Teórica (%)</u>	<u>Diferencia (%)</u>
Horno No.1				
SiO ₂	76	58.45	62.00	-3.55
CaO	33	25.27	24.00	1.27
Al ₂ O ₃	21	16.27	14.00	2.27
Horno No.3				
SiO ₂	118	58.48	62.00	-3.52
CaO	51	25.31	24.00	1.31
Al ₂ O ₃	33	16.21	14.00	2.21
Horno No.4				
SiO ₂	118	58.48	62.00	-3.52
CaO	51	25.31	24.00	1.31
Al ₂ O ₃	33	16.21	14.00	2.21

2.3.2 Balance de Materia Hornos Reverberos

2.3.2.1 Parámetros de Combustión

Teniendo en cuenta los datos de planta, los parámetros de combustión se resumen en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Parámetros de Combustión

Componente	Quemadores Frontales			Quemador Vertical		
	m ³ /h	Presión kpa	Temp. °C	m ³ /h	Presión kpa	Temp. °C
Horno No.1						
Petróleo	4.09	378	116	0.64	206	116
Aire	57,766	102	427	9,444	102	25
Vapor	244	515	182	47	412	182
Horno No.3						
Petróleo	7.04	515	116	0.34	206	116
Aire	129,125	102	427	5,059	102	25
Vapor	320	652	182	25	412	182
Horno No.4						
Petróleo	7.04	515	116	0.34	206	116
Aire	129,125	102	427	5,059	102	25
Vapor	320	652	182	25	412	182

2.3.2.2 Balance de Materia

Para el balance de materia se consideran como materia prima la mezcla de concentrado y fundentes, petróleo, aire y vapor de quemadores, escoria de retorno de convertidores y aire de infiltración.

El aire de infiltración se ha calculado teniendo en cuenta los análisis orsat de los gases a la salida del horno. Así, un análisis típico de operación para oxígeno registra 0.20% en volumen en base seca, lo que equivale a 0.17% en base húmeda; de acuerdo a este valor se ha ajustado la cantidad de aire infiltrado a los hornos.

Tabla 2.13 Aire de Infiltración a los Hornos Reverberos

	Horno No.1	Horno No.3	Horno No.4
Aire Total Quemadores m ³ /h	67,210	134,184	134,184
Aire Total Infiltrado m ³ /h	33,058	43,953	43,953
Infiltración %	49	33	33

La Tabla 2.14, nos muestra los análisis químicos de los productos de la fusión de la carga en el horno. Las Tablas 2.15, 2.16 y 2.17, nos muestra los balances totales de materia de los Hornos Reverberos, expresado en toneladas métricas por día.

Tabla 2.14 Análisis Químicos de Productos de Fusión de Hornos Reverberos

Componente	Mata	Escoria	Escoria de Retorno
TM/día	2,270	2,063	1,737
%Cu	36.07	0.56	2.76
%Fe	34.81	37.92	48.01
%S	24.90	0.38	0.70
%FeO	0.76	40.74	39.74
%Fe ₃ O ₄	9.45	7.79	23.35
%SiO ₂	0.65	34.72	26.21
%Al ₂ O ₃	0.15	8.23	5.56
%CaO	0.12	6.48	0.87

**Tabla 2.15 Balance de Materia Horno Reverbero No.1
(Operación Actual)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	736
Sílica	38
Coquina	39
Cal	8
Escoria de Retorno	427
Petróleo	
Quemadores frontales	91
Quemador vertical	14
Aire de Combustión	
Quemadores frontales	706
Quemador vertical	267
Vapor de Atomización	
Quemadores frontales	16
Quemador vertical	3
Aire de Infiltración	925
Total	3,269
Salidas	
Mata a Conversión	558
Escoria a Botadero	507
Gases+Polvos	2,203
Total	<u>3,269</u>

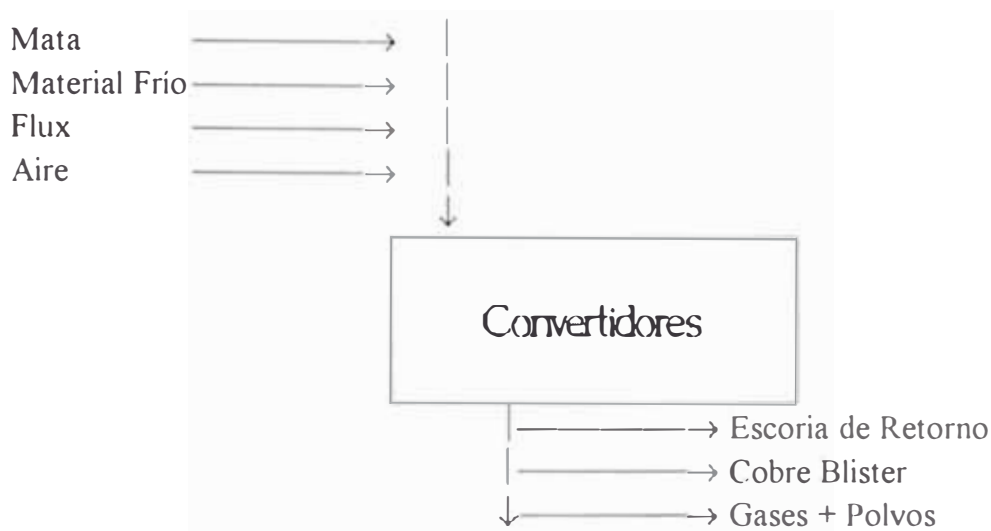
**Tabla 2.16 Balance de Materia Horno Reverbero No.3
(Operación Actual)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	1,128
Sílica	59
Coquina	61
Cal	12
Escoria de Retorno	655
Petróleo	
Quemadores frontales	157
Quemador vertical	8
Aire de Combustión	
Quemadores frontales	1,577
Quemador vertical	143
Vapor de Atomización	
Quemadores frontales	28
Quemador vertical	1
Aire de Infiltración	1,229
Total	5,058
Salidas	
Mata a Conversión	856
Escoria a Botadero	778
Gases+Polvos	3,424
Total	<u>5,058</u>

**Tabla 2.17 Balance de Materia Horno Reverbero No.4
(Operación Actual)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	1,128
Sílica	59
Coquina	61
Cal	12
Escoria de Retorno	655
Petróleo	
Quemadores frontales	157
Quemador vertical	8
Aire de Combustión	
Quemadores frontales	1,577
Quemador vertical	143
Vapor de Atomización	
Quemadores frontales	28
Quemador vertical	1
Aire de Infiltración	1,229
Total	5,058
Salidas	
Mata a Conversión	856
Escoria a Botadero	778
Gases+Polvos	3,424
Total	<u>5,058</u>

2.3.3 Balance de Materia Convertidores



Para los convertidores, se toma como alimentación la mata producida en los hornos reverberos, silica flux, material frío y aire de soplado.

Tabla 2.18 Características del Aire de Soplado

	m ³ /h	Presión k a	Temp. °C
Aire de <u>Soplado</u>	158,670	103	100

Tabla 2.19 Análisis Químicos de Productos y Materias Primas Convertidores

Componente	Material Frío	Silica Flux	Cobre Blister
TM/día	360	586	794
%Cu	24.50	0.49	99.20
%Fe	32.90	3.29	0.01
%S	6.18	1.75	0.02
%FeO	21.47	0.62	
%Fe ₃ O ₄	22.41	0.00	
%SiO ₂	14.90	71.88	
%Al ₂ O ₃	3.16	15.20	
%CaO	1.31	0.72	

**Tabla 2.20 Balance de Materia Convertidores
(Operación Actual)**

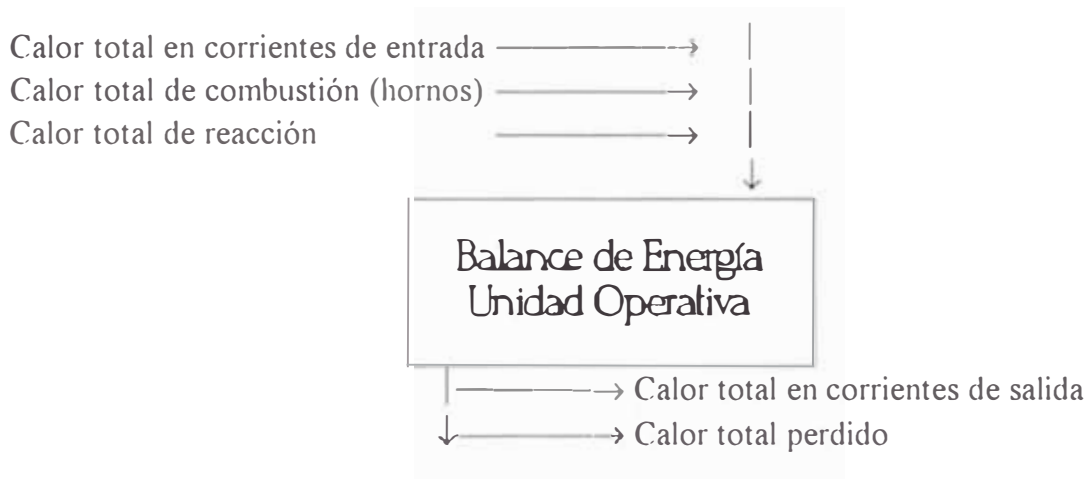
	TM/día
Entradas	
Mata de Reverberos	2,180
Sílica Flux	586
Material Frío	360
Aire	3,563
Total	6,689
Salidas	
Escoria de Retorno	1,867
Cobre Blister	794
Gases+Polvos	4,029
Total	<u>6,689</u>

Los análisis de la mata y escoria de conversión están expresados en la Tabla 2.14.

En la Tabla 2.19, se muestran los análisis químicos de las materias primas y productos en la etapa de conversión. En la Tabla 2.20, se muestra el balance total de masa para los convertidores, expresado en toneladas métricas por día.

Para el cálculo de balance de materiales, se tomó en cuenta las siguientes asunciones: (1) Pérdida de mata durante su tratamiento igual a 4%, y (2) Pérdida de escoria de retorno durante su tratamiento igual a 7%.

2.3.4 Balance de Energía



Para el balance de energía se ha considerado lo siguiente:

$$\text{Calor Total de Entrada} + \text{Calor Total Generado} - \text{Calor Total de Salida} + \text{Calor Total Perdido}$$

Donde:

$$\text{Calor Total de Entrada} = \Sigma \text{ Calor total de corrientes de entrada}$$

Calor Total de Salida = Σ Calor total de corrientes de salida

Calor Total Generado = Calor total de reacción

Calor Total Perdido = Calor perdido por equipos (Hornos, Convertidores)

Calor total corriente de entrada = $\Sigma m_i \times \Delta H_i$

Calor total corriente de salida = $\Sigma m_j \times \Delta H_j$

Siendo:

$m_{(i/j)}$ = masa de cada componente de la corriente de entrada/salida (Kmol/h)

$\Delta H_{(i/j)}$ = calor de cada componente de la corriente de entrada/salida (Kcal/Kmol)

En las Tablas 2.21, 2.22, 2.23 2.24, se muestran los balances de energía para los tres hornos reverberos y el bloque de conversión respectivamente. Los balances están expresados en Kcal/h y las temperaturas de cada línea en °C.

**Tabla 2.21 Balance de Energía Horno Reverbero No.1
(Operación Actual)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Concentrado	25	13
Silica	25	0
Coquina	25	0
Cal	25	0
Escoria de Retorno	1,227	5,824
Petróleo		
Quemadores frontales	116	86
Quemador vertical	116	13
Aire de Combustión		
Quemadores frontales	427	2,952
Quemador vertical	25	10
Vapor de Atomización		
Quemadores frontales	182	47
Quemador vertical	182	7
Aire de Infiltración	25	36
Mata a Conversión	1,121	-5,277
Escoria a Botadero	1,183	-7,051
Gases+Polvos	1,244	-32,386
Balance Total de Calor		
Calor Total de Corrientes de Entrada		8,989
Calor Total de Combustión		44,513
Calor Total de Reacciones de Fusión		5,400
Calor Total Perdido		-14,188
Calor Total de Corrientes de Salida		<u>-44,714</u>

**Tabla 2.22 Balance de Energía Horno Reverbero No.3
(Operación Actual)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Concentrado	25	19
Silica	25	0
Coquina	25	0
Cal	25	0
Escoria de Retorno	1,227	8,865
Petróleo		
Quemadores frontales	116	148
Quemador vertical	116	7
Aire de Combustión		
Quemadores frontales	427	6,599
Quemador vertical	25	6
Vapor de Atomización		
Quemadores frontales	182	81
Quemador vertical	182	4
Aire de Infiltración	25	48
Mata a Conversión	1,131	-8,154
Escoria a Botadero	1,191	-10,897
Gases+Polvos	1,244	-50,389
Balance Total de Calor		
Calor Total de Corrientes de Entrada		15,778
Calor Total de Combustión		69,551
Calor Total de Reacciones de Fusión		8,130
Calor Total Perdido		-24,019
Calor Total de Corrientes de Salida		<u>-69,440</u>

**Tabla 2.23 Balance de Energía Horno Reverbero No.4
(Operación Actual)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Concentrado	25	19
Silica	25	0
Coquina	25	0
Cal	25	0
Escoria de Retorno	1,227	8,865
Petróleo		
Quemadores frontales	116	148
Quemador vertical	116	7
Aire de Combustión		
Quemadores frontales	427	6,599
Quemador vertical	25	6
Vapor de Atomización		
Quemadores frontales	182	81
Quemador vertical	182	4
Aire de Infiltración	25	48
Mata a Conversión	1,131	-8,154
Escoria a Botadero	1,191	-10,897
Gases+Polvos	<u>1,244</u>	<u>-50,389</u>

Balance Total de Calor

Calor Total de Corrientes de Entrada	15,778
Calor Total de Combustión	69,551
Calor Total de Reacciones de Fusión	8,130
Calor Total Perdido	-24,019
Calor Total de Corrientes de Salida	<u>-69,440</u>

**Tabla 2.24 Balance de Energía Convertidores
(Operación Actual)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Mata de Reverberos	1,130	20,719
Sílica Flux	25	-4
Material Frío	25	-3
Aire	100	2,574
Escoria de Retorno	1,204	-25,482
Cobre Blister	1,080	-5,288
Gases+Polvos	1,204	-49,611
Balance Total de Calor		
Calor Total de Corrientes de Entrada		23,286
Calor Total de Reacciones		68,832
Calor Total Perdido		-11,737
Calor Total de Corrientes de Salida		<u>-80,381</u>

2.4 Balance de Materia y Energía del Proceso Futuro

Para el balance de materia y energía del proceso futuro, se ha tomado como base una razón de fusión diaria de 2,286 toneladas métricas húmedas de concentrado y 252 toneladas métricas húmedas de fundentes en los Hornos Reverberos, y 804 toneladas métricas húmedas de concentrado en el CMT.

El balance se ha realizado independientemente para cada horno, dos bloques de conversión y el Convertidor Teniente.

El presente balance se ha basado en el modelo METSIM desarrollado para el balance actual (ver Apéndice A), teniendo ciertas variaciones en los bloques de conversión y desarrollando el modelo que represente al Convertidor Teniente.

2.4.1 Preparación de Camas

Siguiendo la misma secuencia de preparación planteada en el balance del proceso actual, se obtienen las camas para los hornos reverberos.

Tabla 2.25 Componentes de las Camas

<u>Componente</u>	<u>Concentrado</u>	<u>Sílica</u>	<u>Coquina</u>	<u>Cal</u>
TM/día				
Horno No.3	1,143	74	60	12
Horno No.4	1,143	74	60	12
%Cu	26.46	0.00	0.00	0.00
%Fe	25.13	1.98	0.35	0.00
%S	30.85	0.00	0.00	0.00
%FeO	0.00	2.54	0.46	0.00
%Fe ₃ O ₄	0.00	0.00	0.00	0.00
%SiO ₂	4.61	89.92	2.51	0.00
%Al ₂ O ₃	2.47	2.40	0.56	0.00
%CaO	0.00	0.96	0.00	75.92
%CaCO ₃	0.54	0.00	90.11	16.81

Tabla 2.26 Determinación de la relación Eutéctica

Componente	TM/día	Relación Calculada (%)	Relación Teórica (%)	Diferencia (%)
Horno No.3				
SiO ₂	133	61.25	62.00	-0.75
CaO	51	23.35	24.00	-0.65
Al ₂ O ₃	33	15.40	14.00	1.40
Horno No.4				
SiO ₂	133	61.25	62.00	-0.75
CaO	51	23.35	24.00	-0.65
Al ₂ O ₃	33	15.40	14.00	1.40

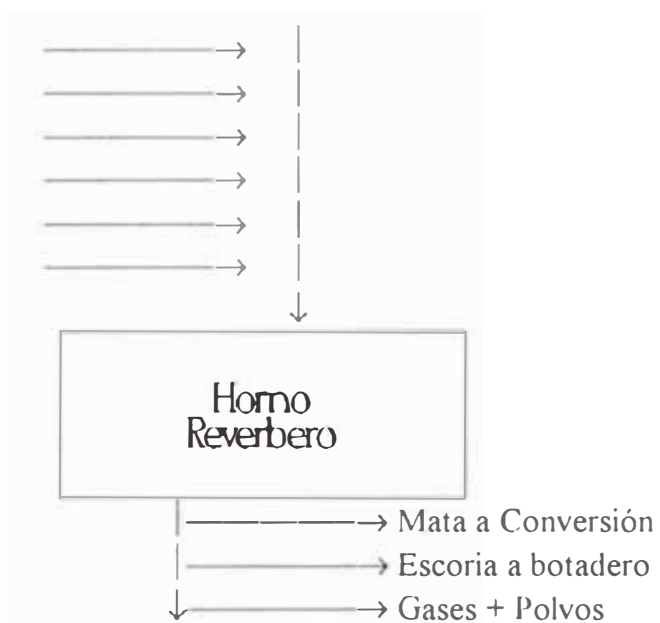
2.4.2 Balance de Materia Hornos Reverberos

2.4.2.1 Parámetros de Combustión

Los parámetros de combustión para el proceso futuro, se mantendrán igual que en el proceso actual. Así los datos contenidos en la Tabla 2.12 para los hornos reverberos No.3 y No 4 serán usados en el balance futuro.

2.4.2.2 Balance de Materia

Carga
Petróleo
Aire
Vapor
Aire de Infiltración
Escoria de Retorno



Al igual que en el caso actual, se consideran como materia prima la mezcla de concentrados y fundentes, petróleo, aire y vapor de quemadores, escoria de convertidores, aire de infiltración y además la escoria generada en el Convertidor Teniente.

El aire de infiltración se ha calculado de igual forma que en balance del proceso actual, además teniendo en cuenta la misma relación de infiltración calculada. Los datos de la Tabla 2.13 serán los mismo para el balance de la operación futura.

La Tabla 2.27, nos muestra los análisis químicos de los productos de la fusión de la carga en el horno para la operación futura. Las Tablas 2.28 y 2.29, nos muestra los balances totales de materia de los hornos reverberos, expresado en toneladas métricas por día.

Tabla 2.27 Análisis Químicos de Productos de Fusión de Hornos Reverberos Operación Futura

Componente	Mata	Escoria	Escoria de Retorno
TM/día	1,806	1,960	1,780
%Cu	37.44	0.64	5.12
%Fe	33.70	40.90	47.76
%S	24.48	0.42	1.37
%FeO	0.99	44.46	39.13
%Fe ₃ O ₄	9.51	7.84	23.20
%SiO ₂	0.78	35.07	26.25
%Al ₂ O ₃	0.11	5.00	2.27
%CaO	0.12	5.35	0.91

Hay que tener presente que, los análisis presentados para la escoria de retorno corresponde a la mezcla de la escoria de convertidores con la escoria producida en el Convertidor Teniente.

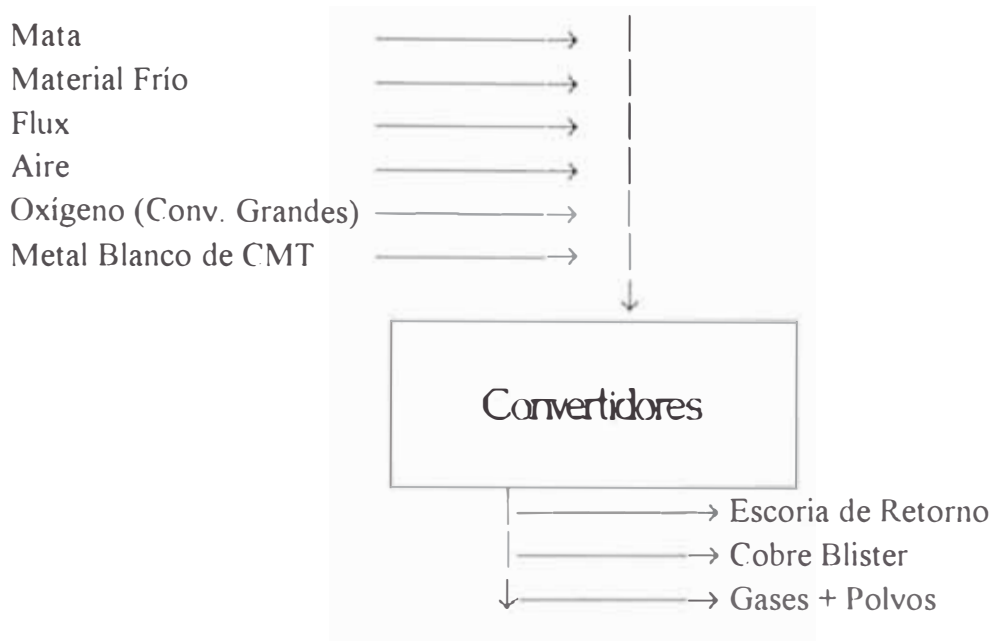
**Tabla 2.28 Balance de Materia Horno Reverbero No.3
(Operación Futura)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	1,143
Sílica	74
Coquina	60
Cal	12
Escoria de Retorno	890
Petróleo	
Quemadores frontales	157
Quemador vertical	8
Aire de Combustión	
Quemadores frontales	1,577
Quemador vertical	143
Vapor de Atomización	
Quemadores frontales	28
Quemador vertical	1
Aire de Infiltración	1,237
Total	5,329
Salidas	
Mata a Conversión	903
Escoria a Botadero	980
Gases+Polvos	3,446
Total	<u>5,329</u>

**Tabla 2.29 Balance de Materia Horno Reverbero No.4
(Operación Futura)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	1,143
Silica	74
Coquina	60
Cal	12
Escoria de Retorno	890
Petróleo	
Quemadores frontales	157
Quemador vertical	8
Aire de Combustión	
Quemadores frontales	1,577
Quemador vertical	143
Vapor de Atomización	
Quemadores frontales	28
Quemador vertical	1
Aire de Infiltración	1,237
Total	5,329
Salidas	
Mata a Conversión	903
Escoria a Botadero	980
Gases+Polvos	3,446
Total	<u>5,329</u>

2.4.3 Balance de Materia Convertidores



Para el balance de convertidores, se han tomado en cuenta dos escenarios de operación. Un primer bloque de conversión correspondiente a los convertidores pequeños, los cuales tendrán una operación similar a la actual, con la diferencia que además de la mata, sílica flux, material frío y aire, se le adicionara metal blanco producido en el Convertidor Teniente; un segundo bloque de conversión corresponderá a los convertidores grandes, los cuales tendrán una operación similar a los convertidores pequeños, con la diferencia que durante la etapa de soplado a escoria, éstos operarán con aire enriquecido con oxígeno (23% O₂).

Tabla 2.30 Características del Aire Total de Soplado

	m ³ /h	Presión kpa	Temp. °C
Aire de <u>Soplado</u>	127,036	103	100

Tabla 2.31 Análisis Químicos de Productos y Materias Primas Convertidores

Componente	Mata	Sílica Flux	Material Frio	Escoria Retorno	Cobre Blister	Metal Blanco
C. Pequeños						
TM/día	311	64	44	243	148	41
%Cu	37.44	0.00	24.50	2.94	99.20	75.86
%Fe	33.70	1.98	32.90	50.05	0.01	3.22
%S	24.48	0.00	6.18	0.74	0.02	20.58
%FeO	0.99	2.54	21.47	41.05		0.00
%Fe ₃ O ₄	9.51	0.00	22.41	24.75		1.00
%SiO ₂	0.78	89.92	14.90	27.46		0.00
%Al ₂ O ₃	0.11	0.00	3.16	1.34		0.00
%CaO	0.12	0.96	1.31	0.84		0.00
C. Grandes						
TM/día	885	195	274	814	657	399
%Cu	37.44	0.00	24.50	2.75	99.20	75.86
%Fe	33.70	1.98	32.90	49.76	0.01	3.22
%S	24.48	0.00	6.18	0.69	0.02	20.58
%FeO	0.99	2.54	21.47	41.51		0.00
%Fe ₃ O ₄	9.51	0.00	22.41	23.85		1.00
%SiO ₂	0.78	89.92	14.90	27.46		0.00
%Al ₂ O ₃	0.11	0.00	3.16	1.76		0.00
%CaO	0.12	0.96	1.31	1.18		0.00

En la Tabla 2.31, se muestran los análisis químicos de las materia primas y productos en la etapa de conversión. En las Tablas 2.32 y 2.33, se muestran los balances totales de masa para los convertidores, expresado en toneladas métricas por día.

2.4.4 Balance de Materia Convertidor Teniente

Para el balance del Convertidor Teniente, se consideran como materia prima la mezcla de concentrado, sílica y material frío, mata de reverberos, aire de soplado y oxígeno necesario para un enriquecimiento de aire de 30.2% O₂.

**Tabla 2.32 Balance de Materia Convertidores *
(Operación Futura)**

	TM/día
Entradas	
Mata de Reverberos	885
Metal Blanco de CMT	399
Sílica Flux	195
Material Frío	274
Aire	2,260
Oxígeno	41
Total	4,054
Salidas	
Escoria de Retorno	814
Cobre Blister	657
Gases+Polvos	2,584
Total	<u>4,054</u>

(*) Convertidores grandes, usando aire enriquecido con oxígeno en etapa de soplado a escoria.

**Tabla 2.33 Balance de Materia Convertidores *
(Operación Futura)**

	TM/día
Entradas	
Mata de Reverberos	311
Metal Blanco de CMT	41
Sílica Flux	64
Material Frío	44
Aire	593
Total	1,053
Salidas	
Escoria de Retorno	243
Cobre Blister	148
Gases+Polvos	662
Total	<u>1,053</u>

(*) Convertidores pequeños.

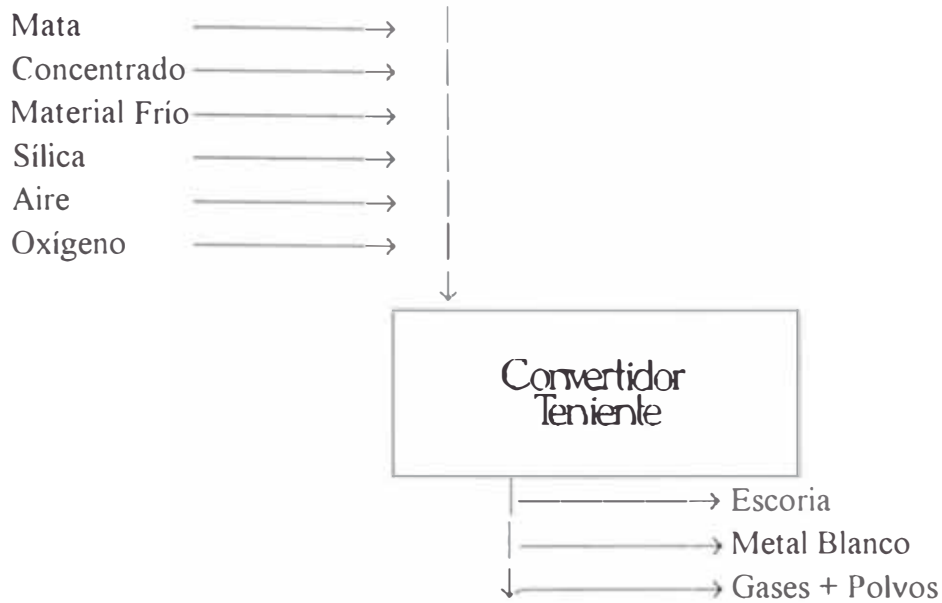


Tabla 2.34 Características del Aire Total de Soplado CMT

	m ³ /h	Presión kpa	Temp. °C
Aire de <u>Soplado</u>	48,727	103	100

Tabla 2.35 Análisis de Químicos de Productos y Materias Primas CMT

Componente	Conc.	Flux	Mata	Metal Blanco	Escoria
TM/día	804	227	538	461	857
%Cu	26.46	4.88	37.44	75.86	8.00
%Fe	25.13	8.13	33.70	3.22	45.21
%S	30.85	1.23	24.48	20.58	2.20
%FeO	0.00	6.31	0.99	0.00	36.32
%Fe ₃ O ₄	0.00	4.46	9.51	1.00	22.15
%SiO ₂	4.61	74.87	0.78	0.00	24.75
%Al ₂ O ₃	2.47	2.55	0.11	0.00	3.02
%CaO	0.00	1.03	0.12	0.00	0.67

En la Tabla 2.35, se muestran los análisis químicos de las materias primas y productos del CMT. En la Tabla 2.36, se muestra el balance total de materia del CMT, expresado en toneladas métricas por día.

**Tabla 2.36 Balance de Materia Convertidor Teniente
(Operación Futura)**

	TM/día
Entradas	
Concentrado	804
Material Frío	45
Sílica	182
Mata de Reverberos	538
Aire de Soplado	1,094
Aire Gurr Gun	115
Oxígeno	183
Total	2,961
Salidas	
Metal Blanco	461
Escoria	857
Gases+Polvos	1,643
Total	<u>2,961</u>

Para el cálculo de balance de materiales, se tomó en cuenta las siguientes asunciones: (1) Pérdida de mata durante su tratamiento igual a 4%, (2) pérdida de escoria de convertidores y escoria de CMT durante su tratamiento igual a 7%, y (3) pérdida de metal blanco igual a 7.7% durante su tratamiento.

2.4.5 Balance de Energía

El balance de energía para el proceso futuro, se ha desarrollado teniendo en cuenta los mismos principios termodinámicos aplicados en el balance de la operación actual, así la misma metodología de cálculo es aplicada.

Las Tablas 2.37, 2.38, 2.39, 2.40 y 2.41, muestran los respectivos balances de energía para cada horno reverbero, los bloques de conversión y el CMT.

Los balances están expresados en Kcal/h y las temperaturas de cada línea en °C.

**Tabla 2.37 Balance de Energía Horno Reverbero No.3
(Operación Futura)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Concentrado	25	20
Sílica	25	0
Coquina	25	0
Cal	25	0
Escoria de Retorno	1,224	11,884
Petróleo		
Quemadores frontales	116	148
Quemador vertical	116	7
Aire de Combustión		
Quemadores frontales	427	6,599
Quemador vertical	25	6
Vapor de Atomización		
Quemadores frontales	182	81
Quemador vertical	182	4
Aire de Infiltración	25	49
Mata a Conversión	1,118	-8,447
Escoria a Botadero	1,177	-13,605
Gases+Polvos	1,226	-49,783
Balance Total de Calor		
Calor Total de Corrientes de Entrada		18,798
Calor Total de Combustión		69,551
Calor Total de Reacciones de Fusión		8,084
Calor Total Perdido		-24,597
Calor Total de Corrientes de Salida		<u>-71,835</u>

**Tabla 2.38 Balance de Energía Horno Reverbero No.4
(Operación Futura)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Concentrado	25	20
Sílica	25	0
Coquina	25	0
Cal	25	0
Escoria de Retorno	1,224	11,884
Petróleo		
Quemadores frontales	116	148
Quemador vertical	116	7
Aire de Combustión		
Quemadores frontales	427	6,599
Quemador vertical	25	6
Vapor de Atomización		
Quemadores frontales	182	81
Quemador vertical	182	4
Aire de Infiltración	25	49
Mata a Conversión	1,118	-8,447
Escoria a Botadero	1,177	-13,605
Gases+Polvos	1,226	-49,783
Balance Total de Calor		
Calor Total de Corrientes de Entrada		18,798
Calor Total de Combustión		69,551
Calor Total de Reacciones de Fusión		8,084
Calor Total Perdido		-24,597
Calor Total de Corrientes de Salida		<u>-71,835</u>

**Tabla 2.39 Balance de Energía Convertidores *
(Operación Futura)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Mata de Reverberos	1,118	8,275
Metal Blanco de CMT	1,239	3,135
Silica Flux	25	0
Material Frío	25	-2
Aire	100	1,633
Oxígeno	35	3
Escoria de Retorno	1,213	-11,037
Cobre Blister	1,080	-4,438
Gases+Polvos	1,213	-26,894

Balance Total de Calor

Calor Total en Corrientes de Entrada	13,044
Calor Total de Reacciones	33,050
Calor Total Perdido	-3,725
Calor Total en Corrientes de Salida	-42,369

(*) Convertidores grandes, usando aire enriquecido con oxígeno en etapa de soplado a escoria.

**Tabla 2.40 Balance de Energía Convertidores *
(Operación Futura)**

	Temperatura °C	Calor Kcal/h x1000
Mata de Reverberos	1,118	2,908
Metal Blanco de CMT	1,239	326
Silica Flux	25	0
Material Frío	25	0
Aire	100	428
Escoria de Retorno	1,206	-3,256
Cobre Blister	1,080	-1,001
Gases+Polvos	1,206	-7,624

Balance Total de Calor

Calor Total en Corrientes de Entrada	3,661
Calor Total de Reacciones	9,980
Calor Total Perdido	-1,760
Calor Total en Corrientes de Salida	<u>-11,880</u>

(*) Convertidores pequeños.

CAPITULO III

ESCORIAS

3.1 Introducción

Las escorias de fusión están formadas básicamente a partir de los óxidos de la carga al horno, y de los óxidos formados durante la etapa de fusión; mientras que las escorias de conversión están básicamente formadas por la oxidación del sulfuro de hierro (FeS) a óxido ferroso (FeO), la formación de silicato ferroso ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) y la oxidación del óxido ferroso a magnetita (Fe_3O_4) como se vio en el Capítulo II.

3.2 Caracterización de las Escorias de Reverbero

Las escorias de hornos reverberos están formadas principalmente por: los óxidos provenientes de la carga a los hornos y óxidos ferrosos producidos por oxidación durante la etapa de fusión de concentrados y fundentes. Los óxidos provenientes de la escorias de convertidores, también forman parte de la escoria de los hornos reverberos. La Tabla 3.1, muestra un análisis característico de las escorias de fusión de la Fundición de Ilo.

Tabla 3.1 Análisis Químico característico de las Escorias de Fusión

%Cu	%Fe	%FeO	<u>%Fe₃O₄</u>	<u>%SiO₂</u>	%CaO	<u>%Al₂O₃</u>
0.55	36.06	38.88	8.05	33.70	5.10	7.44

3.2.1 Físico-Química de las Escorias de Fusión

3.2.1.1 Sistemas Ternarios

El rango de composición en el cual las escorias de fusión son líquidas, puede ser representado claramente en el sistema ternario $\text{FeO-Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$. Como se puede apreciar en la Figura 3.1, las escorias de fusión de los hornos de la Fundición de Ilo, se encuentran casi en el límite de saturación con sílica, lo cual equivale a la temperatura de 1200 °C; es decir se encuentran en una región netamente tridimítica (SiO_2) a una temperatura aproximada de 1200 °C.

Otro sistema que puede representar claramente a las escorias de reverbero es el sistema ternario CaO-FeO-SiO_2 . Como se puede apreciar en la Figura 3.2, las escorias de los hornos de la Fundición de Ilo se encuentran muy cerca de la curva de saturación con sílica, tal como se vio en la Figura 3.1. Así, tomando en cuenta los dos sistema ternarios analizados, podemos concluir que las escorias se la Fundición de Ilo se encuentran básicamente por encima de la curva de saturación con sílica, aproximadamente a 1200°C (lo cual se demuestra fácilmente realizando mediciones de temperatura de estas), presentando un predominio de la tridimita.

3.2.1.2 Propiedades Físicas

Las principales propiedades físicas de las escorias son presentadas en la Tabla 2.6 en el Capítulo II.

3.2.1.2.1 Viscosidad de las Escorias

Normalmente las escorias de los procesos de fusión de cobre, son ferrosilicatos, con composición variable de otros compuestos. Oxidos de aluminio, calcio y magnesio (Al_2O_3 , CaO , MgO) están presentes en la mayoría de las

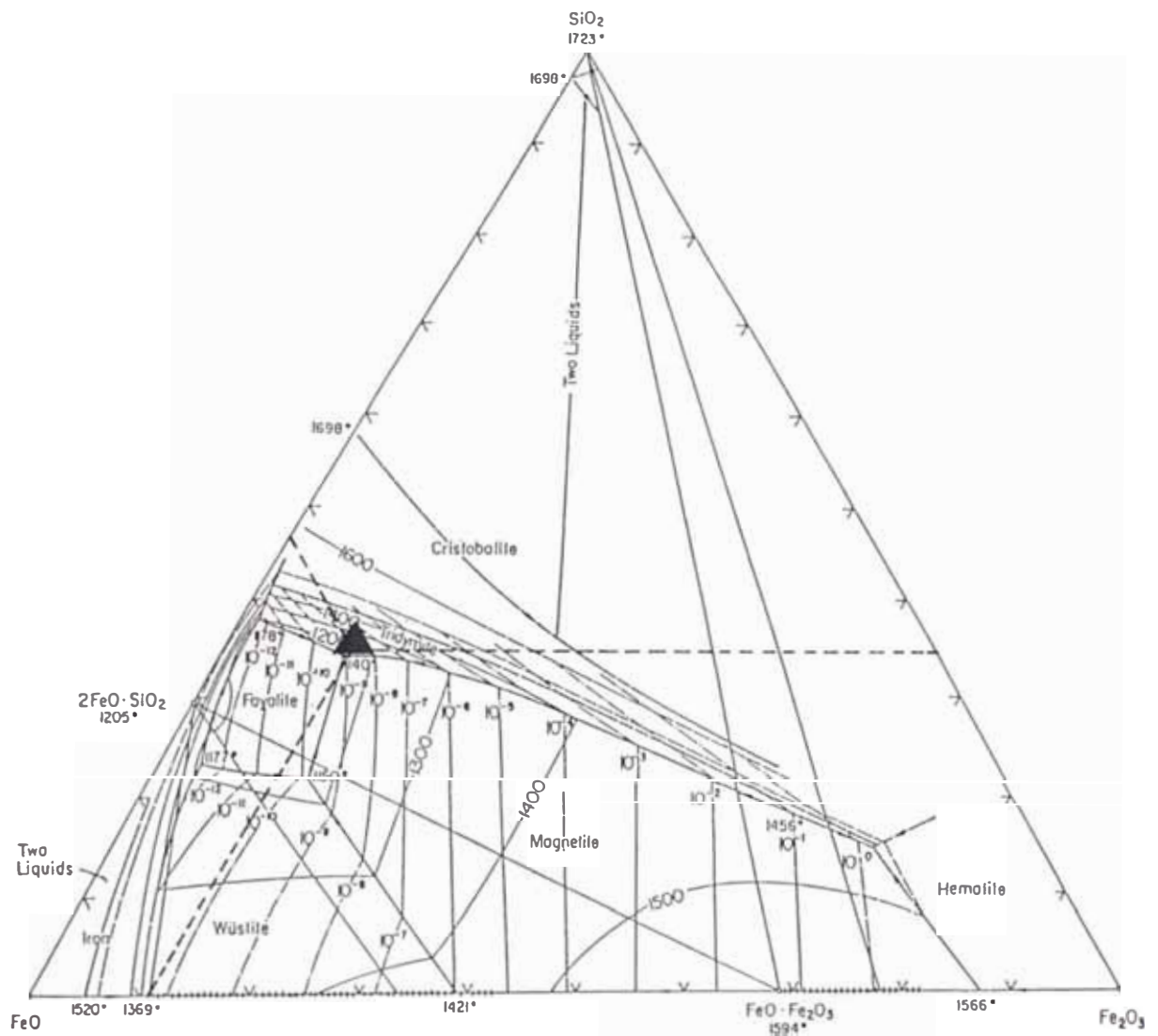


Figura 3.1 Sistema Ternario FeO-Fe₂O₃-SiO₂

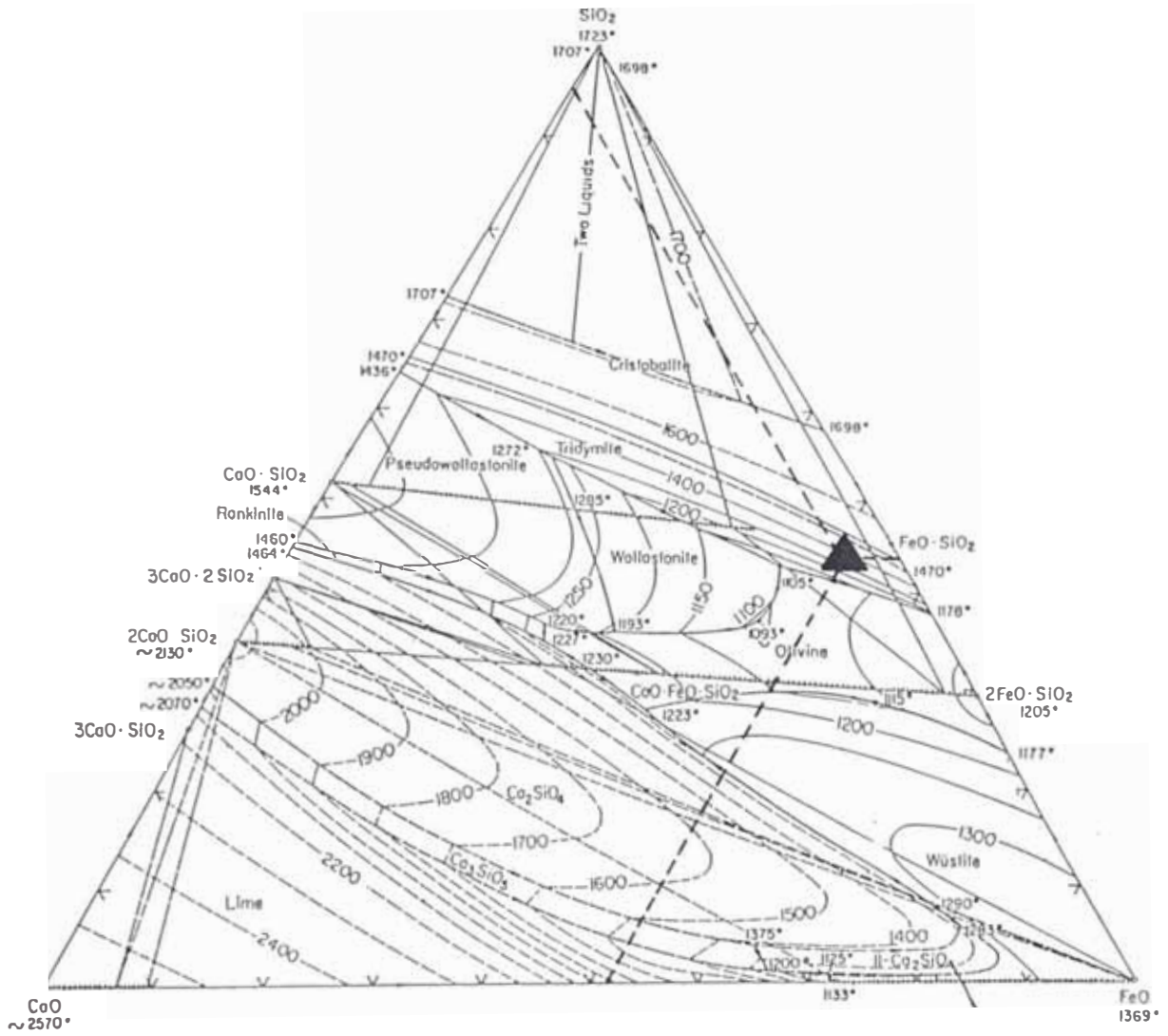


Figura 3.2 Sistema Ternario FeO-SiO₂-CaO

escorias de hornos reverberos, convertidores y procesos continuos. La viscosidad de las escorias dependen principalmente de la composición de la misma.

La viscosidad de las escorias puede ser calculada a partir de su módulo de viscosidad, el cual esta dado por la siguiente expresión [2][3]:

$$K_v = \frac{\text{wt\% FeO} + \text{wt\% Fe}_3\text{O}_4 + \text{wt\% CaO} + \text{wt\% MgO}}{\text{wt\% SiO}_2 + \text{wt\% Al}_2\text{O}_3}$$

Siendo wt%M_xO_y el porcentaje en peso del óxido en mención.

Las escorias de fusión deben ser lo suficientemente fluidas, para poder así permitir un asentamiento de las partículas de mata atrapadas en éstas. Por esta razón, las escorias de fusión deben tener la menor viscosidad posible. Así, un incremento brusco de los niveles de Al₂O₃ y SiO₂ pueden causar una disminución del módulo de viscosidad y por lo tanto un incremento de la viscosidad de las escorias; dificultando la separación de partículas de mata atrapadas en éstas, incrementando las pérdidas de cobre por atrapamiento físico.

Teniendo en cuenta los análisis químicos de la Tabla 3.1, el módulo de viscosidad de las escorias de fusión de la Fundición de Ilo sería el siguiente:

$$K_v = \frac{38.88 + 8.05 + 5.10 + 0}{33.70 + 7.44}$$

$$K_v = 1.3$$

Usando la Figura 3.3, se puede calcular la viscosidad de las escorias teniendo el valor del módulo de viscosidad. Para nuestro caso la viscosidad sería de 11.3 P.

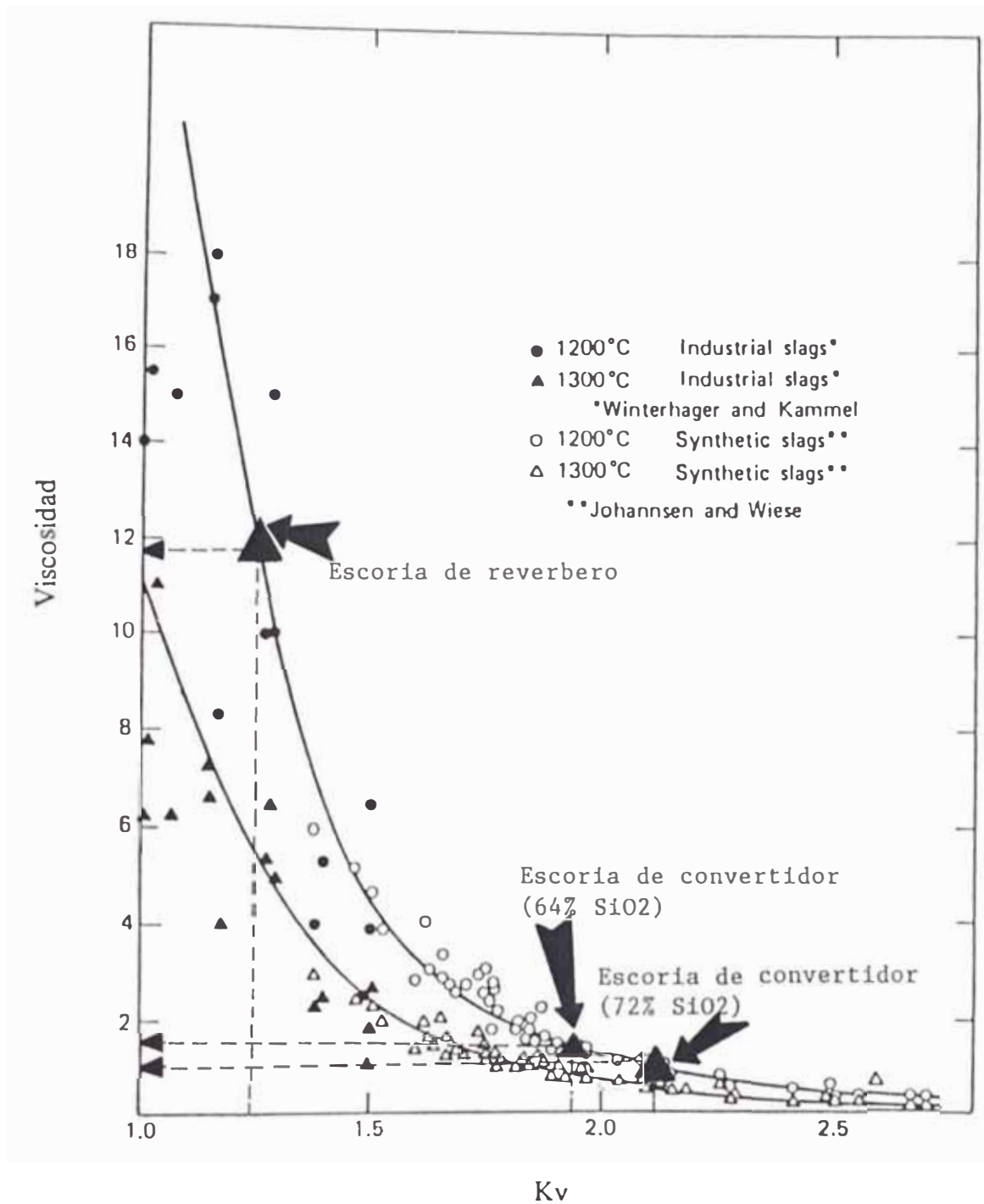


Figura 3.3 Viscosidad de escorias como función del Módulo de Viscosidad Kv

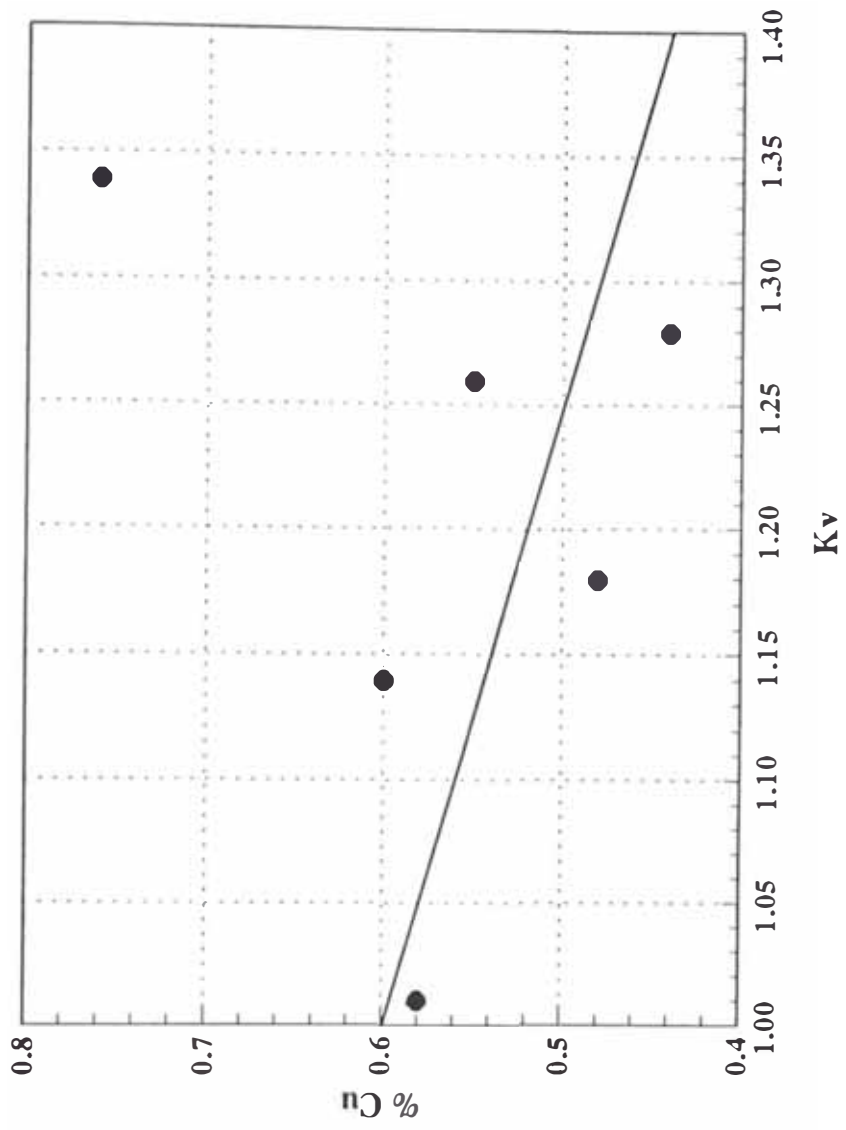


Figura 3.4 Relación Kv con %Cu en escoria de reverbero

Como se puede apreciar en la Tabla 2.6, las escorias de fusión tienen una viscosidad entre 5.00 y 20.00 P, lo cual indica que las escorias de la Fundición de Ilo tienen una viscosidad adecuada, lo cual se manifiesta en pérdidas de cobre relativamente bajas (0.55%).

En el Figura 3.4, se muestra la relación entre el módulo de viscosidad y las pérdidas de cobre. Como se puede apreciar, el concepto explicado líneas arriba se puede demostrar fácilmente. Un incremento en el módulo (lo cual implica una baja en la viscosidad) implica menores pérdidas de cobre en las escorias.

3.2.1.2.2 Grado de Silicatación


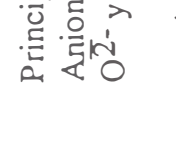
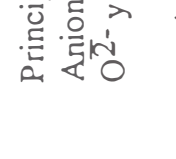
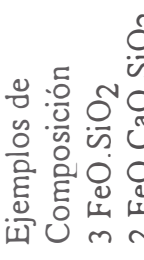

Las escorias de fusión son compuestos iónicos. Estas están formadas por cationes tales como Ca^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , aniones tales como O^{-2} , SiO^{-4} y cadenas y anillos silicatados. Como se observa en la Tabla 3.2, las escorias están clasificadas en básicas, neutras y ácidas, de acuerdo a su grado de silicatación, el cual esta definido como [2]:

$$GS = \frac{\eta \text{ (Moles de oxígeno ácido a partir de SiO}_2\text{)}}{\eta \text{ (Moles de oxígeno básico a partir de CaO, FeO, Mg, etc.)}}$$

Las escorias básicas tienen una estructura muy simple, lo cual redundará en una gran fluidez; mientras que escorias ácidas están formadas por largas cadenas y complejos anillos silicatados, lo cual origina escorias muy viscosas.

Teniendo en cuenta los análisis de las escorias de fusión en la Fundición de Ilo, podemos observar un grado de silicatación igual a 0.9, lo cual las coloca en la zona de escorias básicas. Esto queda fácilmente demostrado, como podemos

Tabla 3.2 Composición y Estructura de Escorias Silicatadas

Clasificación	GS	Ejemplos de Composición	Principales Aniones	Representación
Básica	<1	3 FeO.SiO ₂ 2 FeO.CaO.SiO ₂	O ²⁻ y SiO ₄ ³⁻	
Neutra	1	2 CaO.SiO ₂ CaO.FeO.SiO ₂	SiO ₄ ⁴⁻	
Acida	>1	4 CaO. 3 SiO ₂ 2 FeO. 2CaO. 3 SiO ₂	Aniones Silicatados en Cadena	
		4(CaO.SiO ₂)	Aniones Silicatados en Anillos	
		3(CaO. 2 SiO ₂)	Anillos Silicatados en anillos unidos	

observar la viscosidad de estas escorias es de 11.3 P, y como expresamos líneas arriba se trata de escorias con relativa baja viscosidad.

3.2.2 Pérdidas de Cobre en Escorias de Fusión

3.2.2.1 Efecto del Grado de Mata

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, las pérdidas de cobre en las escorias se incrementan con el grado de mata, de acuerdo a la gradiente de 0.013. Esta curva experimental, tomada de escorias de fusión de diversas fundiciones a nivel mundial, representa en una forma muy acertada de comparar las escorias producidas en la Fundición de Ilo. La gradiente encontrada para una operación típica de la fundición es de 0.015.

Tomando en cuenta escorias formadas por diversos concentrados fundidos en la Fundición de Ilo, nos dan pendientes entre 0.011 y 0.016, viéndose de esta manera la confiabilidad de ésta curva experimental.

3.2.2.2 Efecto de la Composición de las Escorias

La composición de las escorias, tiene fundamental importancia en las pérdidas de cobre en éstas. Teniendo en cuenta los estudios realizados por el metalurgista Vanyukov, se pueden caracterizar a las escorias de la Fundición de Ilo mediante la siguiente relación [11]:

$$B_s = \frac{\text{wt\% FeO} + 0.25 \text{ wt\% CaO}}{\text{wt\% SiO}_2 + 0.40 \text{ wt\% Al}_2\text{O}_3}$$

Siendo wt%M_xO_y el porcentaje en peso del óxido en mención.

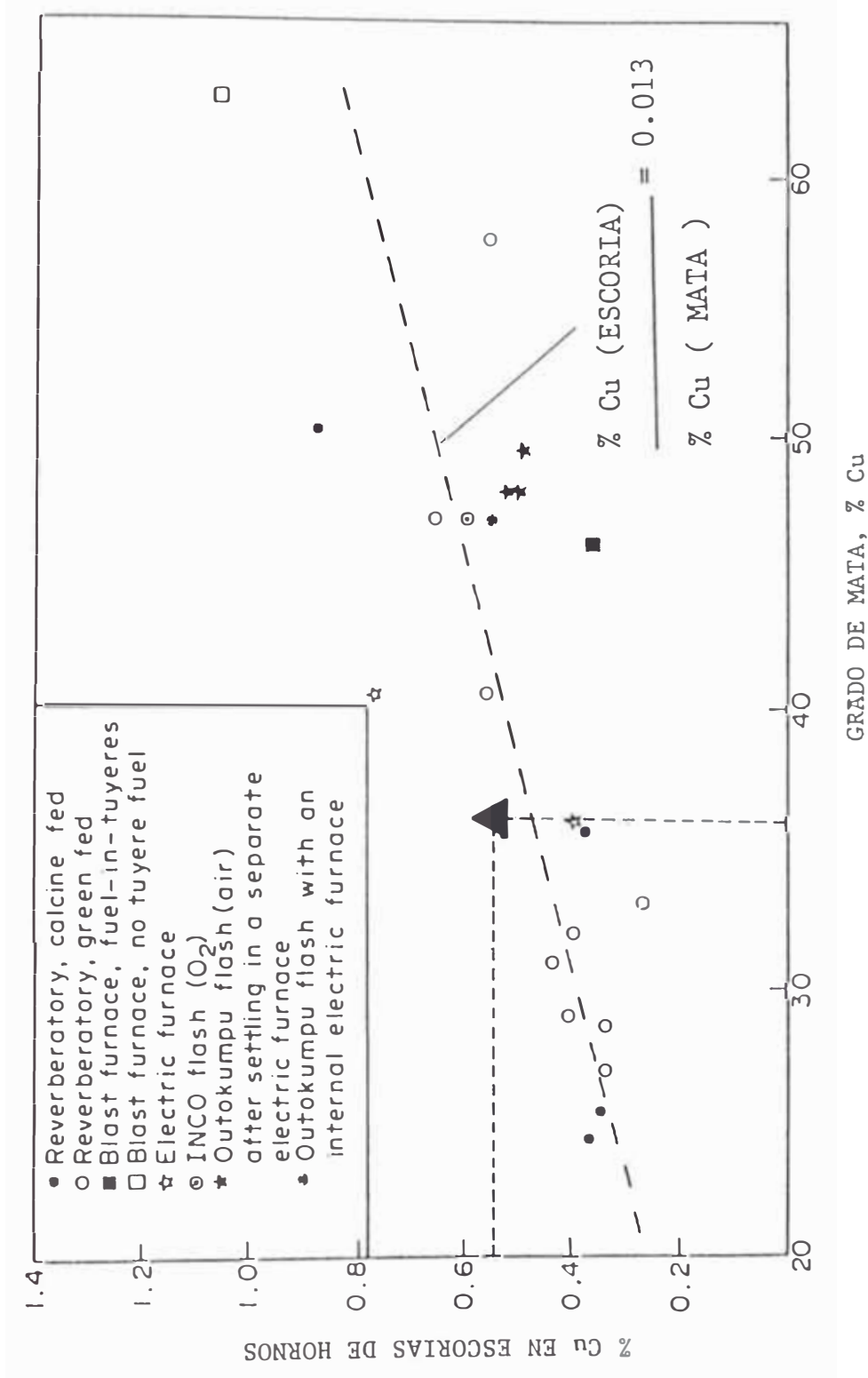


Figura 3.5 Concentración de cobre en escorias de hornos de fusión como función del Grado de Mata

La expresión anterior es el Índice de Basicidad, el cual muestra el efecto del CaO y Al₂O₃ en las escorias de fusión. Las pérdidas de cobre pueden ser expresadas por la relación siguiente:

$$L(s/m) = \frac{\%Cu_{esc.}}{\%Cu_{mata}} \times 100 = 1.3 Bs$$

Donde L(s/m) es el coeficiente de distribución de cobre entre escoria y mata.

En la Tabla 3.3, se muestran cálculos realizados para escorias de fusión de la Fundición de Ilo, tomando en cuenta diferentes tipos de concentrados fundidos. Como se puede apreciar, el efecto de la composición tiene gran importancia en las pérdidas de cobre.

Si tomamos como base la relación típica L(s/m) igual a 1.4 (calculada de la ecuación de Vanyukov), se esperan pérdidas altas de cobre en escorias para la fusión de concentrados que producen matas de alto grado. El valor obtenido de pérdida de cobre para el concentrado de C. Dominador muestra un valor alto, el cual es esperado; teniendo en cuenta la similitud entre los análisis de esta escoria con una escoria típica de la fundición. Pero no se nota el mismo comportamiento en las escorias de fusión de concentrado de Pelambres. Como se puede apreciar, las pérdidas de cobre son casi similares a las típicas, esto se debe fundamentalmente al fuerte efecto causado por los óxidos de fierro y aluminio (FeO, Al₂O₃) y con menos fuerza al efecto del óxido de silicio (SiO₂). Un incremento en la composición de Al₂O₃, y una fuerte baja en la composición de FeO, originan una disminución del índice de basicidad con respecto al normalmente encontrado en la fundición, lo cual origina que a pesar del alto grado

Tabla 3.3 Características de Escoria de Fusión para diferentes concentrados

Escorias	Cuaj. Toq.	C. Dominador	Concentrados		Los Bronces
			Pelambres	Pelambres	
%Cu	0.55	0.76	0.58	0.60	0.48
%FeO	38.88	38.10	32.60	34.78	38.85
%Fe ₃ O ₄	8.05	8.90	6.20	8.53	6.70
%SiO ₂	33.70	32.10	35.10	33.67	33.80
%CaO	5.10	6.40	6.90	6.07	4.40
%Al ₂ O ₃	7.44	7.80	10.20	9.60	8.65
Grado Mata	35.66	46.13	48.66	45.93	38.24
Kv	1.3	1.3	1.0	1.1	1.2
Bs	1.1	1.1	0.9	1.0	1.1
L(s/m) teor.	1.4	1.5	1.1	1.3	1.4
L(s/m) real	1.6	1.7	1.2	1.3	1.3
GS	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9

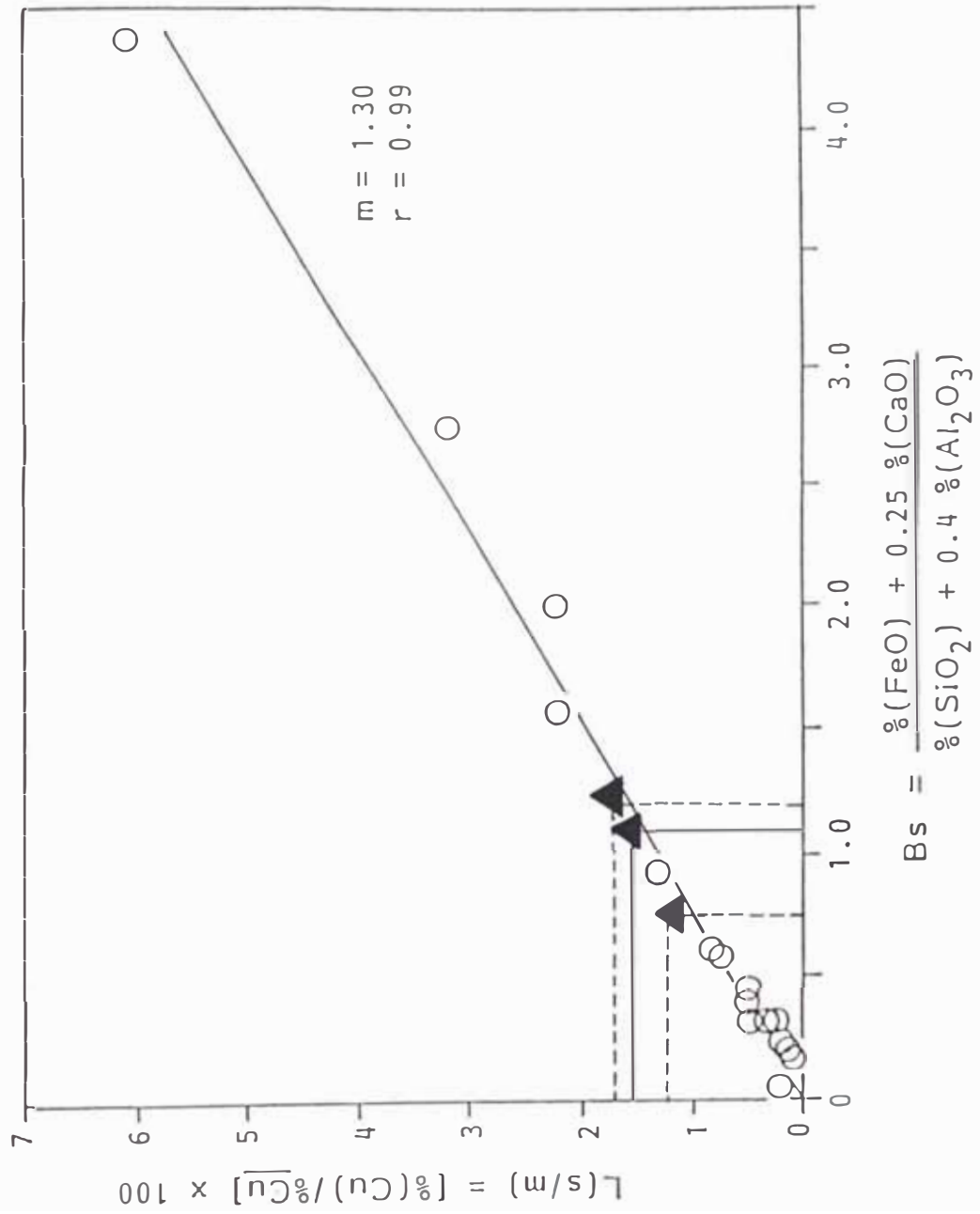


Figura 3.6 Pérdidas de cobre en escorias de hornos de fusión . Efecto del CaO y Al₂O₃

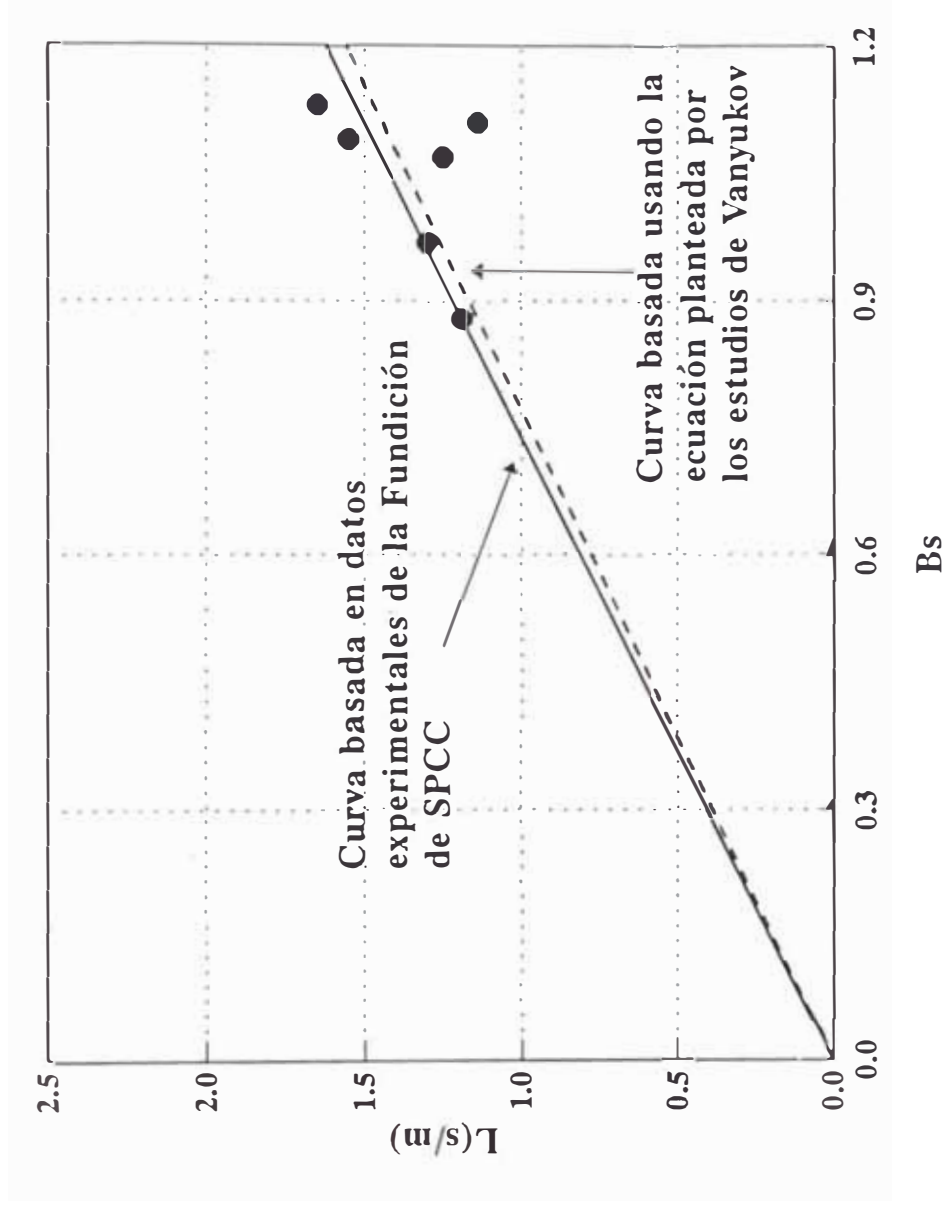


Figura 3.7 Variación del Índice de Basicidad con la relación $L(s/m)$ en escorias de fusión para diferentes concentrados

de mata (48.66 %Cu) el porcentaje de cobre en las escorias mantenga un nivel bajo. En Figura 3.6, se muestran gráficamente los puntos anteriormente calculados.

En la Figura 3.7, se ve con mayor claridad la gran similitud de las curvas que relacionan el índice de basicidad y el coeficiente de distribución, lo cual nos permite confiar en los resultados obtenidos mediante la ecuación planteada.

3.3 Caracterización de las Escorias de Convertidor

Las escorias de conversión están formadas básicamente por óxidos y silicatos de hierro y alúmina. En la Tabla 3.4, se muestran análisis típicos de escorias de conversión de la Fundición de Ilo.

Tabla 3.4 Análisis Químico característico de las Escorias de Conversión

%Cu	%Fe	%FeO	<u>%Fe₃O₄</u>	<u>%SiO₂</u>	<u>%Al₂O₃</u>
2.75	46.22	37.38	23.18	26.25	5.52

La Tabla 3.5, se muestran las más importantes características de escorias de conversión, formadas a partir de matas de diferentes concentrados fundidos.

3.3.1 Físico-Química de las Escorias de Conversión

3.3.1.1 Sistema Ternarios

En la Figura 3.8, se puede apreciar que las escorias de conversión se encuentran dentro de la zona de magnetita, muy cerca de la línea de saturación con sílica, a una temperatura que varía entre los 1200 a 1300 °C.

3.3.1.2 Propiedades Físicas

Usando las expresiones planteadas para escorias de reverbero, se han calculado los módulos de viscosidad y grado de silicatación para las escorias de conversión, cuyos valores son 1.9 y 0.8 respectivamente. Con el uso de la Figura 3.3, se pudo calcular la viscosidad de éstas igual a 1.8 P; es decir, las escorias de conversión son bastante menos viscosas que las escorias de fusión.

3.3.2 Pérdidas de Cobre en Escorias de Conversión

Las escorias de conversión presentan entre 2 - 15 % de cobre; lo cual indica que las escorias de conversión deben ser tratadas posteriormente para la recuperación del cobre contenido en éstas.

3.3.2.1 Efecto de la Viscosidad

La violenta agitación de la mata y escoria dentro del convertidor originan un atrapamiento de mata dentro de la escoria; especialmente si ésta es más viscosa. Como se puede apreciar en la Figura 3.9 (la cual fue obtenida a partir de los datos de la Tabla 3.5), las pérdidas de cobre en las escorias de conversión tiene una relación inversa con el módulo de viscosidad de éstas; es decir, un aumento del módulo, lo cual implica una disminución en la viscosidad (Figura 3.3), origina una disminución del contenido de cobre en las escorias.

3.3.2.2 Química de las Escorias

El control de la química en las escorias siempre ha tenido una vital importancia en la optimización de las operaciones de conversión; esto es, la

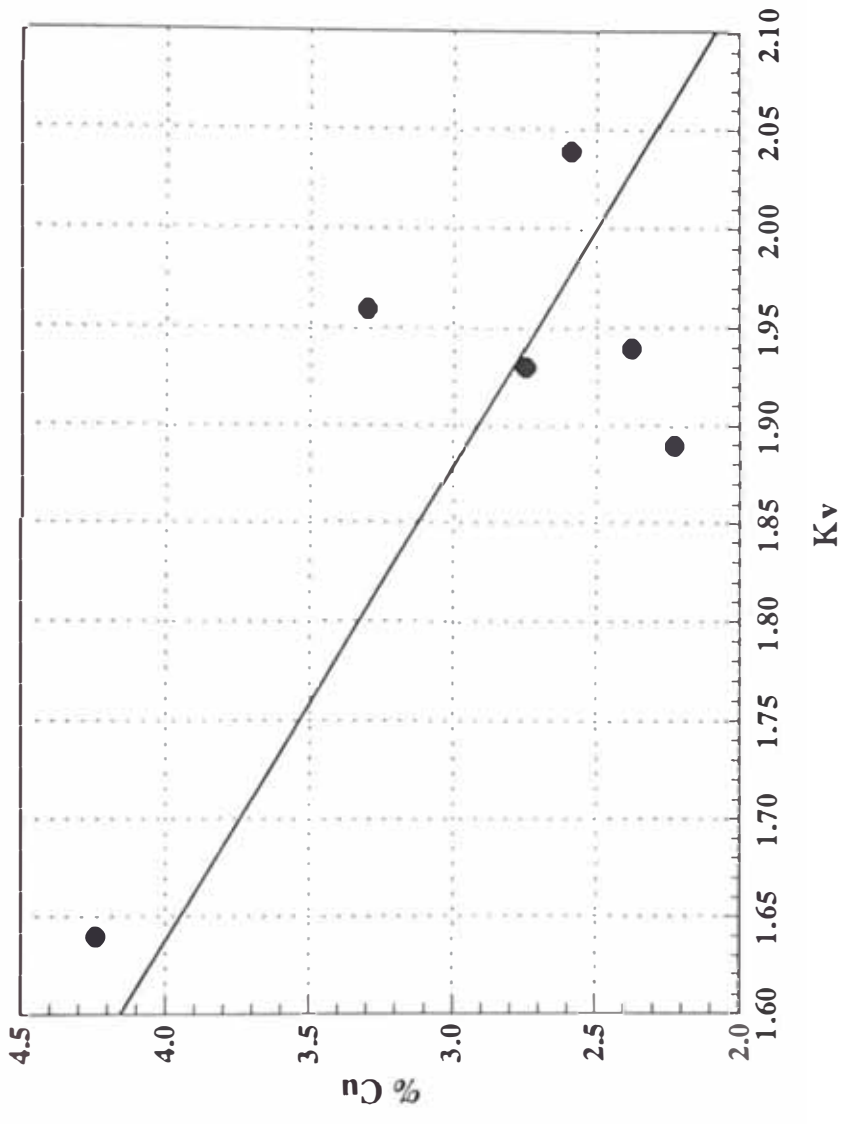


Figura 3.9 Variación del %Cu en escorias de conversión con respecto al Modulo de Viscosidad

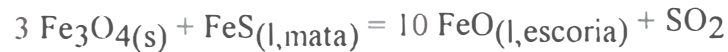
generación de una escoria adecuada, la cual involucre las menores pérdidas de cobre posible.

Como se puede apreciar a la Figura 3.10, la relación FeO/SiO_2 tiene cierta importancia en las pérdidas de cobre dentro de las escorias. A partir de datos de muchas fundiciones a nivel mundial, se puede notar que las menores pérdidas de cobre se registran a una relación entre 1.9 - 2.0, este rango de composición se encuentra entre la saturación con sílica y el inicio de formación de fayalita. La relación encontrada para una operación normal de la Fundición de Ilo es igual a 1.5; es decir, se encuentran en una zona alejada de la zona fayalítica; pero muy cerca de la curva de saturación con sílica (esto también se puede notar en la Figura 3.8). La Figura 3.11, muestra la relación entre las pérdidas de cobre y la relación FeO/SiO_2 , datos obtenidos a partir de la Tabla 3.5. Se puede apreciar claramente conceptos anteriormente definidos, un incremento en la relación involucra menores pérdidas de cobre en escorias.

Como se mencionó líneas arriba, un incremento en la viscosidad involucra mayores pérdidas de cobre; analizando la ecuación del módulo de viscosidad, se puede apreciar que éste está directamente relacionado con el contenido de óxido de hierro y magnetita, e inversamente relacionado con el contenido de sílica. Un incremento en la formación de magnetita, involucra una disminución del contenido de FeO y SiO_2 . Podemos notar que el efecto de la magnetita en las escorias de conversión para el cálculo del módulo de viscosidad es grande; de los datos de la Tabla 3.5, se puede notar que un incremento del contenido de magnetita origina una disminución del módulo de viscosidad; es decir, un aumento de la viscosidad, lo cual se manifiesta con una mayor pérdida de cobre en las escorias, tal como se nota en la Figura 3.12.

3.3.2.3 Efecto de la Sílica

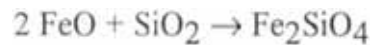
Teniendo en cuenta que la reducción de la magnetita durante la etapa de soplado a escoria viene dada por la ecuación química siguiente:



cuya constante de equilibrio representada por:

$$K = \frac{(a_{\text{FeO}})^{10} p_{\text{SO}_2}}{(a_{\text{Fe}_3\text{O}_4})^3 a_{\text{FeS}}}$$

Mientras que la formación de fayalita viene dada por la reacción:



Se puede apreciar en la ecuación de equilibrio, que la actividad del FeO tiene un gran efecto sobre la constante de equilibrio de la reacción. Un incremento en la concentración de sílica, implicaría una disminución en la actividad del FeO; lo cual se manifiesta en el desplazamiento de la reacción de reducción de la magnetita hacia la derecha, lo cual implica una disminución de la concentración de Fe₃O₄.

En la Tabla 3.6, se puede apreciar que incrementando la concentración de sílica de 64% a 72% en el flux de convertidores, implica una disminución del contenido de magnetita en la escoria de conversión y consecuentemente una menor pérdida de cobre en ésta.

Tabla 3.5 Características de Escoria de Conversión para diferentes concentrados

Escorias	Cuaj. Toq.	C. Dominador	Concentrados		
			Pelambres	Los Bronces	Los Bronces
%Cu	2.75	4.24	2.38	3.30	2.23
%Fe	46.22	44.93	47.27	45.31	46.00
%FeO	37.88	29.00	41.53	35.76	41.28
%Fe ₃ O ₄	23.18	30.95	20.67	24.19	19.23
%SiO ₂	26.25	29.97	25.67	24.09	25.41
FeO/SiO ₂	1.5	1.0	1.6	1.5	1.6
Kv	1.9	1.6	1.9	2.0	1.9
GS	0.8	1.2	0.7	0.8	0.7
Grada Mata	35.66	46.13	48.66	45.93	38.24
					38.71

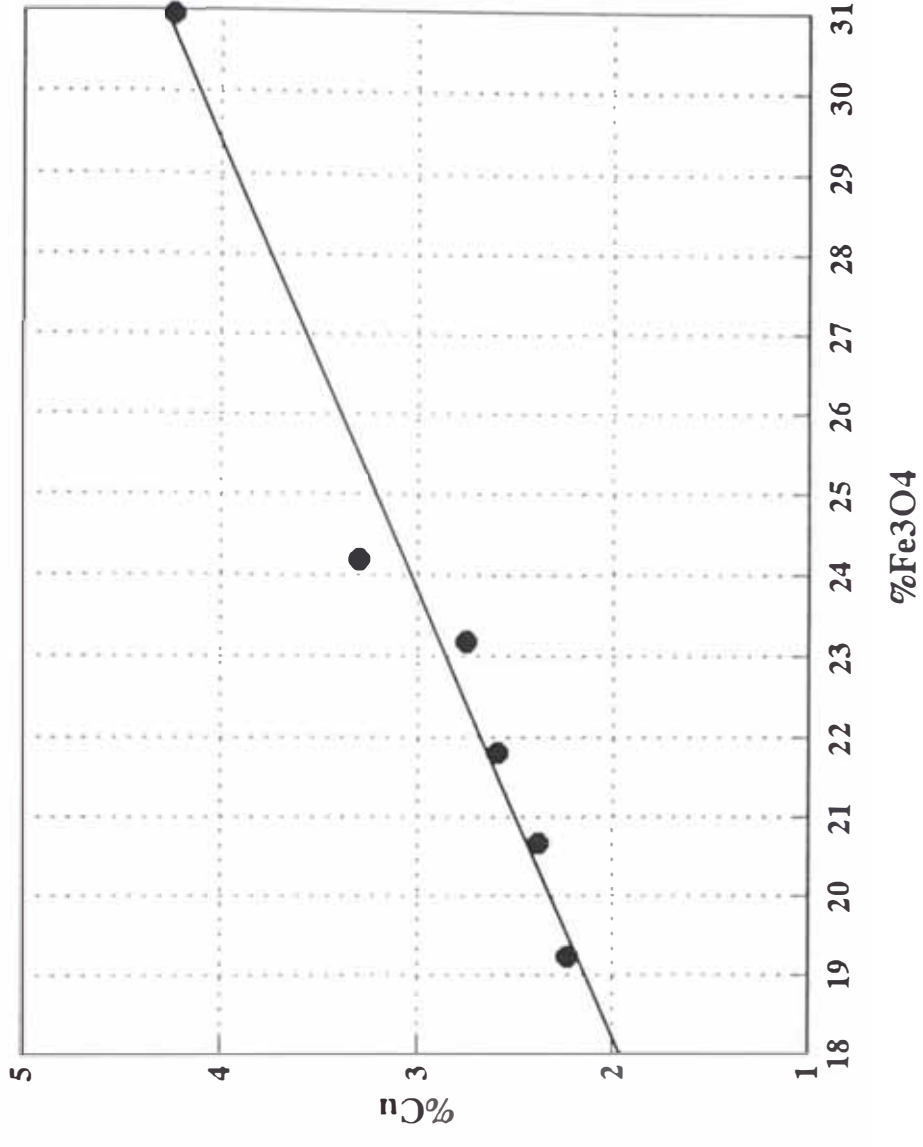


Figura 3.12 Variación del %Cu en escorias de conversión con respecto al %Fe₃O₄

Tabla 3.6 Efecto del cambio de porcentaje de Sílica en Flux de Convertidor para Escorias de Conversión

	Flux 64% SiO_2	Flux 72% SiO_2
%Cu	4.53	2.75
%Fe	46.41	46.22
%FeO	33.48	37.88
%Fe ₃ O ₄	28.20	23.18
%SiO ₂	23.11	26.25
%Al ₂ O ₃	6.09	5.52
FeO/SiO ₂	1.45	1.45
Kv	2.11	1.93
GS	0.83	0.83

3.3.2.4 Efecto del Grado de Silicatación

El grado de silicatación tiene un efecto directo con las pérdidas de cobre en las escorias de conversión. Como se puede apreciar en la Figura 3.13, un incremento en el grado de silicatación se manifiesta con un incremento en las pérdidas de cobre. Esto se explica teniendo en cuenta la clasificación de las escorias de acuerdo a la Tabla 3.2. Un incremento del grado de silicatación, implica una tendencia a la formación de escorias ácidas, las cuales se caracterizan por estar formadas de anillos y cadenas silicatadas complejas; lo cual ayudaría a un mayor atrapamiento de cobre en las escorias. Mientras que un grado de silicatación pequeño, tiende a la formación de escorias básicas, las cuales se caracterizan por estar formadas por iones sencillos.

3.4 Caracterización de las Propiedades de las Escorias en el Proceso Futuro

La composición de las escorias tanto de hornos reverberos, convertidores así como del CMT son mostrados en la Tabla 3.7.

Estos resultados son obtenidos a partir de la aplicación del modelo planteado en el Capítulo II, encontrándose estos resultados en un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 3.7 Propiedades de las Escorias en el Proceso Futuro

	Escoria Reverbero	Escoria Convertidor Pequeño	Escoria Convertidor Grande	Escoria Convertidor Teniente
%Cu	0.64	2.94	2.75	8.00
%Fe	40.90	50.05	49.76	45.21
%FeO	44.46	41.05	41.51	36.32
%Fe ₃ O ₄	7.84	24.75	23.85	22.15
SiO ₂	35.07	27.46	27.46	24.75
CaO	5.35			0.67
Al ₂ O ₃	5.00	1.34	1.76	3.02
Grado Mata	37.44	37.44	37.44	37.44
Kv	1.4	2.3	2.3	2.1
Bs	1.2			
L(s/m)	1.7			
GS	0.8	0.8	0.8	0.8
FeO/SiO ₂	1.3	1.5	1.5	1.5

3.4.1 Físico-Química de las Escorias

3.4.1.1 Sistemas Ternarios

En cuanto a los hornos reverberos, nos damos cuenta que el rango de operación futuro mantendrá a las escorias de fusión en una zona netamente tridimítica, manifestándose un incremento en los niveles de FeO y SiO₂ y una ligera baja en los niveles de Fe₃O₄.

Las escorias de conversión se mantendrán en los mismos niveles de composición; así, no se observa algún desplazamiento en el sistema FeO-Fe₂O₃-SiO₂; éstas se mantendrán en la zona de magnetita, muy cerca de la curva de saturación con sílica.

En cuanto a las escorias del CMT, éstas presentan más tendencia a la zona fayalítica, esto se debe principalmente al buen control que se debe tener a la formación de Fe₃O₄ dentro del reactor.

En la Figura 3.14, el sistema ternario FeO-Fe₂O₃-SiO₂ nos muestra las diferentes ubicaciones que tienen cada una estas escorias.

3.4.2 Propiedades Físicas

3.4.2.1 Viscosidad de la Escorias

Teniendo en cuenta los análisis químicos de la Tabla 3.7, el módulo de viscosidad para los diferentes tipos de escorias será 1.4, 2.3 y 2.13, para escorias de fusión, conversión y CMT respectivamente.

En la Figura 3.15, se grafican los datos arriba mencionados, encontrándose que la viscosidad para cada tipo de escoria será de 6.6 P para escorias de reverbero, 1.4 P para escorias de convertidor y 1.6 P para escorias de CMT.

En el caso de las escorias de fusión, se puede notar una baja notoria en la viscosidad, esto se debe al incremento del módulo de viscosidad. Este incremento en 0.1 unidades se manifiesta significativamente, debido a la relación exponencial que hay entre el módulo y la viscosidad.

Un aumento en los niveles de FeO y SiO₂ y una disminución en los niveles de Al₂O₃, son causantes directos del incremento del Kv, a pesar de mantener niveles casi constantes en los contenidos de CaO y Fe₃O₄. Es decir, se nota fuertemente los efectos de la sílice y alúmina en las características de esta escoria.

En cuanto a las escorias de conversión, también se nota una disminución en la viscosidad, los niveles de Fe₃O₄ y SiO₂ son similares, mostrando una disminución drástica en los niveles de Al₂O₃ y un aumento en el contenido de FeO; ocasionando un incremento del módulo de viscosidad, y una disminución en la viscosidad de estas escorias. Es decir, aquí se puede apreciar claramente el efecto de la alúmina en las propiedades de las escorias.

La viscosidad de la escoria del Convertidor Modificado Teniente presenta un nivel muy similar a la viscosidad de las escorias de conversión; pero manteniendo una diferencia muy significativa en los niveles de los óxidos que la forman.

3.4.2.2 Grado de Silicatación

Tomando en cuenta los datos de la Tabla 3.7, podemos darnos cuenta que no hay una variación significativa en este parámetro. El incremento en los niveles de FeO van acompañados con incrementos en los niveles de SiO₂, debido fundamentalmente a la estrecha relación que hay entre ambos óxidos. Hay que recordar que la función primordial del dióxido de silicio es el acomplejamiento del óxido de hierro para formar el silicato ferroso (2FeO.SiO₂), así, es de esperar que la relación entre ambos se mantenga casi constante.

3.4.3 Pérdidas de Cobre en Escorias

De acuerdo a la Tabla 3.7, se espera que el porcentaje de cobre en las escorias de fusión sea de 0.64 (0.09 unidades más que en el proceso actual); esto se debe fundamentalmente a dos factores: (1) un incremento en el grado de mata, y (2) un incremento en el índice de basicidad.

El efecto conjunto del incremento de los niveles de FeO y SiO₂ y la baja en los niveles de Al₂O₃, han originado una elevación en el índice de basicidad de las escorias, lo cual se manifiesta con un incremento en el coeficiente de distribución de cobre en mata y escoria, L(s/m).

El efecto líneas arriba mencionado, se relaciona íntimamente con el efecto del grado de mata. Un incremento del grado de mata a 37.44 es esperado; así, teniendo en cuenta el incremento en el coeficiente de distribución de cobre, han originado en forma conjunta el incremento del porcentaje de cobre en las escorias de fusión para el proceso futuro.

Para el caso de escorias de conversión, no se esperan cambios en los niveles de pérdidas de cobre, manteniéndose estas dentro de los rangos actuales de operación.

Una serie de factores se conjugan para así llegar a estos resultados. Como se pudo apreciar en la caracterización de las escorias del proceso actual, los efectos de la viscosidad y el contenido de magnetita en las escorias de conversión, tienen gran importancia en las pérdidas de cobre a través de éstas. Los efectos contrarios de una baja de la viscosidad (lo que originaría una baja en las pérdidas de cobre) y un incremento en los niveles de magnetita (lo que originaría un incremento de las

pérdidas) han dado como resultado mantener casi los mismos niveles de cobre en las escorias de conversión.

La relación FeO/SiO_2 y el grado de silicatación, se mantienen en los mismos niveles; dando así mayor fuerza a los resultados obtenidos.

En cuanto a la escoria del CMT, no hay parámetros de comparación; los niveles de cobre dentro de sus escorias se deben fundamentalmente a atrapamientos mecánicos de sulfuro de cobre dentro de éstas. Mayor conocimiento e información al respecto, se podrá obtener una vez el reactor entre en operación. Los niveles de pérdida de cobre, han sido calculados teniendo en cuenta datos proporcionados por los estudios metalúrgicos efectuados para la implementación de esta nueva tecnología dentro del esquema actual de la Fundición de Ilo.

CAPITULO IV

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE ESCORIAS

4.1 Introducción

Como se observó en el Capítulo III, un incremento en las pérdidas de cobre en las escorias de reverbero es esperado cuando se ponga en operación el Convertidor Modificado Teniente. Debido al alto contenido de cobre en las escorias del CMT, y además el incremento del volumen de escorias retornadas al horno, darán como resultado el problema líneas arriba mencionado.

Pues bien, partiendo de esta premisa en el presente capítulo se dará una salida alternativa de tratamiento a estas escorias, de modo se reduzca al mínimo las pérdidas de cobre en las escorias de reverbero, así como también cual será el impacto de este tratamiento en el proceso productivo futuro.

4.2 Efecto del Tratamiento de Escorias del CMT sobre el Proceso

La idea fundamental es ver los efectos que causaría sobre el proceso productivo, el no retornar escoria de CMT a los hornos reverberos.

Los puntos más importantes en este estudio han sido: (1) Mantener los mismos niveles de dióxido de silicio en las escorias de reverbero, (2) mantener un balance térmico dentro del horno; de modo mantener los mismos niveles de temperatura de mata y escoria, y (3) buscar los niveles más bajos de contenido de cobre de las escorias de reverbero.

Mediante el uso del modelo planteado en el Capítulo II, se pudo realizar las simulaciones respectivas, viendo los efectos causados en las propiedades de los productos fundidos, dejando de retornar escorias de CMT a los hornos reverberos dentro de un rango de trabajo de 0 a 100 % de no retorno.

Los resultados más importantes se enumeran a continuación:

- ◆ Una disminución en el contenido de cobre en las escorias de reverbero.
- ◆ Una disminución en el volumen de escorias de reverberos producida.
- ◆ Una disminución del grado de mata.
- ◆ Un incremento en la producción de mata.
- ◆ Un incremento en la capacidad de fusión.
- ◆ Una disminución en la cantidad de sílica en la mezcla de concentrados en camas.

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, se pueden apreciar en forma clara los resultados arriba mencionados.

Por lo tanto, el tratar las escorias del CMT mediante otro método evitando el retorno de éstas a los hornos reverberos es factible; mostrando varios beneficios, siendo los más importantes el aumento de la capacidad de fusión y la disminución de las pérdidas de cobre en las escorias de reverbero.

En la Tabla 4.1, se muestran los resultados de las pruebas de simulación realizadas.

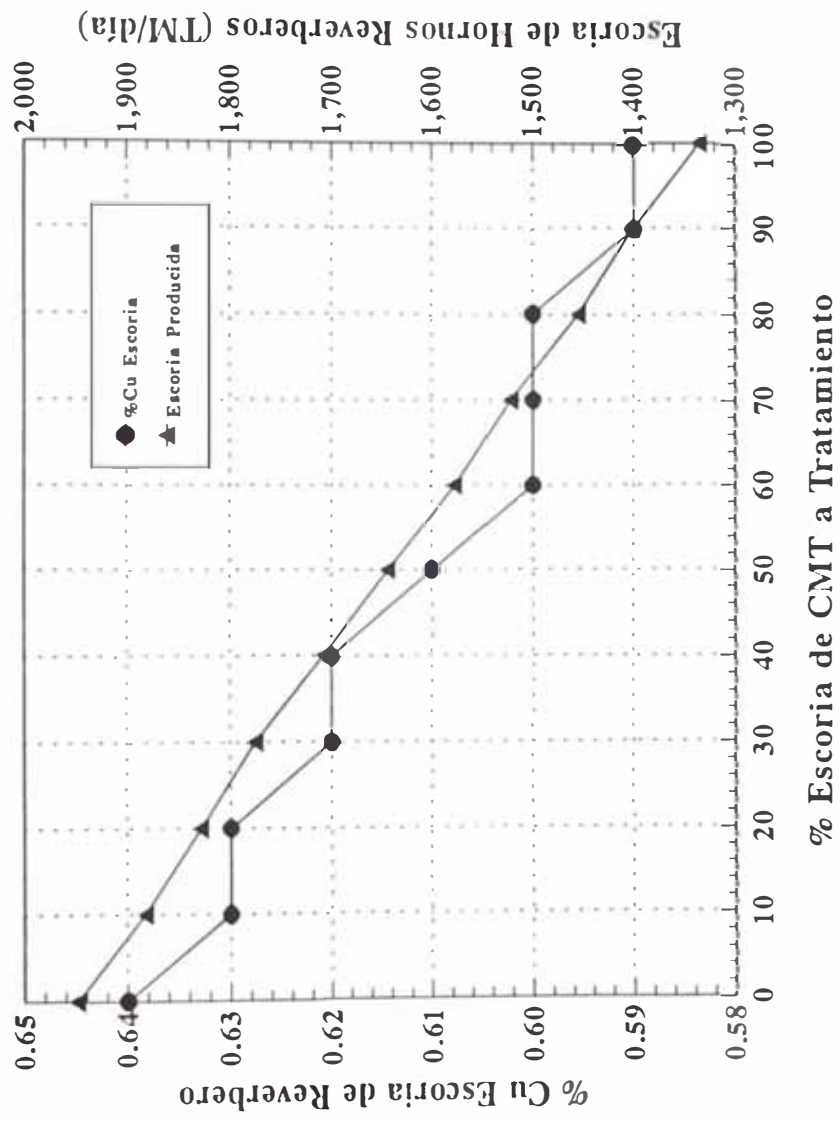


Figura 4.1 Variación del contenido de cobre en escoria de fusión y cantidad de escoria de fusión formada con respecto al porcentaje del escoria de CMT tratada

Tabla 4.1 Efectos del no retorno de Escorias de CMT a Hornos Reverberos

% Escoria de CMT a Tratamiento	%Cu en Escoria de Reverbero	Escoria de Reverbero (TM/día)	Grado de Mata	Mata de Reverbero (TM/día)	Concentrado Fundido en Hornos TM/día	Silica en Camas (TM/día)
	0.64	1,949	37.44	1,807	2,114	147
10	0.63	1,883	37.30	1,813	2,132	139
20	0.63	1,829	37.18	1,831	2,168	132
30	0.62	1,776	37.07	1,849	2,205	126
40	0.62	1,709	36.95	1,852	2,223	118
50	0.61	1,644	36.85	1,854	2,241	112
60	0.60	1,577	36.76	1,856	2,259	104
70	0.60	1,522	36.70	1,871	2,295	99
80	0.60	1,455	36.65	1,871	2,313	93
90	0.59	1,401	36.62	1,883	2,350	87
100	0.59	1,335	36.60	1,882	2,368	82

4.3 Técnicas de Tratamiento de Escorias

Para el tratamiento de escorias de CMT se tienen dos alternativas bien definidas: (1) Tratamiento mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas, y (2) tratamiento mediante flotación.

4.3.1 Técnicas Pirometalúrgicas

El tratamiento de escorias mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas radica en los siguientes aspectos [1][13]: (1) Reducir significativamente el contenido de magnetita en la escoria, de modo permitir una reducción de la viscosidad y una mejor sedimentación de las partículas de cobre atrapadas (Cu, Cu₂S), (2) buscar una disminución en el contenido de óxidos de cobre, permitiendo así una disminución del contenido de cobre dentro de la escoria de descarte, (3) mantener

niveles de SiO_2 sobre el 30% en escoria final; para asegurarse una efectiva separación de metal y escoria, y una reducción en la actividad del FeO facilitando la reducción de la magnetita, (4) tomar el tiempo necesario para que las partículas de cobre puedan nuclear, crecer y producir una efectiva separación de fases, y (5) mantener una elevada temperatura, lo cual induce a una rápida reacción entre el FeO y el SiO_2 para formar fayalita; incrementando la solubilidad de magnetita sólida en la escoria.

Basados en la experiencia de la Fundición de Potrerillos, Codelco, Chile, se han tomado los datos obtenidos en sus pruebas experimentales para poder hacer una predicción de lo que ocurriría con el tratamiento de las escorias de CMT de la Fundición de Ilo (ver Apéndice C).

Los análisis de las escorias de CMT tratadas pirometalúrgicamente en la Fundición de Potrerillos se muestran en la Tabla 4.2, notándose gran similitud con los análisis de las escorias de CMT esperado para la Fundición de Ilo.

Tabla 4.2 Análisis Químicos de Escorias de CMT

Escorias	%Cu	% SiO_2	%Fe	% Fe_3O_4
CMT Fund. Potrerillos	8.00	25.00	47.00	20.00
CMT Fund. Ilo	8.00	24.75	45.21	22.15

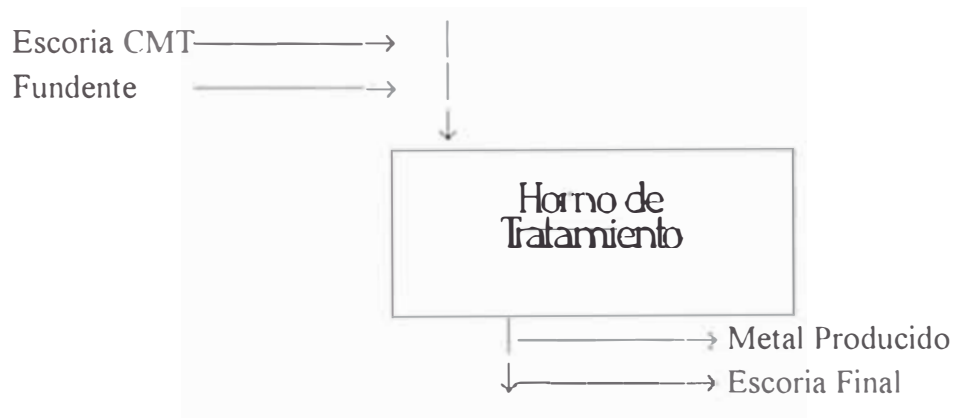
El proceso desarrollado en la Fundición de Potrerillos, fue llevado a cabo en un Convertidor Peirce-Smith de $4\text{m} \times 9\text{m}$ (similar a los convertidores que serán puestos fuera de operación en el proceso futuro de la Fundición de Ilo), el tiempo

total de ciclo (desde el inicio de la carga hasta el vaciado de productos) fue de aproximadamente 5 horas, obteniendo una recuperación de cobre 91%.

Las pruebas realizadas dieron como resultado que el proceso de tratamiento de escorias vía pirometalurgia en hornos tipo basculantes (convertidores) es técnicamente factible.

Así, dada la similitud de las escorias de ambos Convertidores Tenientes, se hará una predicción del panorama operativo en la Fundición de Ilo, basándonos en los resultados obtenidos en la Fundición de Potrerillos.

4.3.1.1 Balance de Materia



Para el balance de materia se han tomado las siguientes asunciones:

- ◆ Obtener un metal con un contenido de cobre del 60%.
- ◆ Obtener una escoria final con un contenido de cobre del 0.8%.
- ◆ Un contenido de 30% de SiO_2 en escoria final.

En la Tabla 4.3, se muestran los análisis químicos de los productos tratados. En la Tabla 4.4, se muestran los tonelajes obtenidos para un tratamiento de escorias que varía del 0 al 100% (ver Apéndice D).

En las Tablas 4.5 y 4.6, se muestran balances de cobre y sílica para la fundición, en función al porcentaje de escoria enviada a tratamiento. De dichas tablas se puede concluir:

1. Un incremento en la cantidad de cobre producido.
2. Una reducción de las pérdidas de cobre en las escorias de fusión.
3. Un incremento en otras pérdidas de cobre.
4. Se mantiene constante la pérdidas globales de cobre.
5. Un ahorro en el consumo de fundentes (sílica).

4.3.1.2 Especificaciones de Tratamiento

El tratamiento tiene por finalidad la reducción de especies oxidadas para la liberación del cobre atrapado. La reducción se realiza usando petróleo residual No.6, siendo los consumos unitarios los siguientes:

Petróleo Quemador	0.01384	m ³ /TM de escoria
Petróleo Reducción	0.00791	m ³ /TM de escoria

Estos consumos unitarios son el resultado de las pruebas realizadas en la Fundición de Potrerillos.

En la Tabla 4.7, se muestran los consumos de petróleo en función a la cantidad de escoria tratada mediante este método.

Tabla 4.3 Análisis Químicos de Carga y Productos en Tratamiento Pirometalúrgico de escoria de CMT

	%Cu	%SiO ₂	%Fe	%Fe ₃ O ₄
Escoria de Teniente	8.00	24.75	45.21	22.15
Escoria Final	0.80	30.00	44.00	5.00
Metal Producido	60.00	-	15.00	4.00
Fundente	-	89.92		

Tabla 4.4 Balance de Materia de Tratamiento Pirometalúrgico de escoria de CMT como función del porcentaje tratado

	(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Escoria a Tratamiento	(TM/día)	0	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
Escoria Final	(TM/día)	0	72	145	217	290	362	435	507	579	652	724
Metal Producido	(TM/día)	0	10	19	29	39	48	58	68	78	87	97
Fundente	(TM/día)	0	2	4	6	9	11	13	15	17	19	22

Tabla 4.5 Balance de Cobre en función al porcentaje de escoria de CMT enviada Tratamiento Pirometalúrgico

Escoria a Tratamiento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Concentrado Fundido (TM Cu/día)	817	823	834	844	849	855	859	870	875	885	891
Cobre Blister (TM Cu/día)	797	802	813	823	828	834	838	849	852	864	869
Pérdidas en Escoria (TM Cu/día)	13	12	12	11	11	10	10	9	9	8	8
Otras Pérdidas * (TM Cu/día)	8	9	9	10	10	11	11	12	13	13	14
Recuperación (%)	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.6	97.6	97.5	97.6	97.5

(*) Incluye las pérdidas en polvos más las pérdidas en el proceso de tratamiento pirometalúrgico

Tabla 4.6 Balance de Silica en función al porcentaje de escoria de CMT enviada Tratamiento Pirometalúrgico

Escoria a Tratamiento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Camas (TM/día)	147	139	132	126	118	112	104	99	93	87	82
Convertidores (TM/día)	259	261	266	270	272	273	274	278	278	280	279
CMT (TM/día)	181	181	181	181	181	181	181	181	181	181	181
Trat. Pirometalúrgico (TM/día)	0	2	4	6	9	11	13	15	17	19	22
Total (TM/día)	587	583	583	583	580	576	572	572	567	566	562

Tabla 4.7 Consumo de Petróleo Residual No.6 en Tratamiento Pirometalúrgico de escoria de CMT

Escoria a Tratamiento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Petróleo Quemador (m3/día)	0.0	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.9	10.0	11.1
Petróleo Reducción (m3/día)	0.0	0.6	1.3	1.9	2.5	3.2	3.8	4.4	5.1	5.7	6.3
Total (m3/día)	0.0	1.7	3.5	5.2	7.0	8.7	10.4	12.2	13.9	15.7	17.4

Para el tratamiento de escorias, se usarán los convertidores que serán puestos fuera de operación. La capacidad de tratamiento de cada uno es de 99 TM por ciclo (trabajando a su máxima capacidad). Teniendo en cuenta que cada ciclo de tratamiento dura aproximadamente 5 horas, cada reactor tendrá una capacidad de 4.8 ciclos por día; lo que equivale a una capacidad diaria de tratamiento de 475 TM de escoria de CMT. Los dos reactores tienen una capacidad conjunta de tratamiento de 950 TM de escoria de CMT, por lo cual la capacidad instalada de los reactores cubrirá largamente los requerimientos de tratamiento. Por lo tanto no será necesario la implementación de un nuevo reactor, por lo que los costos de inversión serán mínimos, sólo será necesario el acoplamiento de 4 inyectores de petróleo y un quemador por cada reactor, los cuales están a disposición actual por motivos operativos; además será necesario la modificación de la boca del convertidor y la campana extractora de gases. Cada reactor cuenta con su propio sistema de alimentación de sílica y sus propias líneas de abastecimiento de petróleo residual, ambos reactores cuentan además con su propio sistema de aire de soplado, por lo tanto tampoco será necesario inversión en equipos auxiliares.

4.3.2 Flotación de Escorias

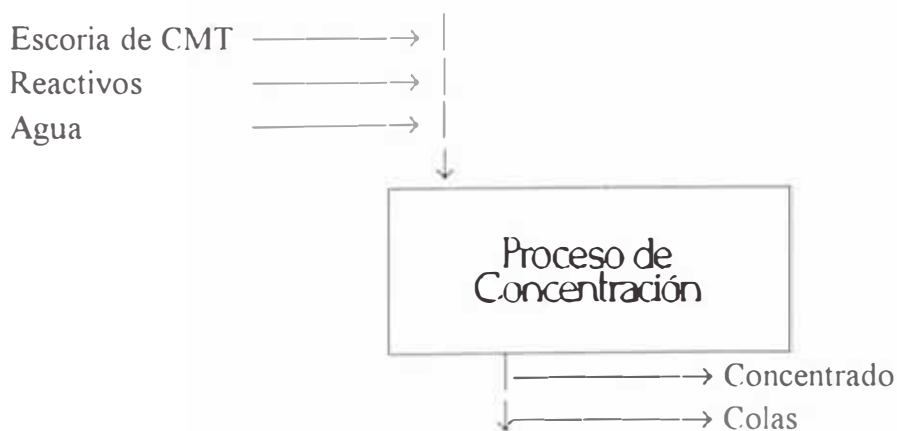
El tratamiento de escorias por flotación, radica en los siguientes aspectos: (1) La reducción del tamaño de partícula al tamaño adecuado, para poder liberar la cantidad de cobre atrapado en las escorias, (2) la alcalinidad del medio, buscando el pH adecuado para obtener la máxima recuperación posible, y (3) el tipo de agua, ya sea realizar la flotación con agua fresca o con agua de mar.

Pruebas de flotación realizadas en la Concentradora de Toquepala arrojan un grado de recuperación de cobre del 76%, siendo las conclusiones más importantes las siguientes:

- ◆ La flotación de escorias es un método técnicamente factible de concentración de cobre, ya sea usando agua fresca o de mar.
- ◆ Los niveles más altos de recuperación alcanzados fueron del 78%, siendo el porcentaje promedio de recuperación del 76%.
- ◆ Se obtuvo un concentrado del cobre de una ley del 30%, y productos de cola con un contenido de cobre del 0.7%.

Así, la concentración de cobre por medio de flotación puede ser otra alternativa técnicamente factible para la recuperación de cobre de las escorias de CMT.

4.3.2.1 Balance de Materia



Para el balance de materia se han tomado las siguientes asunciones:

- ◆ Obtener un concentrado con un contenido de cobre del 30%.
- ◆ Obtener colas con un contenido de cobre del 0.7.

La Tabla 4.8, muestra los balances y tonelajes de concentrado obtenido para un tratamiento de escorias de CMT que varía de 0 al 100% (ver Apéndice D). La Tabla 4.9, muestra el balance de cobre para la fundición; donde se puede concluir en:

1. Un incremento en la cantidad de cobre producido.
2. Una reducción en la cantidad de cobre perdido en escorias de fusión.
3. Un incremento en otras pérdidas de cobre.
4. Un incremento en las pérdidas globales de cobre, lo que se manifiesta en la disminución del porcentaje de recuperación.

Como se podrá apreciar, a pesar que el método de recuperación de cobre es técnicamente factible, operativamente causará un incremento drástico en el porcentaje de pérdidas de cobre, lo cual sobrepasa los límites permitidos que son del orden del 2.5%.

4.4 Comparación de Métodos de Tratamiento

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en ambos balances de cobre (ver Tablas 4.5 y 4.9), es claro notar que mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas los beneficios productivos en la Fundición de Ilo serán largamente mayores a aquellos obtenidos mediante flotación, además de tener en cuenta que el proceso de tratamiento por medio de flotación requerirá un costo de inversión, dado que

será necesario la implementación de una concentradora para poder realizar el tratamiento respectivo. Así, el método elegido será el Tratamiento Pirometalúrgico, dada sus amplias ventajas en comparación a la flotación de escorias

Tabla 4.8 Balance de Materia de Tratamiento por Flotación de escoria de CMT como función del porcentaje tratado

	(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Escoria a Tratamiento	(TM/día)	0	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
Concentrado	(TM/día)	0	16	32	49	65	81	97	113	130	146	162
Colas	(TM/día)	0	236	473	709	945	1,182	1,418	1,654	1,890	2,127	2,363
<u>Agua</u>	(TM/día)	0	173	345	518	690	863	1,035	1,208	1,380	1,553	1,725

Tabla 4.9 Balance de Cobre en función al porcentaje de escoria de CMT enviada a Flotación

Escoria a Tratamiento	(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Concentrado Fundido	(TM Cu/día)	817	818	823	829	829	830	830	836	836	842	843
Cobre Blister	(TM Cu/día)	797	797	800	805	804	804	803	808	807	812	812
Pérdidas en Escoria	(TM Cu/día)	13	12	12	11	11	10	10	9	9	8	8
Otras Pérdidas *	(TM Cu/día)	8	10	11	13	14	16	17	19	20	22	23
<u>Recuperación</u>	(%)	97.6	97.4	97.2	97.1	97.0	96.9	96.7	96.7	96.5	96.5	96.3

(*) Incluye las pérdidas en polvos más las pérdidas en el proceso de tratamiento

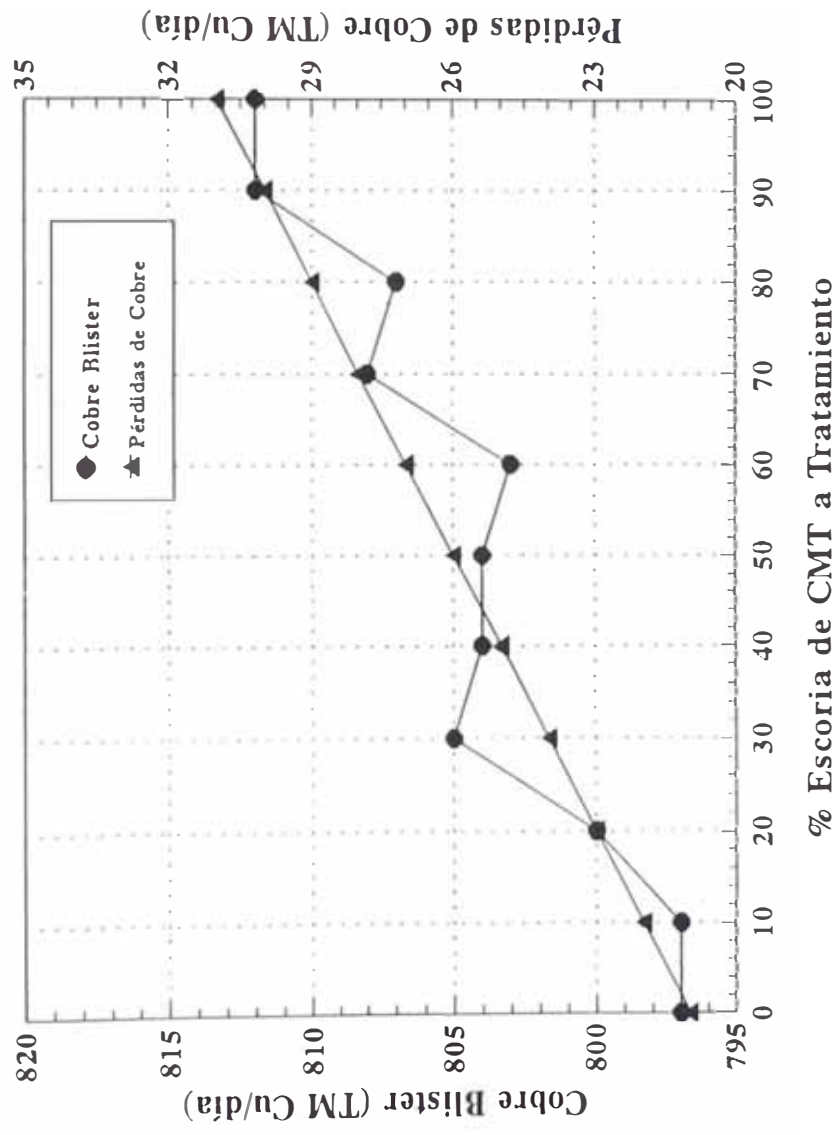


Figura 4.5 Variación de la Producción de Cobre y Pérdidas de Cobre con respecto al porcentaje de escoria de CMT tratada por Flotación

CAPITULO V

EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1 Introducción

Teniendo en cuenta los análisis efectuados en el Capítulo IV; la implementación de un sistema de recuperación de cobre a partir de escorias de CMT, vía tratamiento pirometalúrgico, es la mejor opción. La presente evaluación económica tiene por finalidad calcular cual será el porcentaje de escoria a ser tratada, teniendo en cuenta los costos adicionales de tratamiento y costos adicionales debido al incremento en la capacidad de fusión.

5.2 Estimación del Costo de Inversión

El tratamiento será llevado a cabo en los convertidores que serán puestos fuera de operación. Así, el costo total de inversión corresponderá al costo total necesario para realizar las modificaciones a cada convertidor (ver Apéndice E).

Las modificaciones a llevarse a cabo serán:

- ◆ Modificación de la boca.
- ◆ Modificación de la chimenea de gases.
- ◆ Colocar un quemador en una de la tapas laterales.
- ◆ Clausura de la línea de toberas y desmontaje de carro de punzar.
- ◆ Colocar cuatro inyectores de petróleo en línea de toberas.
- ◆ Cambio total de ladrillo refractario.

Tabla 5.1 Costo Total de Inversión, Modificación de un Convertidor

	Costo (US\$/Convertidor)
Modificaciones Mecánicas	675,290
Ladrillo Refractario	152,970
Total	828,260

Tabla 5.2 Costo Total de Mantenimiento Anual de un Convertidor

	Costo (US\$/Convertidor)
Mantenimiento Mecánico/Eléctrico	102,460
Ladrillo Refractario	76,490
Total	178,950

Se ha considerado realizar un mantenimiento total por año de cada reactor a usarse; los costos considerados en la Tabla 5.2, corresponde a costos promedio de consumo de ladrillo refractario y reparaciones mecánicas y eléctricas para los convertidores pequeños.

5.3 Estimación de Costos por Concentrado Extra Fundido

El fundir concentrado extra en la fundición, involucra una serie de costos, siendo estos:

- ◆ Costo de Minado y Concentración.
- ◆ Costo de Fusión.
- ◆ Costo de Refinación.

Tabla 5.3 Margen Neto de Ganancias por la Fusión de Concentrados SPCC

Base de Cálculo	1 TM Conc.
Contenido de Cobre en Concentrado	28.60 %
Kilogramos de Cobre en Concentrado	286 Kg
Kilogramos de Cobre en Blister (2.5% pérdidas)	279 Kg
Kilogramos de Cobre Pagable (menos 2.72 Kg por TM)	277 Kg
Costo de Minado y Concentración	0.66 US\$/Kg Cu
Precio del Cobre	2.20 US\$/Kg Cu
Costo de Fusión	56.00 US\$/TM
Costo de Refinación	0.23 US\$/Kg Cu
Ferrocarril y Costo de Puerto	0.07 US\$/Kg Cu
Seguro, Supervisión y Flete Cobre Blister	0.06 US\$/Kg Cu
Ventas de Cobre	629.20 US\$/TM
Costos	
Costo de Minado y Concentración	189.05 US\$/TM
Costo de Fusión	56.00 US\$/TM
Pérdidas de Cobre	18.88 US\$/TM
Costo de Refinación	62.25 US\$/TM
Ferrocarril y Costo de Puerto	18.29 US\$/TM
Seguro, Supervisión y Flete Cobre Blister	17.07 US\$/TM
Costo Total	361.54 US\$/TM
Margen Neto de Ganancias	267.66 US\$/TM

- ◆ Pérdida de Cobre.
- ◆ Ferrocarril y Costo de Puerto
- ◆ Seguro, Supervisión y Flete de Cobre Blister.

Todos estos costos restados de los ingresos por venta de cobre, significan la utilidad de operación. En la Tabla 5.3, se calculan los ingresos y costos totales para la fusión de una tonelada métrica de concentrado SPCC.

5.4 Estimación de Costo de Tratamiento

Los costos de tratamiento involucra: el consumo de petróleo, sílica y costo operativo. El costo operativo es calculado de acuerdo al personal requerido para realizar la operación, teniendo en cuenta un trabajo en tres guardias a tiempo completo.

Para la estimación de estos costos, se ha tenido en cuenta los siguientes costos unitarios:

- ◆ Costo de Petróleo Residual No.6 25 US\$/BBL
- ◆ Costo de Sílica 13 US\$/TM
- ◆ Costo Operativo 2.7 US\$/hora-hombre

Los requerimientos de personal serán de acuerdo a la cantidad de reactores a usar, será necesario tener un operador de reactor; para el caso de un reactor será necesario 3 operarios (1 en relevo) y para el caso de 2 reactores será necesario 6 operarios (1 en relevo).

Tabla 5.4 Costos Operativos en función al porcentaje de escoria de CMT enviada a Tratamiento Pirometalúrgico

Escoria a Tratamiento	%	10	20	30	40	50
Fusión						
Concentrado Adicional Fundido	TM/Año	5,940	17,820	30,030	35,970	41,910
Costos						
Costo de Minado y Concentración	M US\$/Año	1,123	3,369	5,677	6,800	7,923
Costo de Fusión	M US\$/Año	333	998	1,682	2,014	2,347
Pérdidas de Cobre	M US\$/Año	112	336	567	679	791
Costo de Refinación	M US\$/Año	370	1,109	1,869	2,239	2,609
Ferrocarril y Costo de Puerto	M US\$/Año	109	326	549	658	766
Seguro, Supervisión y Flete Cobre Blister	M US\$/Año	101	304	513	614	715
Costo Total	M US\$/Año	2,148	6,443	10,857	13,004	15,152
Tratamiento						
Petróleo usado	BBL/Año	3,611	7,222	10,834	14,445	18,056
Costo de Petróleo	M US\$/Año	90	181	271	361	451
Sílica usada	TM/Año	660	1,320	1,980	2,970	3,630
Costo de Sílica	M US\$/Año	15	30	46	68	83
Reactores	Número	1	1	1	1	1
Costo Operativo	M US\$/Año	31	31	31	31	31
Costo Total	M US\$/Año	137	242	347	461	566
Costo Total Anual	M US\$/Año	2,284	6,685	11,204	13,465	15,718
Ingresos						
Cobre Adicional Producido	M US\$/Año	3,737	11,212	18,895	22,632	26,370
Ahorro de Sílica	M US\$/Año	46	61	76	121	159
Ingreso Total	M US\$/Año	3,783	11,273	18,971	22,754	26,529

Tabla 5.4 Continuación

	%	60	70	80	90	100
Escoria a Tratamiento						
Fusión						
Concentrado Adicional Fundido	TM/Año	47,850	59,730	65,670	77,880	83,820
Costos						
Costo de Minado y Concentración	M US\$/Año	9,046	11,292	12,415	14,723	15,846
Costo de Fusión	M US\$/Año	2,680	3,345	3,678	4,361	4,694
Pérdidas de Cobre	M US\$/Año	903	1,127	1,240	1,470	1,582
Costo de Refinación	M US\$/Año	2,979	3,718	4,088	4,848	5,218
Ferrocarril y Costo de Puerto	M US\$/Año	875	1,092	1,201	1,424	1,533
Seguro, Supervisión y Flete Cobre Blister	M US\$/Año	817	1,020	1,121	1,330	1,431
Costo Total	M US\$/Año	17,299	21,594	23,742	28,156	30,304
Tratamiento						
Petróleo usado	BBL/Año	21,667	25,278	28,889	32,501	36,112
Costo de Petróleo	M US\$/Año	542	632	722	813	903
Sílica usada	TM/Año	4,290	4,950	5,610	6,270	7,260
Costo de Sílica	M US\$/Año	99	114	129	144	167
Reactores	Número	1	2	2	2	2
Costo Operativo	M US\$/Año	31	62	62	62	62
Costo Total	M US\$/Año	671	808	913	1,019	1,132
Costo Total Anual	M US\$/Año	17,971	22,403	24,655	29,175	31,436
Ingresos						
Cobre Adicional Producido	M US\$/Año	30,107	37,582	41,320	49,002	52,740
Ahorro de Sílica	M US\$/Año	213	220	266	296	342
Ingreso Total	M US\$/Año	30,320	37,802	41,585	49,298	53,081

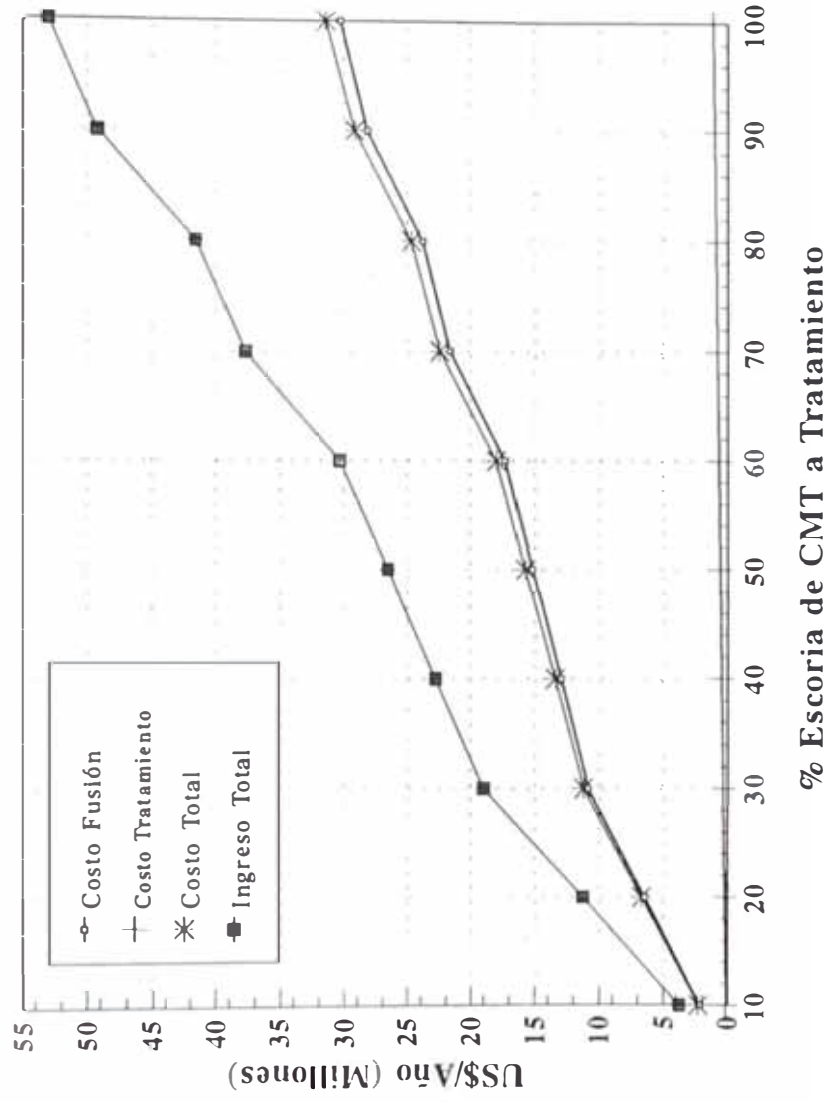


Figura 5.1 Variación de Ingresos y Costos por concentrado adicional fundido en función al porcentaje de escoria de CMT tratada

En la Tabla 5.4, se muestran los cálculos del costo total de fusión y costo de tratamiento. El ingreso total viene dado por las ventas totales de cobre extra producido.

En la Figura 5.1, se muestran las curvas de costos e ingresos totales de acuerdo al porcentaje de escoria de CMT tratada.

5.5 Análisis Económico

5.5.1 Base de Estimación

Se tomará como indicador económico el Valor Presente Neto (VPN), calculado en función del porcentaje de escoria a ser tratada, teniendo en cuenta que se trata de un mismo proyecto.

El costo de inversión está dividido en costos fijos de capital y costos de reemplazo de equipo y mantenimiento. Los ingresos corresponden al total de ventas de cobre extra producido (como blister o cátodos), mientras que los egresos corresponden a los gastos totales de minado, concentración, fusión y refinación. Además se incluyen los costos por ferrocarril, puerto, supervisión seguro y flete. Cada centro de costos incluye los gastos administrativos inherentes a cada etapa. Las tasas por Participación de Trabajadores (8%), Impuestos (30%) y Participación por Acciones Laborales (17.55%) están de acuerdo a las leyes peruanas vigentes.

5.5.2 Análisis de Rentabilidad

Teniendo en cuenta los flujos netos de fondos de acuerdo al porcentaje de escoria de CMT tratada, se calcula el valor presente neto (VPN) a un costo de

oportunidad del 10%.

En la Tabla 5.5, se resume los resultados obtenidos mediante los análisis económicos (Apéndice E). La Figura 5.2, muestra esta variación. Por lo tanto el proyecto es económicamente rentable, para un porcentaje de tratamiento mayor a 10% de escorias de CMT

Tabla 5.5 Rentabilidad del Tratamiento Pirometalúrgico

Porcentaje Escoria CMT a Tratamiento	Valor Presente Neto (M US\$)
10	2,774
20	13,672
30	24,888
40	30,258
50	35,628
60	41,054
70	51,815
80	57,216
90	68,482
100	73,852

5.5.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad del proyecto se ha hecho en base a la variación de dos parámetros: el precio del cobre y el precio de petróleo. Otros parámetros han sido considerados fijos para propósito de este análisis. El estudio se ha realizado para un porcentaje de tratamiento del 100% de las escorias producidas por el CMT (teniendo en cuenta que es el porcentaje que presenta mayor rentabilidad, ver Tabla 5 5)

En las Tablas 5.6 y 5.7, se presenta un resumen de la variación del ingreso total anual por ventas de cobre y el respectivo VPN para cada caso. En las Figuras 5.3 y 5.4, se muestran los resultados líneas arriba mencionados.

Por tanto, el proyecto de tratar escorias de CMT vía pirometalúrgica es rentable para los rangos dados de precio de cobre y petróleo.

Tabla 5.6 Análisis de Sensibilidad del Proyecto, Precio de Petróleo constante 25 US\$/BBL

Precio Cobre US\$/kg	Costo Total M US\$/Año	Ingreso Total M US\$/Año	VPN (10%) M US\$
2.20	31,436	53,081	73,852
2.09	31,357	50,444	64,827
1.98	31,278	47,807	55,802
1.87	31,199	45,170	46,777
1.76	31,119	42,533	37,756
1.65	31,040	39,896	28,731
1.54	30,961	37,259	19,706

Tabla 5.7 Análisis de Sensibilidad del Proyecto, Precio del Cobre constante 2.20 US\$/kg

Precio Petróleo US\$/BBL	Costo Total M US\$/Año	Ingreso Total M US\$/Año	VPN (10%) M US\$
19	30,690	53,081	76,483
21	30,938	53,081	75,609
23	31,187	53,081	74,730
25	31,436	53,081	73,852
27	31,685	53,081	72,973
29	31,933	53,081	72,098
31	32,182	53,081	71,220

CONCLUSIONES

- 1 La industria pirometalúrgica está buscando la disminución de costos e incremento de la productividad de sus operaciones; enfocando sus estudios a técnicas que permitan básicamente un ahorro en el consumo de energía; así, una serie de cambios en tecnología de fusión y conversión se viene dando a nivel mundial. La fundición de cobre de Southern Peru ha tomado esta iniciativa, la implementación de un Convertidor Modificado Teniente incidirá básicamente en el ahorro de combustible, dado que uno de los hornos reverberos será puesto fuera de operación; además el ahorro energético, incidirá en el aprovechamiento del calor generado por las reacciones exotérmicas para la fusión de concentrado dentro del CMT (filosofía básica de la tecnología).
2. Las escorias generadas en la Fundición de Ilo, son compuestos básicamente formados por silicatos de fierro, calcio y aluminio; en diferentes composiciones dependiendo del tipo de concentrado que se está procesando. Las escorias de fusión son compuestos ubicados por encima de la curva de saturación con sílica, prevaleciendo la forma tridimítica; presentan una viscosidad relativamente baja (11 P en un rango de 5 a 20 P). Estas escorias son compuestos básicos, lo cual radica en que presentan estructuras muy simples. Las escorias de conversión son compuestos que se encuentran en una zona cercana a la curva de saturación con sílica, prevaleciendo la forma de magnetita, estando algo alejadas de la zona fayalítica. Estas escorias presentan baja viscosidad y son compuestos netamente básicos.

3. Las pérdidas de cobre en escorias, están básicamente asociadas a dos factores: (1) Atrapamiento químico, y (2) atrapamiento mecánico.

Las pérdidas de cobre en escorias de fusión, están directamente relacionadas con dos factores: (1) Grado de mata, y (2) composición de la escoria. El porcentaje de cobre dentro de estas escorias es proporcional al grado de mata a razón de una gradiente de 0.015. El efecto de la composición se aprecia claramente, tomando en cuenta dos parámetros: (1) El coeficiente de distribución de cobre en mata y escoria, y (2) el índice de basicidad. Así, un incremento en el índice de basicidad implica un incremento en el coeficiente de distribución, aumentando de esta manera las pérdidas de cobre en la escoria.

De otro lado, las pérdidas de cobre en escorias de conversión están ligadas a una serie de factores: (1) Efecto de la viscosidad, (2) química de las escorias, (3) efecto de la sílica, y (4) efecto del grado de silicatación. Todos estos factores están relacionados íntimamente uno con otro; un incremento en la viscosidad o en el grado de silicatación, implica un incremento en las pérdidas de cobre; la química de las escorias está directamente relacionada con la formación de magnetita, al igual que el efecto de la sílica; un incremento en el contenido de magnetita resulta en un incremento en las pérdidas de cobre.

4. Con la implementación del Convertidor Modificado Teniente, se espera un incremento en el porcentaje de cobre en las escorias de fusión, esto debido básicamente al incremento del grado de mata y del índice de basicidad. La composición de las escorias y las propiedades fisico-químicas se mantendrán básicamente similares a los niveles actuales.

5. La aplicación del programa METSIM, desarrollado para modelar la Fundición de Ilo, ha resultado de gran ayuda para la simulación de diferentes escenarios de operación dentro de la fundición. Dicho programa ha permitido predecir, en un amplio rango de confianza: cuales serán las propiedades de los fluidos fundidos, como varían las capacidades de fusión de los hornos, el incremento o disminución del contenido de cobre dentro de las escorias; permitiendo de este modo obtener datos importantes para plantear métodos alternativos de tratamiento de escorias, y a la vez permite obtener conclusiones importantes sobre las mejores condiciones operativas dentro de la fundición.

6. Las escorias generadas en el Convertidor Modificado Teniente, contendrán un alto contenido de cobre (alrededor del 8%). El retornar estas escorias a los hornos reverberos incidirá netamente en el incremento del grado de mata, por ende el incremento en el porcentaje de cobre en las escorias. Así, se ha planteado un tratamiento diferente al retorno de estas escorias a los hornos reverberos. Este tratamiento dará como resultado lo siguiente: (1) Una disminución en el porcentaje de cobre en las escorias de fusión y una disminución en el grado de mata, (2) un incremento en la capacidad de fusión de los hornos y un ahorro en el consumo de sílica en la mezcla de concentrados en camas, y (3) un incremento de producción de mata y una disminución en la generación de escorias en hornos.

La diferencia entre ambos métodos planteados (proceso de tratamiento pirometalúrgico y flotación) radica básicamente en los siguientes aspectos: (1) Menor costo de inversión en técnica pirometalúrgica, (2) mayor producción de cobre usando técnica pirometalúrgica, esto debido al desplazamiento de fusión de concentrados nuevos por parte de los concentrados obtenidos vía

flotación de escorias, y (3) menores pérdidas globales de cobre en proceso pirometalúrgico.

7. De acuerdo al análisis planteado, es técnica y económicamente factible la aplicación del proceso de tratamiento de escorias de CMT vía pirometalúrgica; obteniéndose altos beneficios a bajo costo de inversión. Por lo tanto es recomendable realizar un estudio de ingeniería básica y posteriormente un estudio de ingeniería de detalle para implementar hornos de limpieza pirometalúrgica de escorias de CMT en la Fundición de Cobre de Southern Peru.

Para este estudio se recomienda realizar pruebas pirometalúrgicas para tratamiento de escorias de CMT a partir de Julio de 1995 (puesta en marcha del reactor) para lo cual se sugiere dos métodos alternativos:

1. Modificación parcial del Convertidor #1, para lo cual será necesario clausurar parcialmente la línea de toberas (usando tacos de barro seco), colocar un quemador en la tapa lateral izquierda, colocar 4 toberas de petróleo usando como medio dispersante aire (vapor puede ser usado como medio alternativo). Los gases generados pueden ser evacuados al medio ambiente a través de la chimenea del convertidor cerrando la compuerta de acceso al ducto común de gases de convertidores pequeños.
2. Usar un horno de retención (de preferencia lado norte de la fundición) para lo cual solo será necesario colocar 4 toberas de petróleo en el eje del horno (se puede usar aire o vapor como medio dispersante). El único problema será la manipulación de un volumen grande de escoria para realizar las pruebas.

- 16.- R. Stricklen, W. Torres
High Grade Flux Usage in Southern Peru Copper Corporation
Converters and its Effect on Brick Consumption and Reverb Smelting
Rate
Converting, Fire Refining and Casting
Edited by J.D. McCain and J.M. Floyd
International Symposium, San Francisco, California, USA, 1994
Publication of TMS
- 17.- William Torres
Sulfuric Acid Plant Installation - Ilo Smelter
Mining Latin America
The Institution of Mining And Metallurgy, 1994