

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA,  
MINERA Y METALURGICA**



**EVALUACION TECNICA Y ECONOMICA DEL  
TRANSPORTE DE COBRE LIQUIDO DE LA  
FUNDICION A LA REFINERIA DE ILO**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO METALURGICO**

**FREDDY RICHARD MOTTA RODRIGUEZ**

**LIMA - PERU**

**1995**

A mis padres Juan y Magna, y  
hermanos mi agradecimiento.

El autor de la presente tesis quiere expresar su agradecimiento a la Fundición de Cobre de Ilo, por haberle dado la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación, además desea agradecer a los asesores Ing. Edwilde Yoplac e Ing. Oscar Silva, y forma muy especial al Ingeniero Julio Uza Teruya, Director de la Escuela de Metalurgia, el cual brindo en forma desinteresada todo su apoyo.

## PROLOGO

Southern Peru Copper Corporation opera un complejo minero metalúrgico en el extremo sur del Perú, localizado en una de las zonas más áridas del mundo, comprendiendo las minas y concentradoras de Toquepala y Cuajone, Fundición y Refinería de Ilo.

El proceso de extracción se inicia con la perforación, disparo, remoción y fragmentación de las rocas en la zona mineralizada de los niveles de la mina, luego este mineral es liberado en trituradoras y molinos para su posterior selección en las celdas de flotación, obteniéndose como producto principal concentrado de sulfuros de cobre y como subproducto concentrado de molibdenita.

Los concentrados de cobre producidos en Toquepala y Cuajone, además de los concentrados comprados de otras empresas, son cargados a los hornos de fusión tipo reverbero; los productos fundidos ricos en sulfuros de cobre pasan a la etapa de conversión donde se separa el cobre de la escoria y finalmente son vertidos en moldes, formando las barras de cobre ampolloso. Parte de éstas barras producidas en la Fundición son enviadas a la Refinería de Ilo, en donde se obtiene como producto final los cátodos electrolíticos de cobre, siendo la parte restante comercializada como cobre ampolloso.

La Fundición de Cobre de Ilo ha decidido realizar ciertas modificaciones en el proceso actual de obtención del cobre ampolloso. La implementación del nuevo reactor Convertidor Modificado Teniente (CMT) tendrá funciones tanto de

fusión como de conversión y cambiará en forma sustancial las operaciones actuales. Además, la construcción de una planta de oxígeno y una planta de ácido sulfúrico complementarán esta modernización, proporcionando el ácido necesario para la materialización de proyectos en el beneficio de materiales oxidados.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación está referido a la implementación de un sistema de transporte de cobre líquido por medio de carros torpedo, tiene por finalidad determinar la factibilidad técnica y económica de la puesta en operación de este proyecto.

Actualmente el cobre líquido proveniente de los convertidores es moldeado en forma de barras, siendo aproximadamente el 65 % de ésta producción enviada a la Refinería de Ilo, en donde las barras son fundidas nuevamente para realizar el proceso de refinación ígnea y obtener los ánodos necesarios para su posterior refinación electrolítica. Esta operación de fusión, significa un costo considerable debido al elevado consumo de combustible, lo cual se evitaría con la implementación de un sistema de transporte directo del cobre a la planta de ánodos aprovechando la energía calorífica del cobre líquido.

El Capítulo I, comprende una síntesis de la producción del cobre ampoloso y electrolítico, y sus consecuencias en el medio ambiente. En la producción se presenta la perspectiva del mercado y los antecedentes históricos de la Fundición y Refinería de Ilo. En el impacto ambiental, se especifica los proyectos a realizar con la finalidad de reducir la emisión de gases contaminantes, además de modificar o reemplazar ciertos procesos establecidos.

En el Capítulo II se presenta una descripción completa del proceso actual de producción de cobre ampoloso y ánodos en la Fundición y Refinería de Ilo

respectivamente. Se inicia con la preparación de las camas de materiales, las cuales serán sometidos a los procesos de fusión y conversión para obtener el cobre ampolloso, siendo posteriormente transportado a la Refinería para proceder a la refinación ígnea y proporcionar los ánodos requeridos por las celdas electrolíticas.

En el Capítulo III se especifica los métodos alternativos para el incremento de la capacidad de producción de ánodos, realizando para cada operación, las estimaciones de flujo de materiales, costos de inversión y de tratamiento que serán necesarios para la producción de ánodos en las instalaciones de la Fundición ó a través de la implementación de un sistema de transporte de cobre líquido hasta la planta de ánodos actual.

En el Capítulo IV se presenta las características más importantes de la tecnología de transporte de cobre líquido, involucrando lo siguiente : diseño mecánico del carro torpedo, métodos de sistema de transporte, propiedades físicas, químicas y estructurales de los refractarios (ladrillos y morteros), comportamiento físico-químico en el cobre líquido, flujo de calor y balance de energía.

En el Capítulo V se muestran los cálculos necesarios para la evaluación económica-financiera del método propuesto para el incremento de la producción de ánodos (transporte de cobre líquido), presentando rentabilidad, beneficios y análisis de sensibilidad del proyecto en base a la variación del parámetro precio del petróleo residual.

## ÍNDICE

Prologo	1
Introducción	3
Indice	5

### CAPITULO I : PRODUCCION DEL COBRE E IMPACTO

#### AMBIENTAL

1.1	Perpectivas del Mercado del Cobre	9
1.2	Antecedentes de la Producción del Cobre	11
1.2.1	Fundición de Ilo	11
1.2.2	Refinería de Ilo	12
1.3	Impacto Ambiental	13
1.3.1	Emisión de gases contaminantes	13
1.3.2	Conservación de la ecología	14
1.3.3	Control de la contaminación	16
1.4	Modificación del proceso de refinación ígnea	19
1.4.1	Condiciones actuales del proceso	19
1.4.2	Alternativas planteadas para la modificación	21

### CAPITULO II : DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE FUSION Y

#### REFINACION IGNEA

2.1	Descripción de Operaciones en la Fundición	24
2.1.1	Preparación de Minerales	26
2.1.1.1	Materias primas	26
2.1.1.2	Preparación de Lechos de fusión	27



2.1.2	Proceso de Fusión	29
2.1.2.1	Hornos de Reverbero	29
2.1.2.2	Descripción del Proceso	32
2.1.2.3	Físico-Química de la Fusión a mata y escoria	34
2.1.3	Proceso de Conversión	37
2.1.3.1	Convertidor Peirce-Smith	37
2.1.3.2	Conversión de los sulfuros de cobre	37
2.1.3.3	Materias primas	38
2.1.3.4	Descripción del Proceso	39
2.1.3.5	Físico-Química de la Conversión	41
2.1.4	Moldeo del cobre ampoloso	44
2.1.4.1	Descripción de la planta	45
2.1.4.2	Operación de moldeo	46
2.2	Descripción de operación en la planta de moldeo	47
2.2.1	Descripción del proceso actual	48
2.2.2	Materias primas	49
2.2.3	Hornos de fusión y refinación	49
2.2.4	Proceso de Refinación ígnea	50
2.2.4.1	Carga del cobre ampoloso	51
2.2.4.2	Fusión	52
2.2.4.3	Oxidación	53
2.2.4.4	Escorificación	53
2.2.4.5	Reducción	54
2.2.4.6	Moldeo del cobre	55
2.2.5	Físico-Química de la refinación ígnea	56

### CAPITULO III : ALTERNATIVAS DE INCREMENTO DE LA PRODUCCION DE ANODOS

3.1	Introducción	59
3.2	Producción de ánodos en la Fundición	60
3.2.1	Instalación de una planta de ánodos	62
3.2.2	Modificación de la planta de moldeo	63
3.2.3	Costos de inversión	64
3.2.4	Costos de tratamiento	68
3.3	Transporte de cobre líquido	68
3.3.1	Alternativas para el transporte del cobre	69
3.3.1.1	Operación de un horno de refinación	70
3.3.1.2	Operación de los dos hornos de refinación	71
3.3.2	Costos de inversión	72
3.3.3	Costos de tratamiento	76
3.4	Comparación de costos de inversión y de tratamiento	78

### CAPITULO IV : INGENIERIA DEL TRANSPORTE DE COBRE LIQUIDO

4.1	Sistema de transporte de cobre líquido	81
4.2	Especificaciones del Carro torpedo	82
4.2.1	Diseño	82
4.2.2	Refractarios	84
4.2.2.1	Ladrillos	85
4.2.2.2	Morteros	89
4.3	Transferencia de calor	90
4.3.1	Mecanismos de transferencia	90

4.3.1.1	Conducción	91
4.3.1.2	Convección	92
4.3.1.3	Radiación	94
4.3.2	Flujo de calor en el Carro torpedo	96
4.4	Físico-Química en el transporte del cobre líquido	98
4.5	Balance de Energía en el Carro torpedo	102
4.5.1	Calores de entrada	102
4.5.2	Calores de salida	106
CAPITULO V : EVALUACIÓN ECONÓMICA		
5.1	Introducción	109
5.2	Evaluación económica de las alternativas de incremento	109
5.3	Costo de tratamiento en la planta de moldeo de la Fundición	113
5.4	Análisis económico del transporte de cobre líquido	114
5.4.1	Base de estimación	114
5.4.2	Análisis de rentabilidad	115
5.4.3	Tiempo de retorno de la inversión	117
5.4.4	Relación Beneficio-Costo	118
5.4.5	Análisis de Sensibilidad	119
5.4.6	Punto de equilibrio	120
CONCLUSIONES		121
REFERENCIAS		123

## **CAPITULO I**

### **PRODUCCION DEL COBRE E IMPACTO AMBIENTAL**

#### **1.1 Perspectivas del Mercado del Cobre**

Southern Peru Copper Corporation (SPCC) sucursal de la ASARCO Inc., es una de los principales empresas mineras exportadoras de cobre bruto y refinado en el mundo. Actualmente su desarrollo productivo involucra principalmente la explotación y concentración de sulfuros de cobre, las que posteriormente son tratadas por fusión y refinación, obteniéndose como productos finales las barras de cobre ampoloso y los cátodos de cobre electrolítico, siendo luego exportadas desde el muelle del Puerto de Ilo a los distintos mercados del mundo.

Actualmente, el Perú es el octavo país productor de cobre a nivel mundial, produciendo cerca de medio millón de toneladas anuales, siendo Southern Peru productor del 67 % del cobre nacional y por tanto proveedor del 15 % de las divisas que ingresan al país, muy necesarias para el desarrollo económico. La Fundición y Refinería de Ilo, por tercer año consecutivo produjeron más de 270,000 toneladas métricas de cobre ampoloso y 176,000 toneladas métricas de cátodos de cobre electrolítico respectivamente.

Es así en que en los momentos que el Perú se encuentra al inicio de un proceso de transformación industrial y económica, es necesario incentivar el consumo de cobre y difundir sus ventajas comparativas frente a otros elementos,

descubriendo nuevas tecnologías que demanden cobre, así como nuevas aplicaciones en la industria. Principalmente debe existir una identificación de intereses comunes entre el segmento productivo y los sectores de transformación, tales como los productos planos, tuberías, cables y alambres.

Tabla 1.1 Comercialización de Cobre ampoloso y electrolítico 1989-1993

Año	Cobre ampoloso TM	Cátodos de cobre TM
1989	111,571	146,410
1990	83,840	120,701
1991	137,521	134,752
1992	93,761	176,998
1993	103,800	179,964

La Internacional Copper Association (ICA), conformada por las principales empresas transformadoras y productoras de cobre (integrada por Southern Peru), que generan el 80 % de la producción mundial de este metal, están diseñando acciones destinadas a promover la expansión de los mercados de cobre. Las acciones a tomarse tienen como objetivo desarrollar los mercados de consumo de cobre, pretendiendo aumentar el tamaño y fortalecer los mercados tradicionales.

Tabla 1.2 Mercados de comercialización del cobre en 1992

Areas	Cobre ampoloso TM	Cátodos de cobre TM	Total TM
Norte de Europa	19,745	63,356	83,101
Italia		44,744	44,744
Resto de Europa		6,196	6,196
Asia	29,209	34,422	63,631
Estados Unidos	23,309	1,478	24,787
México	21,508		21,508
Latinoamérica		26,792	26,792

## **1.2 Antecedentes de la Producción del cobre**

### **1.2.1 Fundición de Ilo**

La Fundición de Cobre de Ilo, considerada como una de las más grandes en el mundo, se encuentra ubicada en Punta Tablón a 18 Kilómetros al norte de la ciudad de Ilo, en la costa del Océano Pacífico, operando un proceso convencional de fusión y conversión de concentrados de sulfuros cobre.

Comienza sus actividades en 1961 con el proyecto Toquepala con dos hornos de reverbero de ladrillo ácido (el N° 2 se encuentra fuera de servicio desde el proyecto Cuajone) y cuatro convertidores Peirce-Smith (CPS) de 3.96 m Ø x 9.14 m L (ubicado en el lado sur de la fundición), siendo su capacidad inicial de fusión de 1,400 toneladas métricas de concentrado de cobre por día. Después de quince años, con el proyecto Cuajone en 1976 se adicionaron dos hornos de reverbero de ladrillo básico (N° 3 y 4 ) y tres CPS de 3.96 m Ø x 10.67 m L (lado norte de la fundición), siendo la capacidad actual de fusión de 2,900 toneladas métricas de concentrados de cobre por día.

Además se cuenta con una sección de moldeo en donde se procesa todo el cobre ampoloso producido en los convertidores Peirce-Smith, aproximadamente 740 toneladas métricas por día, siendo moldeados en dos plantas ubicadas al final del corredor de convertidores, lado sur (proyecto Toquepala) y lado norte (proyecto Cuajone), cada una con dos hornos de retención y una rueda de moldeo, de donde se obtienen barras de 650 Kilogramos.

### **1.2.2 Refinería de Ilo**

La Refinería de Cobre de Ilo, está ubicada en Pampa Caliche a 09 Kilómetros al norte de la ciudad de Ilo, siendo la unidad más reciente adquirida el 01 de Junio de 1994 en licitación pública a la Empresa Minera del Perú - Minero Perú S.A., por Southern Peru Copper Corporation, realizando procesos de refinado ígneo y electrolítico del cobre ampoloso, proveniente de la Fundición de Ilo.

Este complejo metalúrgico inicia sus actividades en 1975, cuenta para el desarrollo de sus operaciones con una planta de ánodos diseñada y construida por Maerz Ofenbau AG., firma suiza, conformada por dos hornos basculantes con una capacidad inicial de 330 toneladas métricas, donde se realiza el refinado ígneo del cobre ampoloso; una rueda de moldeo donde se obtienen los ánodos regulares requeridos por la planta electrolítica y un caldero Babcock conectado a uno de los hornos, donde son recuperados 101,270 toneladas métricas de vapor por año, para ser usado en todas las áreas productivas de la Refinería. Actualmente la capacidad de los hornos es de 370 toneladas métricas con una capacidad nominal de 237,000 toneladas métricas de ánodos por año.

La Planta Electrolítica, construida por el grupo japonés Mitsui-Furukawa, estaba diseñada originalmente con 768 celdas comerciales, 44 celdas de láminas de arranque y 40 celdas liberadoras para producir 150,000 toneladas métricas de cátodos de cobre electrolítico por año. En 1989 se llegó a construir 8 secciones adicionales (128 celdas), incrementando la capacidad de refinación en un 17 %, además se realizó modificaciones en las dimensiones de las celdas, adicionando un par de electrodos, manteniendo la densidad de corriente e incrementando la

producción en 2 %, lo que permitió aumentar la capacidad a 190,000 toneladas métricas de cátodos de cobre electrolítico por año. Además, se cuenta con una planta de tratamiento de lodos anódicos, que procesa desechos de las celdas electrolíticas, y una planta de metales preciosos.

### **1.3 Impacto ambiental**

#### **1.3.1 Emisión de gases contaminantes**

Los concentrados de cobre de las minas de Toquepala y Cuajone son sometidos a altas temperaturas en los hornos y convertidores de la Fundición, a fin de separar el cobre de los otros minerales que lo acompañan y proceder finalmente a la refinación del cobre ampoloso. En estos procesos se originan diversos tipos de gases que son descargados a través de ductos y chimeneas, dentro de estos se encuentra el SO<sub>2</sub> que es un componente menor de dicha mezcla de gases. La Fundición y Refinería, situadas al norte de Ilo, emiten los gases también en la dirección norte por la acción del viento predominante, pero ocasionalmente en el transcurso del año cambia la dirección del mismo y pueden darse algunas molestias en la salud de los habitantes de la zona y a la agricultura, por la destrucción de plantaciones y sembríos.

Los conductos de humos o las chimeneas vienen a significar un conducto vertical que sirve para descargar los gases de combustión y fusión al medio ambiente. Las chimeneas de elevada altura, se utilizan con el propósito de conducir los gases residuales que contienen sustancias tóxicas o partículas de materia hasta un punto suficientemente elevado sobre el nivel del suelo, para que, después de la



dispersión normal que se produce en la cúspide de la chimenea, la concentración a nivel del suelo de cualquiera de los contaminantes se encuentre muy por debajo del nivel permitido. Las chimeneas que tienen una altura comprendida entre 91 m y 122 m (chimeneas de la fundición), están diseñadas para descargar el humo y los gases residuales por encima de la capa de inversión en un punto en el que no puedan ser atrapados por aquella, pudiéndose así dispersar en la atmósfera.

El anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), presente en los gases evacuados al medio ambiente a través de las chimeneas y otros ductos, es uno de los elementos que contribuyen en mayor medida a la contaminación del aire. El  $\text{SO}_2$  es producido por la combustión y fusión de materiales que contienen azufre (31 % en los concentrados de cobre, 230 ppm en el cobre ampoloso y 1 % en el petróleo residual). El valor umbral permitido para el  $\text{SO}_2$  es 5 ppm, y las concentraciones a nivel del suelo debe mantenerse iguales o inferiores a 0.5 ppm.

### **1.3.2 Conservación de la ecología**

Durante los últimos años la preocupación por proteger el Medio Ambiente ha ido aumentando en todo el planeta. La sensibilización por preservar el ecosistema mundial ha provocado innumerables muestras de solidaridad con la naturaleza afectada en demasía en todos los rincones del orbe. La conciencia ambiental ha invadido nuestro diario vivir, se ha incorporado al mundo de los negocios. ECO 1992 ahora es parte de la historia, así como los acuerdos y convenciones que originó. Esta conferencia internacional le dio un fuerte respaldo al movimiento ambiental del mundo. Pero también afianzó el interés y la conciencia ambiental en el sector industrial, tanto a nivel internacional como nacional.

En el Perú, las entidades que agrupan a la industria por sectores, ya cuentan con comités ambientales, uno de cuyos fines es promover una nueva filosofía en la forma de llevar a cabo la producción en armonía con la conservación de recursos y la protección del ambiente. Por otro lado, el Ministerio de Energía y Minas establece reglas claras que ayudan a que los problemas ambientales y la protección ambiental se vean desde una perspectiva técnica y realista. En otras palabras, el sector debe utilizar su conocimiento y experiencia para identificar sus problemas y poder proponer las soluciones apropiadas. Pero esto debe hacerse sin poner en peligro la viabilidad económica del sector.

Southern Peru desde que inició sus actividades ha tenido una preocupación constante por el Medio Ambiente, razón por la cual construyó sus instalaciones y campamentos afectando en lo posible el entorno. Permanentemente emprendió investigaciones sobre los impactos ambientales que pudieran haber provocado sus operaciones, lo que se demuestra con las investigaciones de carácter científico realizados. Reafirmando seriamente su posición, en marzo de 1991 Southern Peru crea el CIPA (Centro de Investigación y Protección Ambiental) con sede en Ilo, asignándole el control de los impactos ambientales en el entorno de influencia provocados por sus actividades productivas.

La contaminación de uno de los recursos naturales más importantes, como es el aire que respiramos, se ha convertido en un tema de preocupación regional. La contaminación del aire no respeta fronteras, porque las corrientes dominantes de aire pueden transportar los contaminantes muy lejos de la fuente contaminante. Grandes cantidades de contaminantes se pueden dispersar rápidamente en el aire o acumularse en concentraciones mayores o menores, según sea la topografía del área

geográfica y las condiciones meteorológicas que existan en el momento de la dispersión. Debido a que el problema de la contaminación ambiental es regional, el procedimiento más efectivo para hacerle frente será actuar también a escala regional

### **1.3.3 Control de la contaminación**

Existen algunos gases que en la actualidad contribuyen en gran medida a hacer más difícil la solución del problema de la contaminación, debido a que ofrecen una gran resistencia en lo que a su tratamiento o destrucción se refiere. Principalmente el anhídrido sulfuroso es uno de estos gases, y para mitigarlas, Southern Peru construirá una planta de ácido sulfúrico en la Fundición de Ilo, y tendrá como propósito capturar una significativa cantidad del azufre que origina el proceso y disminuir la concentración de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera.

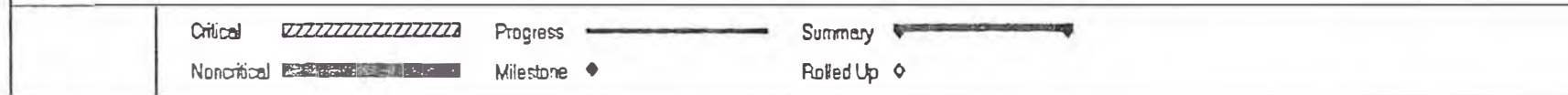
En realidad, la planta de ácido, se trata de un conjunto de proyectos que moderniza parte de los procesos de la Fundición y disminuirá la emisión de anhídrido sulfuroso. Se trata de una inversión de gran envergadura, pues demandará 108 millones de dólares, que constituyen el 30 % del total del programa de inversiones de la compañía entre 1994 y 1997. En la Figura 1.1 se muestra el cronograma de los proyectos en Ilo durante este periodo.

Los proyectos que desarrollará Southern Peru comprende esfuerzos en cuatro rubros :

- 1) Convertidor Modificado Teniente y Planta de Oxígeno
- 2) Planta de ácido sulfúrico

Fig. 1.1 Cronograma de Proyectos No 1994-1997

ID	Name	1995				1996			1997		
		Sep	Jan	May	Sep	Jan	May	Sep	Jan	May	Sep
1	Planteamientos de Alternativas de Solución	█									
2	Sistema de Comunicaciones	▨	▨	▨	▨						
3	Nueva Planta de Recuperación de Selenio	▨	▨	▨	▨						
4	Proyectos Ambientales	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨			
5	Incremento de Capacidad de Ref. Electrolítica	█									
6	Incremento de la Dens. de Corriente en las celdas	▨	▨	▨	▨						
7	Construcción del Rectificador de 28 KA			▨	▨						
8	Servicios Adicionales										
9	Modos de Sistemas de Circulación en la Ref.	▨	▨	▨	▨						
10	Modificación de Celdas de Refinación					▨	▨	▨	▨		
11	Transferencia de Metal líquido a Refinería		▨	▨	▨	▨	▨	▨			
12	Modificación total del moldeo en Fundición		▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
13	Nueva planta de ánodos en la Fundición		▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨



**3) Incremento de la Capacidad de refinación electrolítica**

**4) Modificación del actual proceso de refinación ígnea**

**1) Convertidor Modificado Teniente y Planta de Oxígeno.-**

A un costo de 20 millones de dólares se está efectuando la ingeniería, supervisión y construcción del Convertidor Modificado Teniente, sistema adquirido a Codelco (Chile). Esto traerá consigo la modernización de los procesos de la Fundición de Ilo, poniéndose a tono con las últimas técnicas de las fundiciones en el mundo, además de preparar una mejor materia prima para la producción de ácido sulfúrico, objetivo principal del proyecto. El reactor Convertidor Modificado Teniente (CMT) será de 4.57 m Ø x 19.81 m L, con una capacidad de fusión de 745 toneladas métricas de concentrados de cobre por día. Después que la modificación sea completada, el horno de reverbero N° 1 y los convertidores Peirce-Smith N° 1 y 2 serán retirados, por lo cual la fundición, tendrá una capacidad de fusión aproximada de 2,900 toneladas métricas de concentrados de cobre por día.

La Planta de Oxígeno, considerada dentro del proyecto del CMT con un costo de más de 11 millones de dólares, tendrá la función de proporcionar 31% de aire enriquecido al Convertidor Modificado Teniente con el objeto de quemar el combustible con el oxígeno puro y de esta manera obtener una alta eficiencia técnica en los procesos de la fundición. Su uso permitirá un mejoramiento en los costos de producción de la Fundición.

## **2) Planta de Acido Sulfúrico.-**

La planta de ácido tratará los gases del reactor Convertidor Modificado Teniente para la producción de ácido sulfúrico. A un costo de 36 millones de dólares, la planta que se adquiere como paquete, producirá 150,000 toneladas métricas por año de ácido sulfúrico. La materia prima empleada para la producción de ácido son los gases sulfurosos  $SO_2$  o  $SO_3$ , que son elementos excedentes del proceso en la Fundición, y que constituyen parte de las emisiones de gases en Ilo. La Planta no producirá efectos o desechos tóxicos, ya que su sistema de producción es de "circuito cerrado", es decir, recircula y reutiliza tanto el agua como el calor. El mayor beneficio de la Planta de Acido sulfúrico consistirá en una mejora en la calidad del ambiente en Ilo.

## **3) Incremento de la Capacidad de refinación electrolítica.-**

Dentro de los proyectos a realizar por parte de Southern Peru está integrar las operaciones de la Refinería y la Fundición, incrementando la capacidad de la Refinería, siendo la meta inmediata aumentar la capacidad de la planta electrolítica hasta 224,000 toneladas métricas de cátodos de cobre electrolítico por año. Esto se conseguirá con el reemplazo de todas las celdas electrolíticas de concreto y PVC, por celdas poliméricas de concreto que tienen un mayor volumen y permitirá adicionar 5 pares de electrodos. Para éste incremento de la capacidad será necesario que la provisión de ánodos sea 275,000 toneladas métricas por año, lo cual requiere que la actual planta de ánodos aumente su producción en un 17 %.

## **1.4 Modificación del proceso de refinación ígnea**

### **1.4.1 Condiciones actuales del proceso**

La Refinería de Cobre de Ilo, ubicada a una distancia de 09 Kilómetros al sur de la Fundición, procesa el 65 % de la producción de barras de cobre ampoloso (490 toneladas métricas por día), donde éstas son fundidas nuevamente para realizar el refino ígneo del cobre ampoloso y producir ánodos tipo comercial o stripper, necesarios para la refinación electrolítica.

Las barras de cobre ampoloso son recepcionadas por la planta de ánodos sobre plataformas del ferrocarril industrial, las cuales son ubicadas en la línea férrea adyacente a ésta planta, donde las barras son descargadas en la zona de almacenamiento de lotes de cobre ampoloso. Posteriormente, las barras son cargadas sucesivamente dentro del horno de fusión basculante, junto con ánodos corroídos, desechos de celdas electrolíticas y recirculante de moldeo, de acuerdo a un programa establecido de carga. Esta etapa de operación de carga y fusión dura 10 horas, lo que implica un 42 % del tiempo necesario para realizar una colada, lapso de tiempo en que el horno Maerz podría estar disponible para el refino de otra carga de cobre.

Desde el inicio de operación hasta 1979, los costos de este proceso no era tan significativo, debido al bajo costo de la energía, sobre todo de los combustibles, principalmente el petróleo, además los costos de producción del cobre era muy inferior a su precio de comercialización, no existiendo incentivo económico para desarrollar mejores procesos. La actual crisis energética del petróleo, ha provocado



Tabla 1.3 Consumo y costo del petróleo residual N° 6 en la refinación (grana del cobre ampoloso)  
Programa Normal de Operación (Planta de Anodos - Refinería de Ilo)

Hornos		Etapa	Consumo de los hornos				Consumo del Caldeo		
N° 1	N° 2		h/etapa	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /etapa	US\$/etapa	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /etapa	US\$/etapa
14:00	22:00	Espera	1.21	0.38	0.46	70.54	0.66	0.80	123.45
15:00	23:00								
16:00	00:00	Carga y Fusión	9.95	1.62	16.08	2,476.96	0.38	3.77	580.09
17:00	01:00								
18:00	02:00								
19:00	03:00								
20:00	04:00								
21:00	05:00								
22:00	06:00								
23:00	07:00								
00:00	08:00	Oxidación	1.95	1.62	3.15	485.43	0.40	0.77	119.37
01:00	09:00								
02:00	10:00	Esconificación Y Reducción	5.61	1.37	7.71	1,187.24	0.30	1.70	261.65
03:00	11:00								
04:00	12:00								
05:00	13:00								
06:00	14:00								
07:00	15:00								
08:00	16:00	Moldeo	5.28	1.15	6.08	935.78	0.51	2.70	415.56
09:00	17:00								
10:00	18:00								
11:00	19:00								
12:00	20:00								
13:00	21:00								
Total		Por colada		6.49	35.47	5,463.40			
		Por día (2 coladas)		12.98	70.94	10,926.81	2.25	9.74	1,500.12
		Por año (330 días)		4,284.24	23,410.17	3,605,846.49	743.18	3,213.93	495,038.71
Precio del petróleo (US\$/m <sup>3</sup> )						154.03			



que la fusión de estas barras de cobre ampolloso incrementen considerablemente el costo de producción de ánodos por el elevado costo del consumo de petróleo.

Esta etapa de carga y fusión de las barras de cobre ampolloso es una constante preocupación para la empresa, ya que actualmente esta alcanzando costo de 2 millones de dólares anuales, lo que es equivalente a 45 % del costo total del petróleo en la producción de ánodos. Dentro de las perspectivas de mejorar el refino a fuego de cobre, estaría como objetivo la eliminación de ésta etapa, considerando sus costos de producción (petróleo, vida útil de los equipos, mano de obra), mejora de los procesos de refino (mejor disponibilidad de tiempo y aumento de capacidad de producción) y un mejor control ambiental.

De acuerdo a los cálculos de consumo de petróleo residual en el proceso actual de refinación ígnea en la planta de ánodos de Refinería (Tabla 1.3), se obtiene el consumo y costo unitario del petróleo residual N° 6 por tonelada métrica de ánodo.

Tabla 1.4 Consumo y costo del petróleo residual N° 6 en la producción de ánodos

Refinación ígnea Etapas	Consumo (m <sup>3</sup> /TM ánodos)		Costo (US\$/TM ánodos)	
	Hornos	Caldero	Hornos	Caldero
Espera	0.13	0.12	0.20	0.18
Carga y Fusión	4.54	0.53	6.99	0.82
Oxidación	0.89	0.11	1.37	0.17
Escorificación	0.57	0.05	0.87	0.07
Reducción	2.18	0.19	3.35	0.30
Moldeo	1.71	0.38	2.64	0.59
<b>Total</b>	<b>10.02</b>	<b>1.38</b>	<b>15.43</b>	<b>2.13</b>

(\*) Consumo por 10<sup>-2</sup>

#### **1.4.2 Alternativas planteadas para la modificación**

Con el propósito de obtener una mayor productividad en la Refinería, se considera necesario que la etapa de carga y fusión no sea una operación restrictiva dentro del flujo de producción del cobre, y como el mercado actual requiere de productos de alta calidad que deben cumplir con requerimientos de menor costo de producción, protección del medio ambiente, así como con normas más estrictas de comercialización; por lo tanto es necesario redefinir la práctica operacional de refinado a fuego de cobre en la Refinería.

Los factores mencionados, son incentivos para modificar o reemplazar esta operación, debido a su naturaleza discontinua, baja capacidad unitaria y poca productividad, que se reflejan en los costos elevados de refinación. Por este motivo, Southern Peru, tiene como objetivo inmediato cambiar esta operación de fusión de las barras de cobre y producir ánodos directamente del cobre ampolloso líquido. En los nuevos procesos a desarrollar, se busca que sean continuos, de alta capacidad y productividad, así como de bajo consumo energético y conservando el medio ecológico.

Considerando dichos aspectos Southern Peru, ha planteado analizar tres posibles alternativas y determinar la más apropiada y factible para reducir los costos significativamente, las mismas que son las siguientes

- 1) **Instalación de una nueva Planta de Anodos en la Fundición**
- 2) **Modificación de las condiciones actuales de la planta de moldeo norte de la Fundición**

### 3) Transporte de metal caliente de Fundición a Refinería

#### 1) **Instalación de una nueva Planta de Anodos en la Fundición.-**

Esta alternativa considera la instalación de una nueva planta de ánodos en la Fundición, tomando en consideración el lugar más apropiado (lado norte de la fundición o el espacio disponible del horno de reverbero N° 2), para facilitar las operaciones de moldeo, mientras su actual planta de moldeo sería mantenido con una disponibilidad parcial en caso de emergencia para la producción de barras de cobre ampoloso. En la Refinería, la actual planta de ánodos sería dejada fuera de operación y el vapor será solamente producido por fuego directo en el caldero Babcock. Además, será considerada la instalación de un nuevo equipo para lavar los ánodos corroídos y desechos de las celdas electrolíticas para obtener paquetes que sean fácilmente transportables por el ferrocarril hasta la Fundición.

#### 2) **Modificación de las condiciones de moldeo en la Fundición.-**

Esta alternativa considera la modificación de dos de los cuatro hornos de retención existentes en la actual planta de moldeo de la Fundición, debiendo considerarse el lugar más apropiado (lado norte, sur o ambos de la fundición) para realizar la modificación y la instalación de una nueva rueda de moldeo para producir los ánodos requeridos por la planta electrolítica. En este caso, la actual planta de ánodos ubicada en la Refinería sería dejada fuera de operación y el vapor será solamente producido por fuego directo en el caldero Babcock. En la Fundición, la actual planta de moldeo será mantenido con una disponibilidad parcial en caso de emergencia para la producción de barras de cobre ampoloso.

### **3) Transporte de metal caliente de la Fundición a la Refinería.–**

La transferencia de metal caliente por carros torpedo de la Fundición a la Refinería de Ilo podría hacer posible el incremento de la capacidad actual de los hornos Maerz, debido a que se procesaría todo el cobre ampolloso líquido de la Fundición, así como de los ánodos corroídos, desechos de celdas electrolíticas y recirculante de moldeo de la Refinería, generando ahorro en los costos de producción.

Esta opción requiere de modificaciones estructurales en la planta de ánodos de la Refinería para la ubicación de los carros torpedo. Además, será necesario realizar cambios en la línea férrea actual e instalación de estaciones de calentamiento en la Fundición y Refinería para mantener el cobre fundido.

## **CAPITULO II**

### **DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE FUSION Y REFINACION IGNEA**

#### **2.1 Descripción de Operaciones en la Fundición**

La Fundición de Cobre de Ilo, es una planta convencional de fusión y conversión de concentrados de cobre con una capacidad nominal de fusión de 952,550 toneladas métricas por año de concentrado, produciendo 272,160 toneladas métricas por año de cobre ampolloso.

El concentrado de cobre producido en las concentradoras de Toquepala y Cuajone, más el mineral de sílice de baja ley, son enviados a la Fundición de Ilo por medio del ferrocarril industrial, haciendo un recorrido aproximado de 185 kilómetros. Al llegar a la Fundición, los carros cargados con concentrado, sílice y conchuela (recibidos de la planta de Coquina) son pesados uno por uno en una balanza plataforma de ferrocarril con capacidad para 150 toneladas métricas. Luego pasan al volteador de carros donde el material es descargado y transportado a los respectivos lechos de fusión (camas) por medio de fajas transportadoras.

Un sistema de fajas se encarga de distribuir el material a ambos lados y a lo largo de la cama, formando capas sucesivas de concentrado, sílice y conchuela. Todos estos materiales son removidos por medio de un cargador frontal, el cual deja caer

la mezcla a tolvas de recepción ubicadas sobre una faja, que la transportara a las tolvas de alimentación de los hornos de reverbero.

La fusión se realiza en tres hornos de reverbero con carga húmeda y alimentado por las paredes. Un horno de reverbero, es de tipo arco radial suspendido de ladrillo ácido (sílice-alúmina), con una capacidad nominal de fusión de 680 toneladas métricas diarias de concentrado, obteniendo 480 toneladas métricas de mata con 34 % de cobre y 556 toneladas métricas de escoria con 0.53 % de cobre. Los otros dos hornos de reverbero, son de tipo techo plano panelizado de ladrillo básico (cromo-magnesita), con una capacidad nominal de fusión de 2,086 toneladas métricas diarias de concentrado, produciendo 1,796 toneladas métricas de mata con 36 % de cobre y 1,930 toneladas métricas de escoria con 0.52 % de cobre.

La mata producida por los hornos es tratada en los convertidores Peirce-Smith. Se procesa 2,276 toneladas métricas diarias de mata con 626 toneladas métricas diarias de mineral de sílice (250 toneladas métricas de mineral de alta ley y 376 toneladas métricas de mineral de baja ley). La producción diaria es 740 toneladas métricas de cobre ampolloso con una ley de 99.2 % de cobre y 1,886 toneladas métricas de escoria con 2.83 % de cobre, que es retornada a los hornos de reverbero por medio de grúas puente y ollas de 6.37 m<sup>3</sup> de capacidad.

Todo el cobre producido en los convertidores Peirce-Smith es transferido mediante grúas y ollas con una capacidad de 5.24 m<sup>3</sup> a los hornos de retención de las plantas de moldeo, ubicadas al sur y norte del corredor de convertidores, siendo transferidas aproximadamente 32 ollas diarias, obteniendo en el moldeo

barras de 650 kilogramos de peso promedio, es decir 1140 barras de cobre ampolloso diariamente.

Los gases producidos por la combustión y fusión del concentrado en los hornos 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, dichos gases que arrastran consigo algo de polvo, siendo limpiados en precipitadores electrostáticos para posteriormente ser descargados al medio ambiente mediante dos chimeneas. De igual manera los gases producidos en los convertidores son evacuados a un ducto común de gases y luego de ser limpiados en precipitadores electrostáticos, son evacuados al medio ambiente vía dos chimeneas. La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo de la Fundición de Ilo

### **2.1.1 Preparación de Minerales**

#### **2.1.1.1 Materias primas**

En la Fundición de Cobre de Ilo, la principal materia prima de los hornos de reverbero, es el lecho de fusión, que tiene como constituyentes los concentrados de Cuajone, Toquepala o comprados a otras empresas y los fundentes (sílice de alta ley, conchuela y cal). Otros materiales tales como, cemento de cobre y polvos recuperados de los precipitadores electrostáticos son también materiales de alimentación a los hornos de reverbero.

Fig. 2.1 Diagrama de Flujo de la Fundición

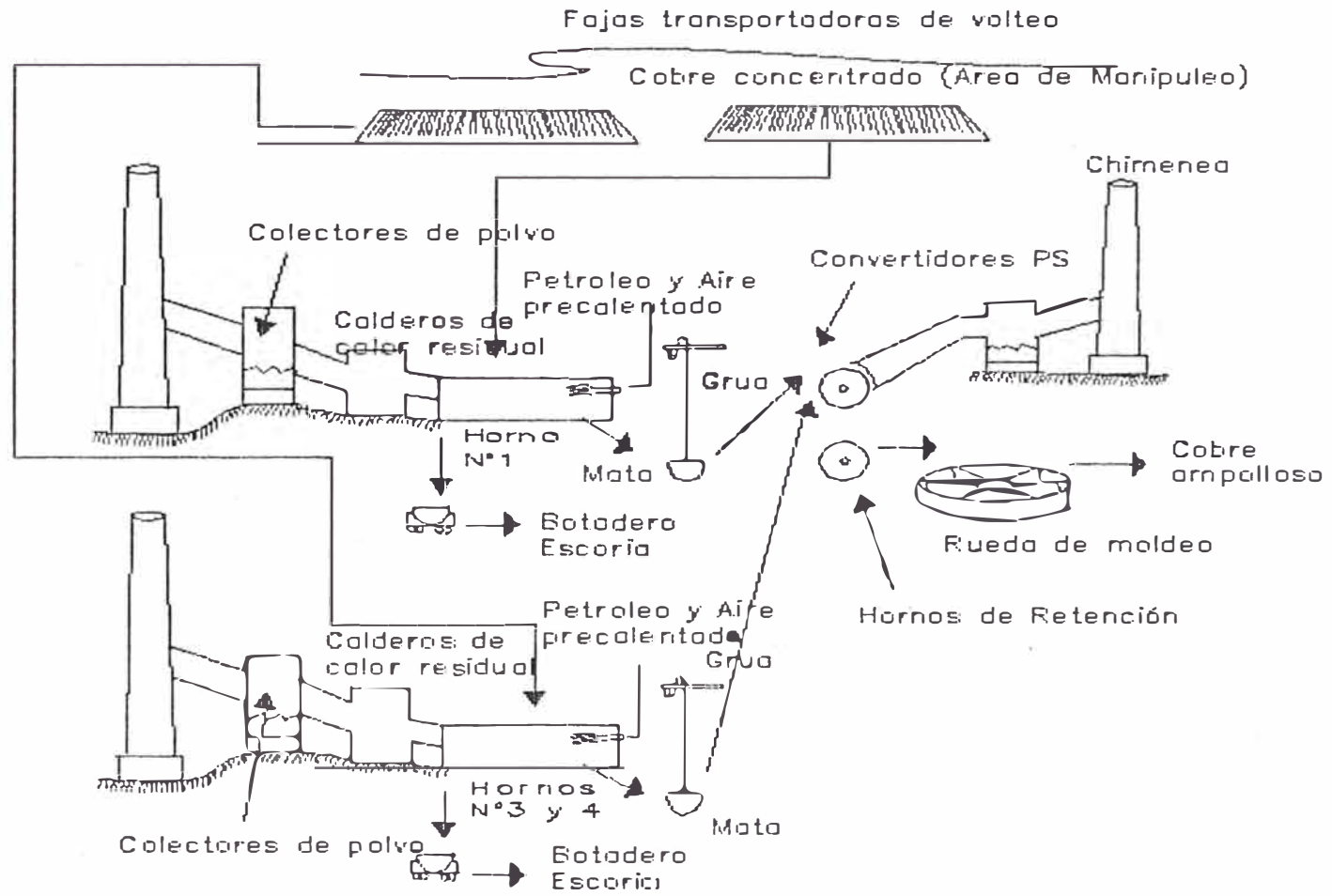




Tabla 2.1 Análisis Químico de Concentrados de Southern Peru (base seca)

Material	Toquepala %	Cuajone %
Cobre (Cu)	27.38	27.75
Fierro (Fe)	28.24	27.15
Azufre (S)	31.88	31.24
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	6.10	5.85
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.94	2.83
Otros	3.46	5.18
Humedad (base húmeda)	8.79	8.09

Tabla 2.2 Análisis Químico de los Fundentes (base seca)

Componente	Sílice alta ley %	Conchuela %	Cal %
Oxido ferroso (FeO)	2.56		
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	90.24	3.93	
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.41	0.49	
Cal (CaO)	0.96		78.32
CaCO <sub>3</sub>		90.39	16.14
Otros	3.83	5.19	5.54
Humedad (base húmeda)	0.50	4.50	

### 2.1.1.2 Preparación de Lechos de fusión

Se denomina lecho de fusión o cama a la mezcla uniforme de concentrados de cobre, fundentes (sílice, conchuela y cal) y productos recirculantes (polvos recuperados de los precipitadores electrostáticos y cementos de cobre) en las proporciones más adecuadas para obtener las mejores propiedades y favorecer su posterior fusión. En la preparación de camas el punto más importante es el cálculo de la relación eutéctica, ya que nos proporcionara la menor temperatura de fusión de la mezcla.

Para este cálculo se toman los siguientes criterios :

$$\text{Peso total de SiO}_2 \text{ en la mezcla} = \Sigma \text{Peso SiO}_2 \text{ } i$$

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

$$\text{Peso total de Al}_2\text{O}_3 \text{ en la mezcla} = \Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 \text{ } i$$

Siendo "i" los componentes de la mezcla, es decir :

- Concentrado

- Sílice

- Conchuela

- Cal

$$\Sigma \text{Peso Mezcla} = \Sigma \text{Peso SiO}_2 \text{ } i + \Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 \text{ } i + \Sigma \text{Peso CaO } i$$

$$\% \text{ SiO}_2 = \frac{\Sigma \text{Peso SiO}_2 \text{ } i}{\Sigma \text{Peso Mezcla}}$$

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = \frac{\Sigma \text{Peso Al}_2\text{O}_3 \text{ } i}{\Sigma \text{Peso Mezcla}}$$

$$\% \text{ CaO} = \frac{\Sigma \text{Peso CaO } i}{\Sigma \text{Peso Mezcla}}$$

Tabla 2.3 Componentes de las camas

	Concentrado	Sílice	Conchuela	Cal
Horno N°1, TM	680	35	36	7
Horno N°3, TM	1,043	55	56	11
Horno N°4, TM	1,043	55	56	11
% Cu	26.46			
% Fe	25.13	1.98	0.35	
% S	30.85			
% FeO		2.54	0.46	
% SiO <sub>2</sub>	4.61	89.92	2.51	
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.47	2.40	0.56	
% CaO		0.96		75.92
% CaCO <sub>3</sub>	0.54		90.11	16.81

Tabla 2.4 Determinación de la relación eutéctica

Componente	TMS	Relación Calculada %	Relación Teórica %	Diferencia %
<b>Horno N° 1</b>				
SiO <sub>2</sub>	64	59.93	62.00	-2.07
CaO	25	23.32	24.00	-0.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18	16.75	14.00	2.75
<b>Horno N° 3</b>				
SiO <sub>2</sub>	82	58.99	62.00	-3.01
CaO	38	27.72	24.00	3.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18	13.29	14.00	-0.71
<b>Horno N° 4</b>				
SiO <sub>2</sub>	82	58.99	62.00	-3.01
CaO	38	27.72	24.00	3.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18	13.29	14.00	-0.71

## 2.1.2 Proceso de Fusión

### 2.1.2.1 Hornos de Reverbero

El horno de reverbero es esencialmente un horno de crisol, donde se alimenta una carga sólida constituida de concentrados de sulfuros de cobre, fundentes y materiales recirculantes y utiliza la combustión del petróleo como medio de generación de calor. Estos materiales son fundidos con el calor transferido de los gases calientes que atraviesan toda la longitud del baño del horno, siendo los productos de esta fusión drenados separadamente, la escoria fundida, que es descargada por la parte posterior del horno, y la mata fundida, que es transferida a los convertidores para su posterior oxidación a cobre ampolloso.

#### 1) Horno de Reverbero N° 1.-

El horno de reverbero N° 1 de 34.59 m de largo x 9.08 m de ancho, de tipo arco radial suspendido con ladrillos ácidos de sílice-alúmina, funde un promedio de

680 toneladas métricas de concentrado por día, con sílice de alta ley, conchuela y cal como fundentes. Este horno cuenta con siete quemadores frontales y un quemador vertical marca Coen, con un flujo promedio de 4.09 m<sup>3</sup>/h de petróleo residual N°6 y un flujo de aire de 57,766 m<sup>3</sup>/h.

Un sistema de fajas transportadoras recibe el concentrado descargado por el cargador frontal y a su vez lo deposita dentro de las cuatro tolvas (cada una de 81.6 toneladas métricas de capacidad) con las que cuenta este horno; luego cada tolva descarga sobre un alimentador de faja que suministra concentrado a los cuatro "slinger" (alimentadores con impulsores), los cuales están equipados con un pistón neumático que permite acercarse a la ventana de alimentación cuando se va a inyectar el concentrado dentro del horno y retraerlo cuando se termina la alimentación.

En las paredes laterales del horno, a la altura de la línea del baño se han colocado chaquetas de enfriamiento construídas de cobre y refrigeradas por agua tratada con inhibidores de corrosión (hidróxido de potasio y dicromato de sodio). Estas chaquetas de refrigeración descansan sobre la parte plana del crisol, proporcionando un excelente medio de protección de la parte inferior de las paredes laterales, frontal y posterior del horno, contribuyendo el mismo a un mínimo de pérdida de calor.

La parte superior de las paredes y el arco del horno de reverbero son protegidos con "slurry" (mezcla de lodo de mineral de sílice molido con bentonita), siendo para este fin transportadas desde los tanques de almacenamiento hasta el sitio

conveniente por medio de tuberías e inyectados a presión con aire a través de pequeñas ventanas distribuidas a lo largo de las paredes laterales del horno.

El flujo de material que es evacuado intermitentemente del horno de reverbero N° 1 durante la producción diaria es aproximadamente, 33 ollas de mata (480 toneladas métricas) y 51 ollas de escoria (556 toneladas métricas), siendo el material de retorno al horno, 32 ollas de escoria de convertidores (434 toneladas métricas). Además este horno cuenta con dos calderos de calor residual que producen en conjunto un promedio de 31,746 Kg/h de vapor que son aprovechados para la generación de energía eléctrica, y un precipitador electrostático (Cottrell) para la recuperación de los polvos arrastrados por los gases del horno durante su salida.

## **2) Hornos de Reverbero N° 3 y 4 .-**

Los hornos de reverbero N° 3 y 4 de 36.33 m de largo x 9.85 m de ancho, de tipo techo plano panelizado con ladrillos básicos de cromo-magnesita, funden en promedio 2,086 toneladas métricas de concentrado por día, con sílice de alta ley, conchuela y cal como fundentes. Cada horno cuenta con ocho quemadores frontales y un quemador vertical marca Coen, con un flujo promedio de 7.04 m<sup>3</sup>/h de petróleo residual N° 6 y un flujo de aire de 129,124 m<sup>3</sup>/h.

Un sistema de fajas transportadoras recibe el concentrado descargado por el cargador frontal y a su vez lo deposita dentro de las dos tolvas (cada una de 453.6 toneladas métricas de capacidad) con las que cuenta cada horno, luego cada tolva descarga el concentrado a una faja móvil que se desplaza a lo largo de la parte lateral del horno, dejando caer el concentrado directamente al baño a través

de pequeñas tolvas colocadas en la parte superior del mismo, formándose un talud de concentrado junto a las paredes laterales.

En las paredes laterales (zona de evacuación de mata y escoria), se tienen chaquetas de enfriamiento construidas de cobre y refrigeradas por medio de agua tratada. Estas chaquetas de refrigeración descansan verticalmente en algunas zonas de las paredes, debido a que el talud formado por el concentrado brinda protección a las paredes del horno a lo largo de toda la zona de alimentación.

El flujo de material que es evacuado intermitentemente de los hornos de reverbero N° 3 y 4 durante la producción diaria es aproximadamente, 124 ollas de mata (1,796 toneladas métricas) y 177 ollas de escoria (1,930 toneladas métricas), siendo el material de retorno al horno, 107 ollas de escoria de convertidores (1,452 toneladas métricas). Ambos hornos cuentan con cuatro calderos de calor residual que producen 24,944 Kg/h de vapor cada una, que son aprovechados para la generación de energía eléctrica, y un precipitador electrostático (Cottrell) para la recuperación de los polvos arrastrados por los gases del horno durante su salida.

#### **2.1.2.2 Descripción del Proceso**

La fusión en los hornos de reverbero es un proceso continuo, es decir el horno es calentado continuamente produciendo mata y escoria (la mata es un compuesto de sulfuros de cobre y fierro, mientras que la escoria es una mezcla de compuestos de silicatos de óxido de fierro, óxido de calcio, etc.). La carga sólida es alimentada al horno en forma intermitente, y de la misma manera son drenados

parcialmente la mata y escoria, tratando de mantener los niveles constantes del baño dentro del horno.

Las dos funciones más importantes del horno de reverbero 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 ambos lados del horno a través de agujeros y canales, siendo ésta recibida por ollas de  $6.37 \text{ m}^3$  de capacidad que las grúas transportaran a los convertidores para su posterior oxidación a cobre ampolloso. La escoria (material descartado) es también evacuada por ambos lados del horno, siendo ésta recibida por ollas de  $5.09 \text{ m}^3$  de capacidad que descansan en un carril inferior, las cuales son operadas hidráulicamente y están acopladas a una locomotora, que las llevará a los botaderos. La ubicación del agujero y canal 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 producida en la etapa de conversión, es tratada en estos hornos para poder recuperar las cantidades de cobre que se encuentran en este material. Esta escoria de convertidor es vaciada al horno de reverbero por medio de ollas de  $6.37 \text{ m}^3$  de capacidad a través de canales (chutes) ubicadas en la parte frontal del horno. En la Figura 2.2 se ilustra la Fundición de Ilo.

Fig. 2.2 Diagrama de la Fundición de Ilo

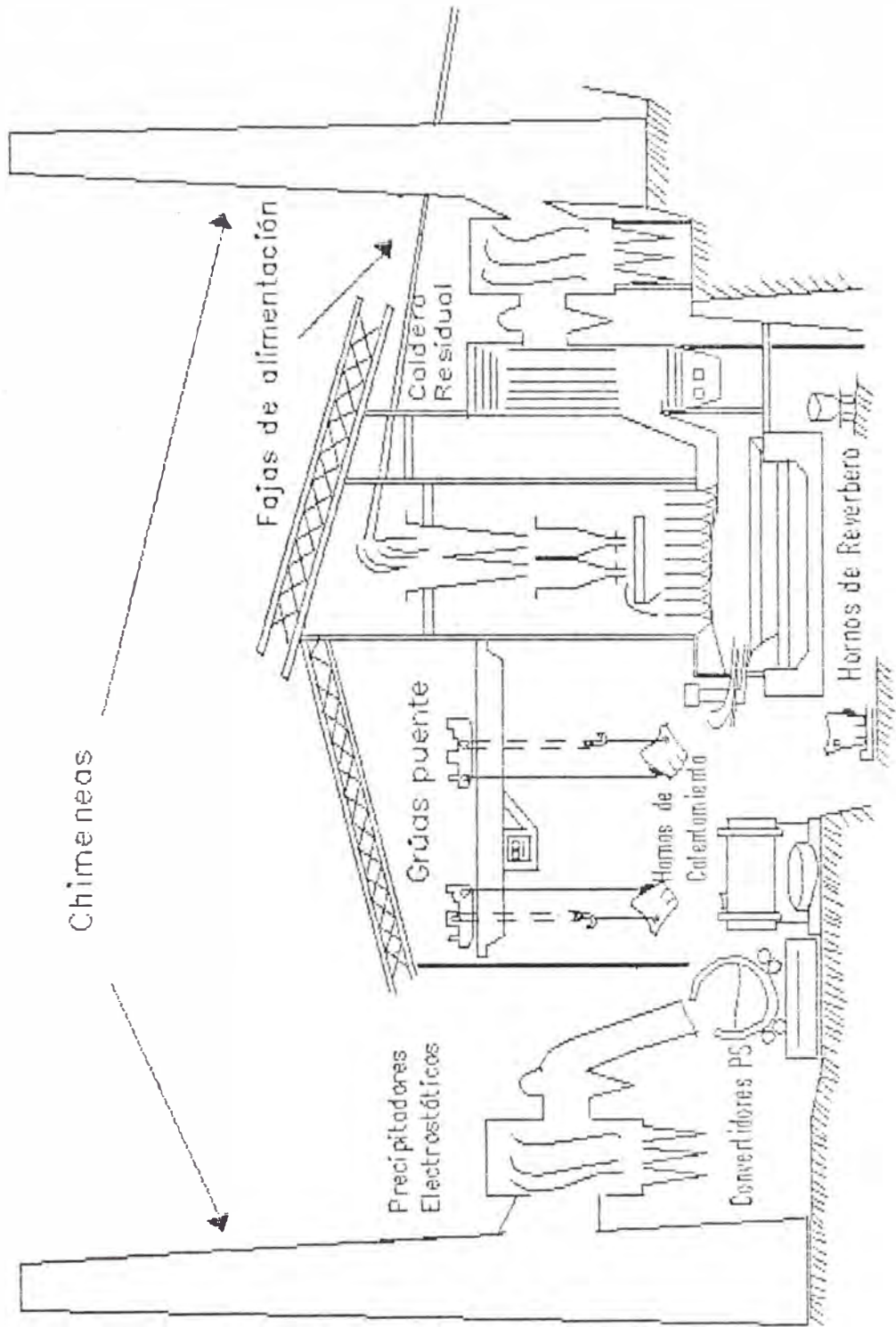




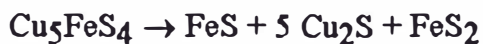
Tabla 2.5 Análisis Químicos de Mata y Escoria de Fusión

Compuesto (%)	Mata	Escoria
Cu	35.82	0.52
Fe	33.50	34.68
FeO		36.79
SiO <sub>2</sub>	0.36	33.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		8.74
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	9.13	8.41
CaO		6.12
S	25.33	0.84

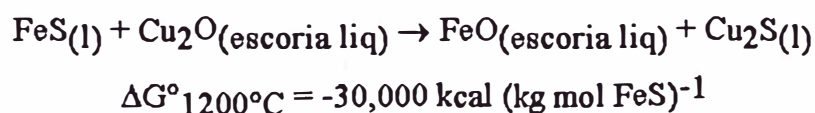
### 2.1.2.3 Físico-Química de la Fusión a mata y escoria

Al considerar las reacciones es conveniente analizar la carga alimentada a los hornos de reverbero, siendo la más importante los concentrados húmedos que tiene como mayores constituyentes los sulfuros y óxidos de fierro y cobre. La carga también presenta otros óxidos tales como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO y principalmente el SiO<sub>2</sub>, que está presente en el concentrado y fundente. Así, el fierro, cobre, azufre, oxígeno y los respectivos óxidos son los que controlan la fisicoquímica del sistema mata-escoria.

A medida que se calienta la carga de los hornos de fusión ocurren una serie de descomposiciones en las que destacan por su importancia las descomposiciones de los sulfuros superiores simples o dobles. De acuerdo al diagrama de fases ternario Cu-Fe-S existen una gran variedad de sulfuros susceptibles de desdoblamiento y/o descomposición. En la práctica, las principales reacciones de descomposición están dados por los minerales de cobre (Calcopirita CuFeS<sub>2</sub>, Bornita Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub> y Calcosita Cu<sub>2</sub>S) y fierro (Pirita FeS<sub>2</sub>), y 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 para garantizar el paso de todo el cobre a la mata. La presencia del FeS en la mata asegura esta sulfuración, ya que este compuesto tiende virtualmente a sulfurar todo el cobre que no este en forma de sulfuro, mediante la siguiente reacción :



La constante de equilibrio de esta reacción es :

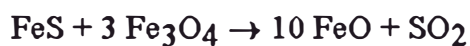
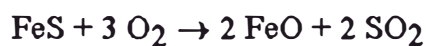
$$K_E = \frac{a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{FeS}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{O}}}$$

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

donde  $K_E$  a la temperatura de fusión, aproximadamente  $1200^\circ\text{C}$ , es  $10^{+4}$ . Este alto valor muestra que el  $\text{Cu}_2\text{O}$  es casi completamente sulfurado por el FeS a dicha temperatura, lo cual es demostrado en la práctica.

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, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), SiO<sub>2</sub> (fundentes y escoria de retorno de convertidores), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO. Las escorias deben : (1) ser inmisible en la mata, (2) tener una baja solubilidad para el Cu<sub>2</sub>S, y (3) ser suficientemente fluidas para minimizar el atrapamiento de mata y concentrado. Durante esta etapa 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 del cobre.

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

Material	Punto de Fusión (°C)	Densidad líquido a 1200°C (gcm <sup>-3</sup> )	Viscosidad líquido a 1200°C (cP)
Cobre ampoloso	1,080	7.8	3.3
Cu <sub>2</sub> S	1,130	5.2	
FeS	1,190	4.0	
Mata (Cu <sub>2</sub> S-FeS)			
30% Cu	1,050	4.1	
50% Cu	1,000	4.6	10
80% Cu	1,130	5.2	
FeO	1,377		
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1,597	5.0-5.5 (sólido)	
SiO <sub>2</sub>	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	

### **2.1.3 Proceso de Conversión**

#### **2.1.3.1 Convertidor Peirce-Smith**

El convertidor Peirce Smith, es de tipo horizontal y está compuesta de una coraza ó camisa cilíndrica de acero, revestida interiormente con ladrillo refractario básico de cromo-magnesita. El cilindro del convertidor se apoya con dos sólidos aros de refuerzo sobre cuatro pares de rodillos que se colocan en los extremos del convertidor, y uno de los lados posee una rueda dentada que sirve como medio de transmisión a manera de cremallera. Además posee un motor eléctrico que le permite girar alrededor del eje longitudinal en cualquier sentido.

El convertidor posee una abertura que funciona como boca, por donde se alimenta la mata, metal blanco o materiales fríos y se descarga la escoria, metal blanco o cobre ampolloso, así también se utiliza para evacuar los gases. Alrededor de la boca posee una sobre tapa conocida como mandil que protege al convertidor y a los flexibles contra golpes ocasionados por la caída de acresiones de la chimenea. Para el suministro de aire comprimido al baño líquido de la mata, el convertidor esta provisto de toberas, las cuales están ubicadas en orificios a lo largo de la camisa del convertidor.

#### **2.1.3.2 Conversión de los sulfuros de cobre**

Los Convertidores han sido ubicados transversalmente al eje de los hornos de reverbero con el objeto de conseguir el transporte más corto de materiales entre estos y las plantas de moldeo. Se cuenta con siete convertidores Peirce-Smith,

cuatro pequeños (3.96 m Ø × 9.14 m L) y tres grandes (3.96 m Ø × 10.67 m L) de los cuales seis están en operación normal y uno en mantenimiento. Los convertidores pequeños cuentan cada uno con 44 toberas y los grandes cuentan con 48 toberas cada uno; todos ellos revestidos con ladrillos refractarios básicos (Nucon 60). Además, cada convertidor tiene una máquina de punzar de motor neumático necesario para la limpieza de sus toberas.

El aire requerido 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h, teniendo una sola etapa y una presión de descarga de 103 kpa.

En la parte lateral y superior de cada convertidor existen tolvas para el sílice (material necesario para la formación de la escoria del convertidor), la cual es alimentada al convertidor por medio de un sistema de vibrador y faja.

### **2.1.3.3 Materias primas**

La conversión del cobre consiste en la oxidación de la mata líquida proveniente del horno de reverbero, removiendo el fierro y otras impurezas, para obtener el cobre ampolloso. Por esta razón las materias primas fundamentales del convertidor son la mata generada en los hornos reverberos y la sílice. La mata es el producto valioso de los hornos de reverbero, y está constituido principalmente por sulfuros de cobre y fierro. La sílice ésta formada por una mezcla de mineral de sílice de baja ley (64 % SiO<sub>2</sub>) y de alta ley (90 % SiO<sub>2</sub>), dando un material denominado "Sílica Flux" con un contenido promedio de 74 % SiO<sub>2</sub>.

También son considerados como materia prima el material frío formado por ciertos materiales recirculantes tales como escoria de hornos con alto contenido de cobre, polvo de chimeneas de convertidores y polvo de calderos.

Tabla 2.7 Análisis Químico de Sílica y Material Frío de Convertidores

Compuesto (%)	Sílica Flux	Material Frío
Cu	0.47	24.50
SiO <sub>2</sub>	74.28	14.90
Fe		32.90
FeO	3.90	21.47
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		22.41
CaO	0.92	1.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.38	3.16
S		6.18

#### 2.1.3.4 Descripción del Proceso

El propósito del proceso de conversión es remover el fierro, azufre y demás impurezas de la mata, produciendo cobre ampoloso. Esto se consigue mediante la oxidación a altas temperaturas de la mata producida en los hornos de reverbero, la cual es transportada mediante ollas hasta los convertidores, siendo alimentada por la boca de éste y posteriormente se inyecta el aire necesario para las reacciones de oxidación.

La conversión de mata a cobre ampoloso es un proceso por lotes, así durante este proceso se presentan dos etapas bien definidas :

(1) Oxidación de los sulfuros de cobre y fierro, mediante el cual se logra la eliminación de gran parte del fierro como escoria del convertidor, mientras el

cobre debido a una reacción de intercambio, vuelve a transformarse en sulfuro. En esta etapa el fierro es removido del convertidor en forma de silicatos (la sílica es agregada al convertidor en esta etapa del soplado) y también parte del azufre de la carga es removido en forma de anhídrido sulfuroso; la escoria formada (con un contenido promedio de 2.75 % de cobre) es retornada a los hornos reverberos para la recuperación de cobre.

(2) Oxidación de los sulfuros de cobre o metal blanco (70-75 % de cobre), proceso en el que se obtiene el cobre ampoloso, siendo también el azufre removido en forma de anhídrido sulfuroso. Después de terminar el proceso el cobre ampoloso por inclinación del convertidor se vierte en ollas que las transportaran hasta los hornos de retención para su posterior moldeo. En las Figuras 2.3 y 2.4 se muestran el flujo actual y futuro de material para el proceso de conversión respectivamente.

Tabla 2.8 Análisis Químico de Escoria de Convertidor y Cobre ampoloso

Compuesto (%)	Escoria Convertidor	Cobre Ampoloso
Cu	2.83	99.20
Fe	46.07	0.01
FeO	38.35	
SiO <sub>2</sub>	25.63	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.35	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	22.48	
S	0.41	0.03



Fig 2.3 Flujo actual de carga de material para el proceso de conversión (3 Reverberos y 6 Convertidores)

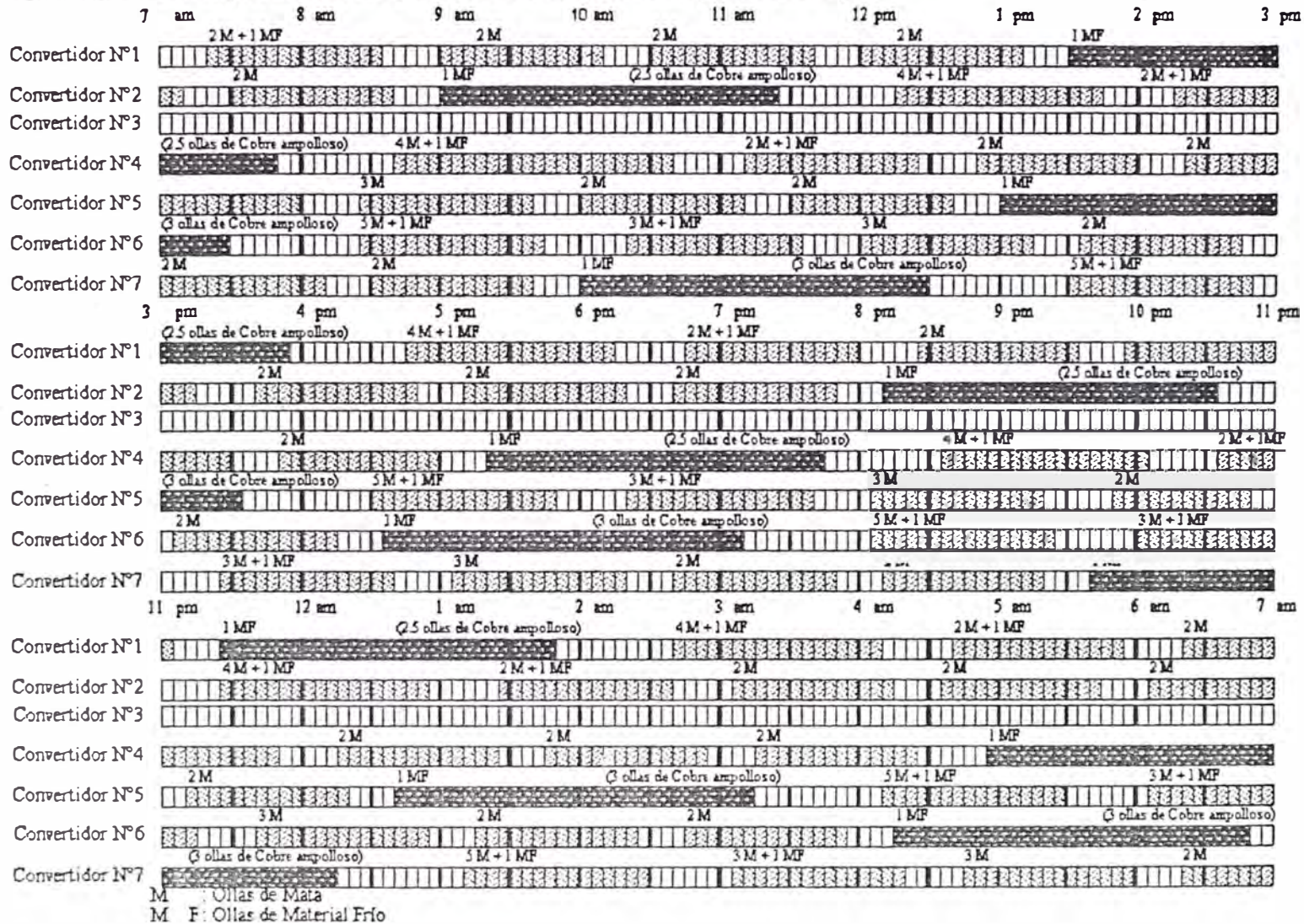
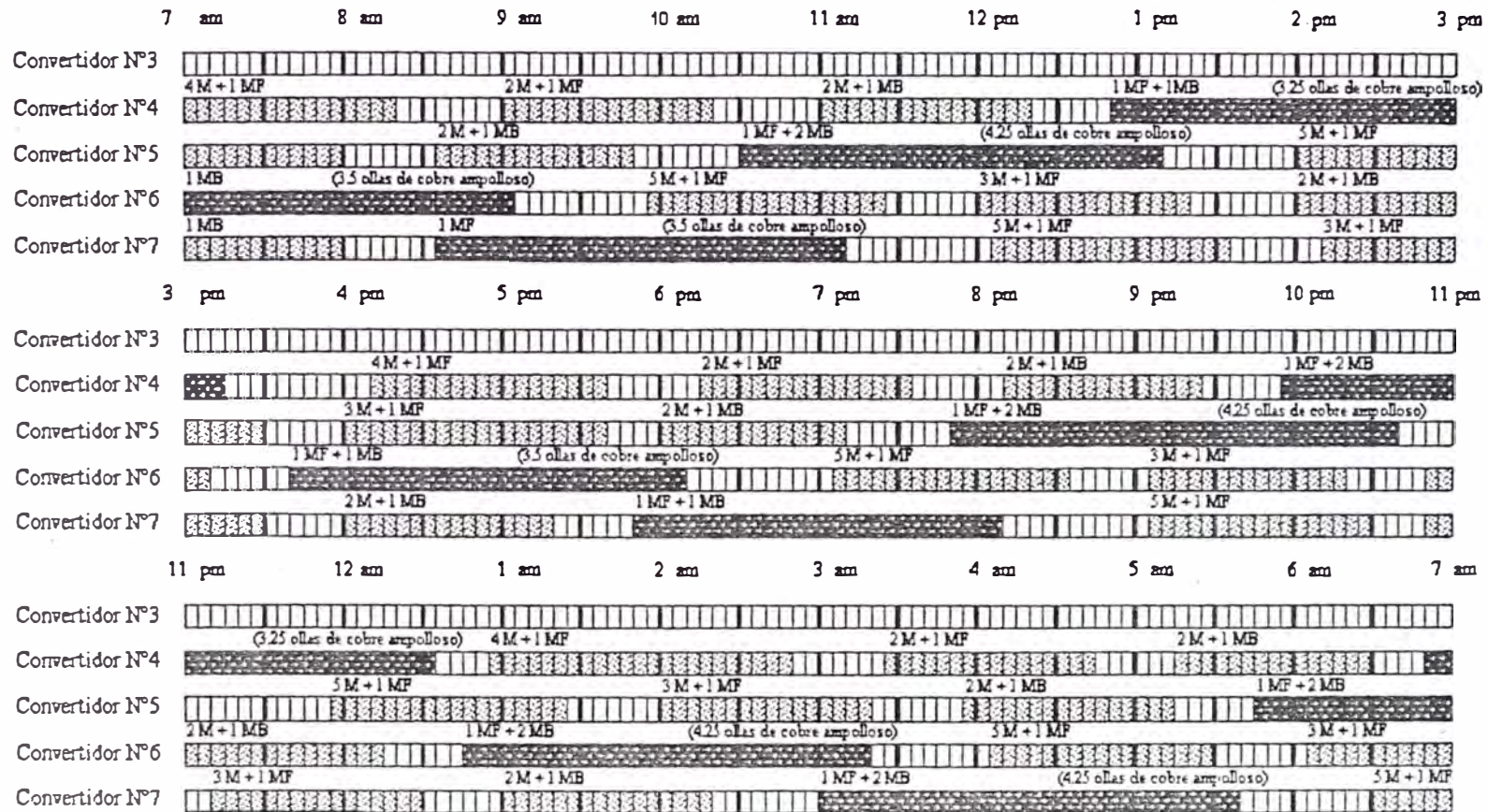




Fig 2.4 Flujo futuro de carga de material para el proceso de conversión (2 Reverberos y 4 Convertidores)



M : Ollas de Mata  
M B: Ollas de Metal Blanco  
M F: Ollas de Material Frio

Tabla 2.9 Operación Normal de un Convertidor Peirce-Smith

Convertidor	Ollas mata carga	Ollas frío carga	Tiempo soplado escoria	Ollas escoria prod.	Tiempo escoria carga	Tiempo soplado cobre	Ollas cobre prod.
3.96m x 9.14m	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
					50		
3.96m x 10.67m	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
					55		

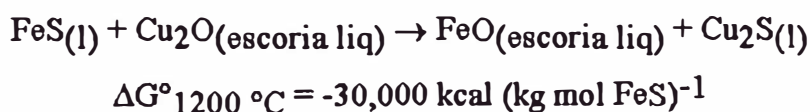
### 2.1.3.5 Físico-Química de la Conversión

El proceso de conversión se lleva a cabo en dos etapas fisicoquímica, ambas incluyen el soplado con aire de los materiales a transformar :

(1) La formación de escoria, en la cual FeS es oxidado a FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y a SO<sub>2</sub>. Durante esta etapa de soplado, SiO<sub>2</sub> es agregada la cual se combina con FeO y parte del Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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.SiO<sub>2</sub>) saturada con magnetita es evacuada del convertidor en esta etapa; el principal producto formado es el metal blanco, Cu<sub>2</sub>S impuro.

(2) La etapa de formación de cobre, en la cual, los sulfuros remanentes de la etapa de soplado a escoria son oxidados a  $\text{SO}_2$ . El principal producto de esta etapa de soplado es el cobre ampoloso.

Las reacciones llevadas a cabo en las dos etapas de conversión son exotérmicas, siendo el exceso de calor generado en el convertidor aprovechado para la fusión de materiales fríos (materiales ricos en cobre) lograndose un equilibrio térmico en el convertidor, y permitiendo la recuperación de cobre a partir de estos materiales. La etapa de soplado de los sulfuros de cobre y hierro,  $\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}$ , tiene una acción preferencial en la oxidación del  $\text{FeS}$  a  $\text{FeO}$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Cualquier fracción de  $\text{Cu}_2\text{O}$  formado es resulfurado a  $\text{Cu}_2\text{S}$  mediante la siguiente reacción:

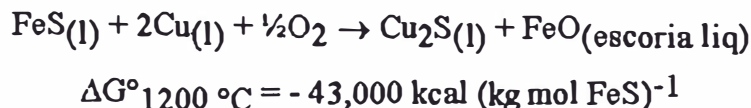


siendo la constante de equilibrio de esta reacción :

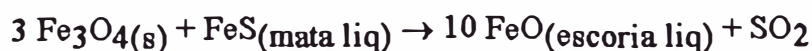
$$K = \frac{a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{S}}}{a_{\text{FeS}} \cdot a_{\text{Cu}_2\text{O}}}$$

igual a  $10^{+4}$  a  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual muestra que el  $\text{FeS}$  sulfurará casi completamente al  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Consecuentemente se demuestra que al finalizar la etapa de soplado a escoria, la baja en la concentración del  $\text{FeS}$  implica un decrecimiento en su actividad lo cual origina una tendencia a la formación de  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

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



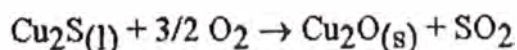
Una de las reacciones más importantes durante esta etapa, es la formación de magnetita. A pesar que la magnetita es un compuesto deseado durante la etapa de soplado en un convertidor ya que forma capas en las paredes protegiendo de esta manera el ladrillo refractario, una excesiva formación de ésta genera escorias muy viscosas las cuales tienden al atrapamiento de mata, aumentando la cantidad de cobre retornado a los hornos. La tendencia de formación o reducción de magnetita dentro del convertidor esta representada mediante la siguiente reacción :



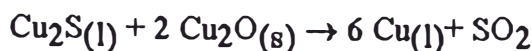
cuya constante de equilibrio es : 
$$K = \frac{(a_{\text{FeO}})^{10} \cdot p_{\text{SO}_2}}{(a_{\text{Fe}_3\text{O}_4})^3 \cdot a_{\text{FeS}}}$$

y es igual a  $10^{-4}$  a  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . La formación de magnetita es controlada con la adición  $\text{SiO}_2$  en esta etapa, disminuyendo la actividad del  $\text{FeO}$  la reacción tiende a desplazarse a la derecha. La formación de magnetita es favorecida al final de esta etapa, la baja concentración de  $\text{FeS}$  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 :



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



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



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

El proceso de conversión es llevado a cabo hasta que aparecen trazas de  $\text{Cu}_2\text{O}$  aparecen, en dicho momento el metal líquido puede contener hasta 1.8 % de oxígeno.

#### **2.1.4 Moldeo del cobre ampolloso**

En la sección moldeo es donde se procesa el cobre producido en los convertidores, obteniéndose barras de cobre ampolloso como producto final de la Fundición; con un contenido promedio de 99.2 % de cobre. Esta sección de moldeo esta compuesta por dos plantas ubicadas al sur y norte del corredor de convertidores. Normalmente se transfiere un promedio de 32 ollas de cobre ampolloso de los convertidores a las plantas de moldeo, moldeándose en los turnos "B" (15:00 a 23:00 horas) y "C" (23:00 a 07:00 horas) un promedio de 1,210 barras por día, cada una con un peso promedio de 650 kilogramos, lo cual indica una producción de 740 toneladas métricas de cobre ampolloso por día.

Cada planta cuenta con dos hornos de retención de 3.96 m  $\varnothing$  x 10.97 m L calentados con petróleo residual Nº 6; una rueda de moldeo con 21 moldes de 0.3 revoluciones por minuto y un sistema de enfriamiento que utiliza agua de mar, primero en los moldes y después en los dos tanques de enfriamiento. Las barras son



sacadas de la rueda con una grúa tenaza de doble pistón. Se usa como desmoldante los finos del proceso de cola de las concentradoras de Toquepala y Cuajone ("Sílica"). Estas barras son sacadas del tanque de enfriamiento por una grúa puente de 7.5 toneladas métricas de capacidad y puestas sobre la plataforma de concreto para su limpieza y codificación. Después son enviadas a la Refinería de Cobre de Ilo para su posterior tratamiento o directamente al Puerto para su respectivo embarque.

#### **2.1.4.1 Descripción de la planta**

En la sección moldeo se cuenta con el siguiente equipo

(1) Hornos de retención, por cada planta, se tienen dos hornos de 3.96 m  $\varnothing$  x 11 m L. Los de la planta Sur son Treadwell y los de la planta Norte Allis Chalmers. Un horno esta en operación y el otro permanece en espera o en reparación. Son calentados con petróleo residual N° 2, consumiendo 0.45 m<sup>3</sup>/hora; tienen una capacidad promedio de 276 toneladas métricas, que equivale a 9 ollas de cobre (ollas de 5.24 m<sup>3</sup>). Usan como revestimiento interior ladrillo básico (cromo-magnesita) del tipo nucon 60.

(2) Ruedas de moldeo, existen dos ruedas de moldeo marca Fuller Company, de 0.3 revoluciones por minuto, originalmente el diseño estaba para 25 moldes, pero actualmente trabajan solamente con 21 moldes, dejando un espacio para la limpieza de las rebabas de la cuchara, así como para solucionar los problemas de las gatas en el momento de la operación.

(3) Grúas para levantar barras y Sistema de enfriamiento, se cuenta con dos grúas para levantar barras del tipo tenaza con doble pistón, marca Parker Hannilin; y un

Sistema de enfriamiento para enfriar las barras, donde se usa agua de mar en los dos tanques de enfriamiento y en el rociado tipo spray sobre las barras.

#### **2.1.4.2 Operación de moldeo**

El cobre producido en los convertidores es transportado mediante ollas de 5.24 m<sup>3</sup>, a cualquiera de los cuatro hornos de retención (dos para cada rueda de moldeo). Los hornos están instalados en las partes laterales de los convertidores Nº 1 y Nº 7, y en medio de ellos se encuentra instalada una rueda de moldear que tiene capacidad para 21 moldes matrices, ambas producen barras tipo ánodos de 650 kilogramos de peso promedio. La rueda está diseñada para rotar en las dos direcciones. Las barras moldeadas tienen una composición aproximada de 99.2 % de cobre y las dimensiones : 78.7 cm de altura, 65.4 cm de ancho y 16.5 cm de espesor. Se moldea un promedio de 1,210 barras por día, aproximadamente 32 ollas de 5.24 m<sup>3</sup> con una producción promedio de 740 toneladas métricas por día.

El procedimiento de moldeo está manejado desde un mismo panel de control, existiendo dos paneles de control por cada rueda de moldear. Al rotar el horno hacia la rueda de moldear, este deja caer cobre dentro de la cuchara y de allí al molde hasta el llenado del mismo, la cuchara es levantada ligeramente y la mesa gira hasta colocar un nuevo molde vacío debajo de la misma, procediendo a llenarlo repitiendo la operación descrita.

Es así como los moldes llenados con cobre reciben un enfriamiento progresivamente mayor conforme gira la mesa de moldear hasta llegar frente a uno de los dos tanques de enfriamiento que están llenos de agua de mar de constante

circulación y es donde son sumergidas las barras con la ayuda de una grúa de tenazas que recorre horizontalmente accionada por un pistón, luego son retiradas de los tanques por medio de una grúa y alineadas en una plataforma de cemento donde se les quita las rebabas, se numeran y pintan con el color correspondiente al lote producido.

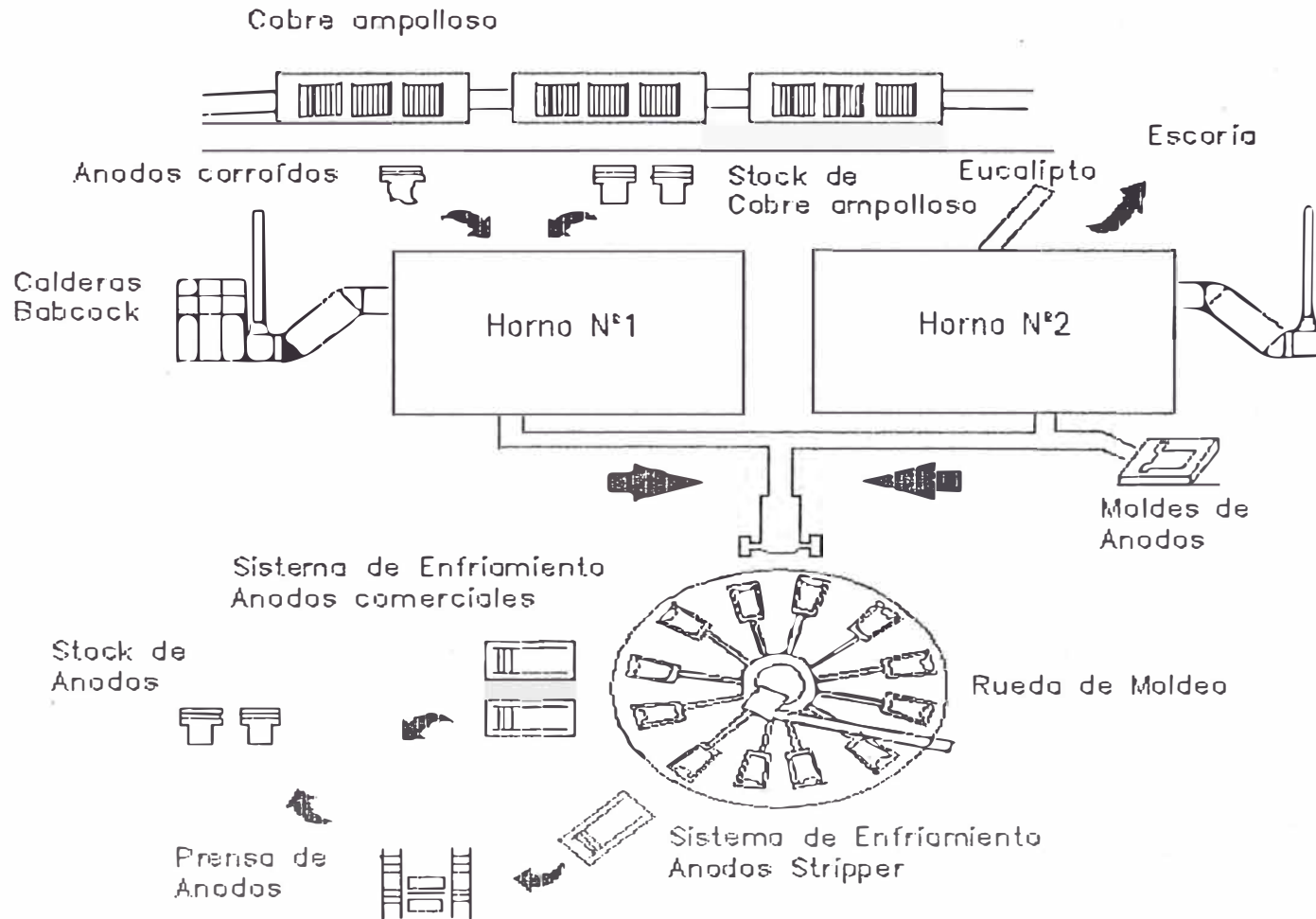
## **2.2 Descripción de operaciones en la Planta de Anodos**

La Refinería de Cobre localizada a 09 kilómetros al norte del puerto de Ilo, tiene por finalidad realizar el refino ígneo y electrolítico del cobre ampoloso proveniente de la Fundición; allí opera una planta de ánodos con una capacidad nominal de fusión de 175,200 toneladas métricas de cobre ampoloso por año, proporcionando ánodos tipo comercial o stripper, de acuerdo a las necesidades de las celdas electrolíticas, y obteniendo como producto final los cátodos de cobre electrolítico.

En la Planta de Anodos se efectúa un proceso de refino al fuego para transformar el cobre ampoloso (99.2 % de cobre) en ánodos (99.7 % de cobre) que tengan ciertas características físicas y químicas, además de tamaño, forma, superficie lisa para que puedan ser refinados en la Planta Electrolítica. La actual planta tiene capacidad nominal de producción de 233,700 toneladas métricas de ánodos de cobre por año. En la Planta Electrolítica, se realiza la última etapa de purificación del cobre para su posterior utilización industrial, para lo cual efectúa el proceso de refinado electrolítico del ánodo (99.2 % de cobre), obteniendo como producto final cátodos (99.99 % de cobre). La actual planta tiene una capacidad de producción de 190,000 toneladas métricas de cátodos de cobre por año.



Fig. 2.5 Diagrama de Flujo de la Planta de Anodos



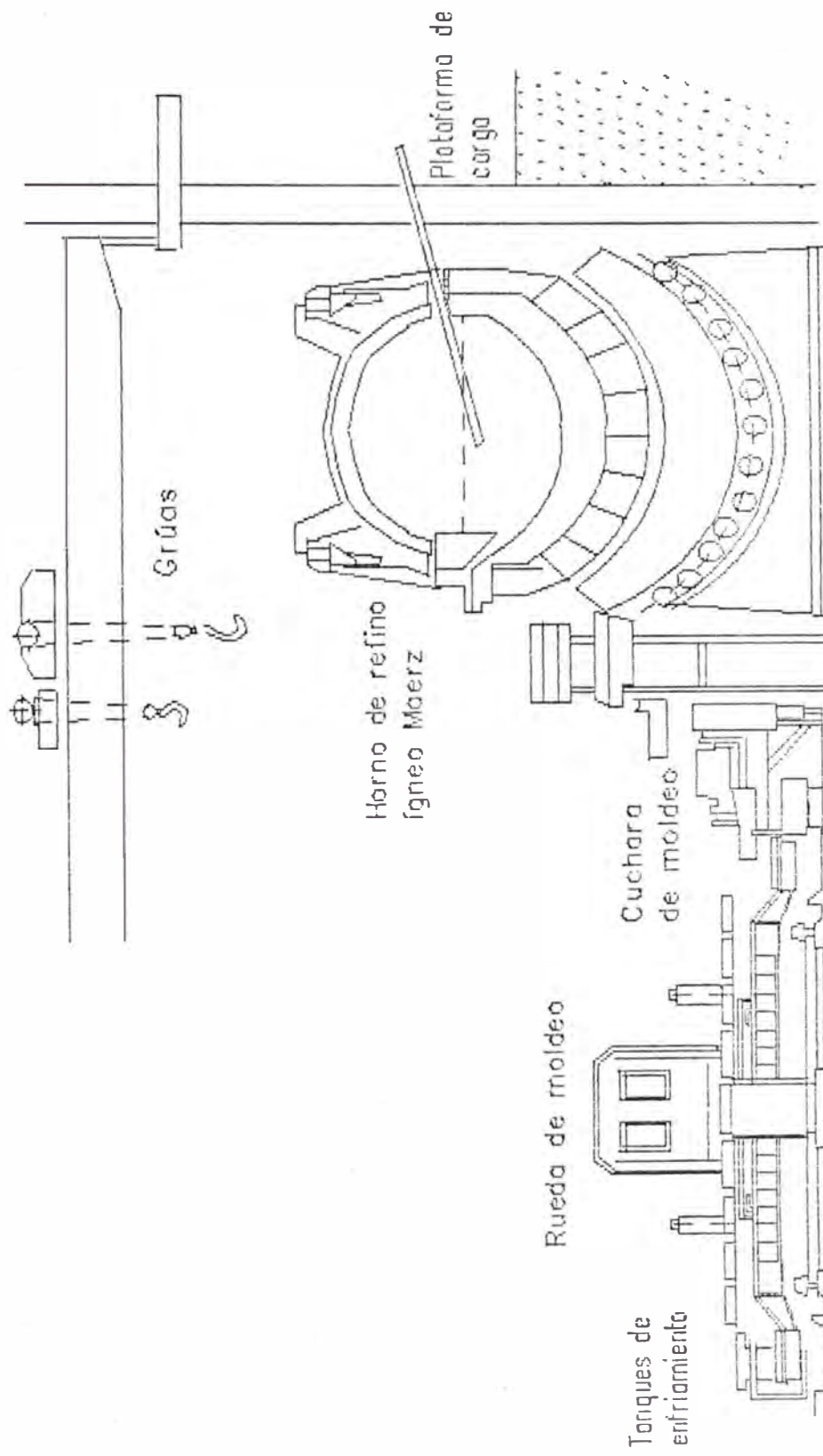
Adicionalmente, existen instalaciones para la remoción de níquel, lixiviación de lodos anódicos y producción de oro, plata y selenio. En la Figura 2.5 se muestra el diagrama de flujo de la planta de ánodos.

### **2.2.1 Descripción del proceso actual**

La refinación a fuego se realiza en hornos de fusión tipo basculante, donde se alimenta una carga sólida constituida de barras de cobre ampoloso, ánodos corroídos, desechos de celdas electrolíticas y recirculante de moldeo y utilizando la combustión del petróleo como medio de generación de calor. Estos materiales son fundidos por el calor transferido de los gases calientes que atraviesan toda la longitud del baño del horno.

Durante la refinación, el cobre ampoloso fundido es sometido a un proceso de oxidación mediante la inyección de aire al baño, con el propósito de remover las impurezas; y posteriormente un proceso de reducción utilizando un quemador con petróleo-vapor e introduciendo palos de madera en el baño, con la finalidad de regular el contenido de oxígeno. Los productos del horno son drenados separadamente mediante el basculamiento del horno, la escoria fundida, que es descargada por la parte lateral superior del horno, y el cobre líquido que a través de canales, son evacuados a una rueda de moldeo, obteniéndose como producto final del refino ígneo las barras de ánodos de cobre. En la Figura 2.6 se ilustra la Planta de Anodos.

Fig. 2.6 Diagrama de la Planta de Anodos



### **2.2.2 Materias primas**

En la Refinería de Cobre, la principal materia prima de la planta de ánodos es el cobre ampolloso proveniente de la Fundición de Ilo y que tiene la forma de barras con orejas, presentando la superficie de una de las caras protuberancia ó ampollas, producto de la presencia de azufre, oxígeno y otras impurezas, que durante la solidificación quedan atrapadas en el metal.

Las barras de cobre ampolloso tienen un peso promedio de 650 kilogramos y presenta como principales impurezas los siguientes elementos : azufre, oxígeno, plomo, fierro, níquel, arsénico, antimonio, selenio, telurio y otros constituyentes en cantidades despreciables. Los desechos de la planta electrolítica, recirculante de moldeo, cátodos de primera y segunda liberadora también constituyen parte de la materia prima, usada en la obtención de ánodos de cobre.

### **2.2.3 Hornos de fusión y refinación**

La Planta de Anodos cuenta con dos hornos de fusión tipo basculante Maerz, cada una de 370 toneladas métricas de capacidad con profundidad del baño de 850 mm y superficie de 59.5 m<sup>2</sup>. La infraestructura de los dos hornos está constituida con planchas de acero, revestidos interiormente con ladrillos refractarios de diferentes tipos según la función que realiza, tienen dos puertas de alimentación, una puerta para introducir los troncos de eucalipto y otra para la escorificación contando para esto con su canal respectivo.

Cada horno tiene dos quemadores de petróleo de alta presión, atomizados por aire suministrado por sus ventiladores respectivos y colocados en la parte superior del horno. Los quemadores utilizan como combustible, el petróleo residual Nº 6, con un flujo aproximado de 1.48 m<sup>3</sup> por tonelada métrica de carga y junto con el aire son regulados por un instrumento de control automático y manual, pudiendo además regularse el combustible a través de válvulas manuales colocadas en la red respectiva de distribución. La temperatura inferior y presión del horno son medidas y registradas por instrumentos de control automático.

Se considera una disponibilidad de ánodos para la refinación electrolítica aproximadamente del 81 % de la producción de cátodos y una generación de desechos de ánodos de las celdas electrolíticas del 17 % de los ánodos requeridos para la refinación. Cada horno de fusión tienen los siguientes parámetros de operación por colada : (1) La carga total de materiales es 363.93 TM, siendo 258.98 TM de cobre ampoloso, 49.73 TM de ánodos (corroídos y remanente) y 55.22 TM de cátodos de cobre, (2) El consumo de petróleo residual Nº 6 es 35.47 m<sup>3</sup>, siendo utilizado para la etapa de reducción 2 m<sup>3</sup> de este combustible, y 2.4 TM de palos de eucalipto, (3) Los productos de la refinación ígnea son 356.79 TM de ánodos y 7.14 TM de escoria.

#### **2.2.4 Proceso de refinación ígnea**

El ciclo de refinación a fuego del cobre ampoloso en la Planta de Anodos dura aproximadamente 24 horas, realizando las siguientes etapas de operación carga, fusión, oxidación, escorificación, reducción, y moldeo.

#### **2.2.4.1 Carga del cobre ampoloso**

La Planta de Anodos recepciona las barras de cobre producidas por la Fundición de Ilo, las cuales llegan cargadas sobre plataformas del ferrocarril industrial con un peso global aproximado de 460 toneladas métricas de cobre ampoloso. Una vez ubicadas las plataformas en la línea férrea adyacente a la planta de ánodos, las barras son descargadas mediante una grúa telescópica de 10 toneladas métricas de capacidad, la cual se desplaza a lo largo de la zona de recepción realizando la rotación necesaria para descargar las barras de cobre en la zona de almacenamiento. Posteriormente estas barras de cobre ampoloso son cargadas al horno de fusión basculante Maerz junto con ánodos corroídos, desechos, recirculante de moldeo, de acuerdo a la elaboración de un programa de carga

La operación de carga a los hornos se realiza con tres maquinas : (1) la maquina autocargadora que tiene una horquilla receptora de material y evacúa a través de una chapa de empuje por accionamiento totalmente hidráulico con una capacidad neta de carga de 1.6 toneladas métricas, (2) un montacarga toyota de 4 toneladas métricas de capacidad, y (3) cuando se trata de material pesado (moldes) el montacarga de 10 toneladas métricas de capacidad.

Para cargar los hornos de fusión, se tiene en cuenta, que el material más liviano, consignado en el programa de carga es el más adecuado para introducirlo y colocarlo en la solera, la que se encuentra con parte de cobre fundido y que es el remanente de la colada anterior, por consiguiente se carga primero a los ánodos corroídos después el recirculante de moldeo, desecho de celdas electrolíticas,

cátodos de primera y segunda liberadora, y al cabo de una hora aproximadamente, se procede con la carga de las barras de cobre ampoloso, sobre el cobre fundido. Terminada la primera carga pasa a una fusión parcial para luego realizar la segunda carga debido a que el volumen ocupado por el cobre ampoloso sólido se desocupa al fundirse; del mismo modo se procede con las siguientes cargas.

Tabla 2.10 Análisis Químico de la carga de los hornos

Elemento	Cobre Ampoloso	Cobre Anodico	Cobre Cático
Cu, %	99.265	99.730	99.995
O <sub>2</sub> , %	0.190	0.150	0.003
S, ppm	230	30	6
Se, ppm	110	130	< 1
Fe, ppm	30	10	< 1
Ni, ppm	160	100	< 1
Pb, ppm	30	20	< 1
Zn, ppm	< 1	< 1	< 1
As, ppm	70	200	< 1
Sb, ppm	50	60	< 1
Bi, ppm	10	10	< 1
Te, ppm	150	10	< 1

#### 2.2.4.2 Fusión

En esta etapa del proceso de refino ígneo del cobre ampoloso, la carga sólida del horno de fusión se transforma en líquido, alcanzando el horno una temperatura promedio de 1200 a 1300 °C, siendo la cantidad de calor requerida de 23 Mcal/h. La fusión de la carga se realiza con llama tipo oxidante, para lo cual se requiere de una presión en el horno aproximada de 49 Pa y un exceso de 10 % de aire. La etapa de fusión total de la carga sólida del horno dura 4 horas, lo cual da un acumulado entre carga y fusión aproximadamente de 10 horas.

**Tabla 2.11 Análisis Químico y Propiedades Físicas del Petróleo**

Elemento	%
Carbono	85.90
Hidrogeno	10.70
Oxígeno	0.70
Nitrógeno	1.64
Azufre	1.06
Grav. específica (gr/cm <sup>3</sup> )	0.98
Poder calorífico (Kcal)	10,631.94

#### **2.2.4.3 Oxidación**

La etapa de oxidación se realiza con el objetivo de eliminar las impurezas presentes con el cobre en forma de gases o compuestos escorificables, para lo cual se inyecta aire comprimido al baño a través de 4 tubos de acero de 3 cm Ø, a una presión de 2 Kpa y una composición aproximada de 21 % de oxígeno y 79 % de Nitrógeno. Se insufla aire al baño, con la finalidad de que las impurezas se oxiden, aprovechando la poca afinidad que existe entre el cobre y el oxígeno, en contraste con la gran afinidad que existe entre éste y las impurezas. La acción oxidante del óxido de cobre en el horno hace que algunas impurezas traten de formar las escorias, y otras de formar gases (anhidrido sulfuroso) y algunas se resisten a la acción del fuego y son eliminadas en la electrólisis.

#### **2.2.4.4 Escorificación**

En la etapa de escorificación, se procede con la evacuación de la escoria formada por las impurezas del horno, compuestas principalmente por óxidos. Para escorificar se bascula el horno de fusión hacia el lado de la compuerta de escorificación situada en forma opuesta a los quemadores y se procede a evacuar



la escoria en forma manual mediante cucharas de fierro especiales debido a su viscosidad. Esta escoria está compuesta por óxidos básicos y algunos compuestos ácidos formados durante el proceso del horno, tales como : FeO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO que se eliminan fácilmente y SnO, NiO, ZnO que se eliminan difícilmente.

Tabla 2.12 Análisis Químico de la Escoria

Elemento	%
Cu	36.835
S	0.077
Se	0.021
Fe	1.265
Ni	0.039
Pb	0.057
Zn	0.010
As	0.053
Sb	0.020
Bi	0.002
Te	0.010
CaO	0.062
SiO <sub>2</sub>	26.220
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.930

#### 2.2.4.5 Reducción

El objetivo de este proceso es bajar la cantidad de oxígeno existente en el baño a un rango de 1,500 ppm permisible en el ánodo. El oxígeno es eliminado en forma de CO<sub>2</sub>, de acuerdo a dos etapas, la primera utilizando una mezcla de petróleo-vapor, mediante un quemador que se introduce a través del baño y ocasiona la descomposición del petróleo en sus hidrocarburos y compuestos debido a la alta temperatura.

En la segunda etapa, la reducción se realiza utilizando palos de eucalipto, que son introducidos al baño mediante un elevador y produce la destilación de la madera, ocasionando la descomposición de hidrocarburos, liberación de H<sub>2</sub> y formación de monóxido de carbono.

Tabla 2.13 Análisis Químico del reductor (Eucalipto)

Elemento	%
Carbono	49.50
Hidrógeno	6.30
Oxígeno	43.10
Nitrógeno	1.10

#### 2.2.4.6 Moldeo del cobre

Es la etapa final del proceso de refinación ígnea en la cual se moldea la carga del horno en forma de barras con un dispositivo completamente automático, se realiza anualmente aproximadamente 655 coladas (330 días de operación) y su producción es de 233,700 toneladas métricas de ánodos de cobre.

La sección moldeo cuenta con una máquina de moldear horizontal tipo carrusel de la firma Demag, con un sistema de vaciado automático Outokumpo de doble cuchara de colada y una rueda de 26 moldes. Tiene una capacidad de 80 toneladas métricas por hora, moldeando simultáneamente 2 ánodos en 35 segundos. Además, tiene un sistema de rociado de solución desmoldante, y un sistema de refrigeración, donde diez secciones de éstos moldes están destinados para el enfriamiento con agua por la parte superior, siendo a partir del tercer molde respecto a la cuchara de moldeo.

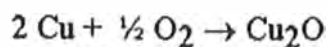
El moldeo consiste en bascular el horno, accionando los mandos desde la cabina de la rueda de moldeo, de modo que el cobre líquido salga del horno por la piquera o agujero de colada y a través de los canales, llegue a las cucharas de moldeo, desde las cuales el cobre será vaciado sobre los moldes para darle la forma de ánodos y en forma continuada son refrigerados con agua y colocados directamente en dos tanques de enfriamiento, donde son removidos periódicamente. Finalmente, los ánodos se ubican en una prensa, donde se endereza el cuerpo y las orejas del ánodo, dándole una buena verticalidad y no produzca cortos circuitos en la planta electrolítica. El basculamiento del horno tiene su límite en 25°, punto en el cual el horno debe quedar con 10 toneladas métricas de cobre remanente.

Se moldea ánodos comerciales de 384 kilogramos de peso y ánodos stripper de 410 kilogramos de peso, siendo los primeros utilizados directamente para la producción en las celdas comerciales, mientras que los últimos se destinan a la obtención de láminas de arranque, las que debidamente acondicionadas sirven de cátodos iniciales en las celdas comerciales en la planta electrolítica.

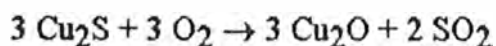
### **2.2.5 Físico-Química de la refinación ígnea**

Las reacciones químicas que se desarrollan durante la refinación ígnea son de acuerdo a los objetivos del proceso, es decir la disminución de impurezas presentes en el cobre ampolloso, principalmente el azufre, oxígeno y fierro, y la eliminación del oxígeno disuelto en el cobre durante la conversión y refinación.

La oxidación se desarrolla en la superficie de las burbujas de aire, por cuanto la velocidad de oxidación es proporcional a la concentración de los metales en el baño, siendo el cobre, el de mayor rapidez de oxidación.



El propósito primario de esta oxidación es la eliminación del azufre contenido en el cobre ampoloso en forma de anhídrido sulfuroso, mediante la adición de oxígeno, y al mismo tiempo la disolución del oxígeno en el cobre, desarrollando de acuerdo a la siguiente reacción :

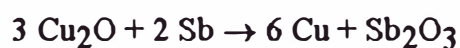
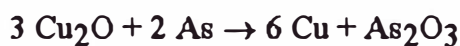


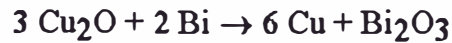
La relación de equilibrio de esta reacción es :

$$[\text{ S } ]_{\text{ Cu}} + 2 [\text{ O } ]_{\text{ Cu}} \rightarrow \text{ SO}_2 (\text{ g}) \quad , \text{ es decir} \quad K_E = \frac{P_{\text{ SO}_2}}{[\% \text{ S } ] \cdot [\% \text{ O } ]^2}$$

donde  $K_E$  a la temperatura de fusión (1100 °C) es 90. Este valor muestra que la presión del  $\text{ SO}_2$  a la salida de los gases del horno es aproximadamente 3 Kpa.

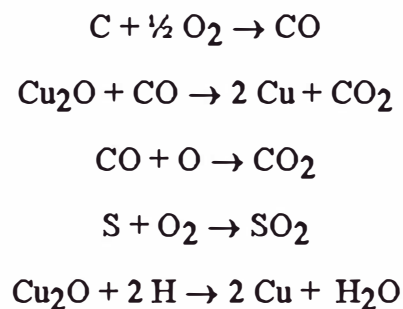
El óxido de cobre, debido a su proceso de reacción con el aire insuflado, se difunde rápidamente por todo el volumen del baño, provocando la oxidación de las impurezas y desarrollando las siguientes reacciones :





Durante el proceso de conversión y oxidación, una parte del oxígeno presente en el baño precipita como  $\text{Cu}_2\text{O}$ , siendo aproximadamente el 0.6 %. La razón para esta precipitación es la baja solubilidad del oxígeno en el cobre (0.005 % a 1000 °C, 0.003 % a 900 °C y 0.002 % a 800 °C).

El proceso de reducción tiene como objetivo bajar el contenido de oxígeno existente en el baño de cobre, utilizando como desoxidantes los hidrocarburos que se introducen a través del baño. En esta etapa se producen las siguientes reacciones



El hidrogeno es bastante soluble en el cobre líquido, y su concentración de equilibrio esta dado por :

$$K_E = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{[\% \text{H}]^2 \cdot [\% \text{O}]}$$

donde  $K_E$  tiene los valores de  $5 \times 10^{+9}$  a 1150 °C y  $15 \times 10^{+9}$  a 1083 °C. Al final del proceso de refinado ígneo, el contenido de oxígeno e hidrogeno en el cobre ánodo es 0.15 % y  $2 \times 10^{-5}$  % respectivamente.

## **CAPITULO III**

### **ALTERNATIVAS DE INCREMENTO DE LA PRODUCCION DE ANODOS**

#### **3.1 Introducción**

Dentro de la etapa de modernización y mejoramiento de los procesos de producción que realiza Southern Peru Copper Corporation, uno de los principales proyectos inmediatos es el mejoramiento de las operaciones para la obtención de barras de ánodos, lo cual involucra principalmente la eliminación de la actual operación de fusión de las barras de cobre ampoloso que se realiza en la planta de ánodos de la Refinería y llegar a la producción de barras de ánodos directamente del cobre ampoloso líquido. En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestra la distribución actual y futura de la Fundición de Ilo.

Para este proyecto se ha estimado tres alternativas que se presentan como las más apropiadas para reducir significativamente los costos de producción de ánodos : mediante la producción de ánodos en la Fundición, es decir, la instalación de una nueva planta de ánodos contando con todas las facilidades operativas (Alternativa A) ó la modificación de la actual planta de moldeo norte de la Fundición (Alternativa B); y el transporte de cobre ampoloso líquido de la Fundición a la Refinería por medio de carros torpedo (Alternativa C).

Fig. 3.1 Distribución actual de la Fundición

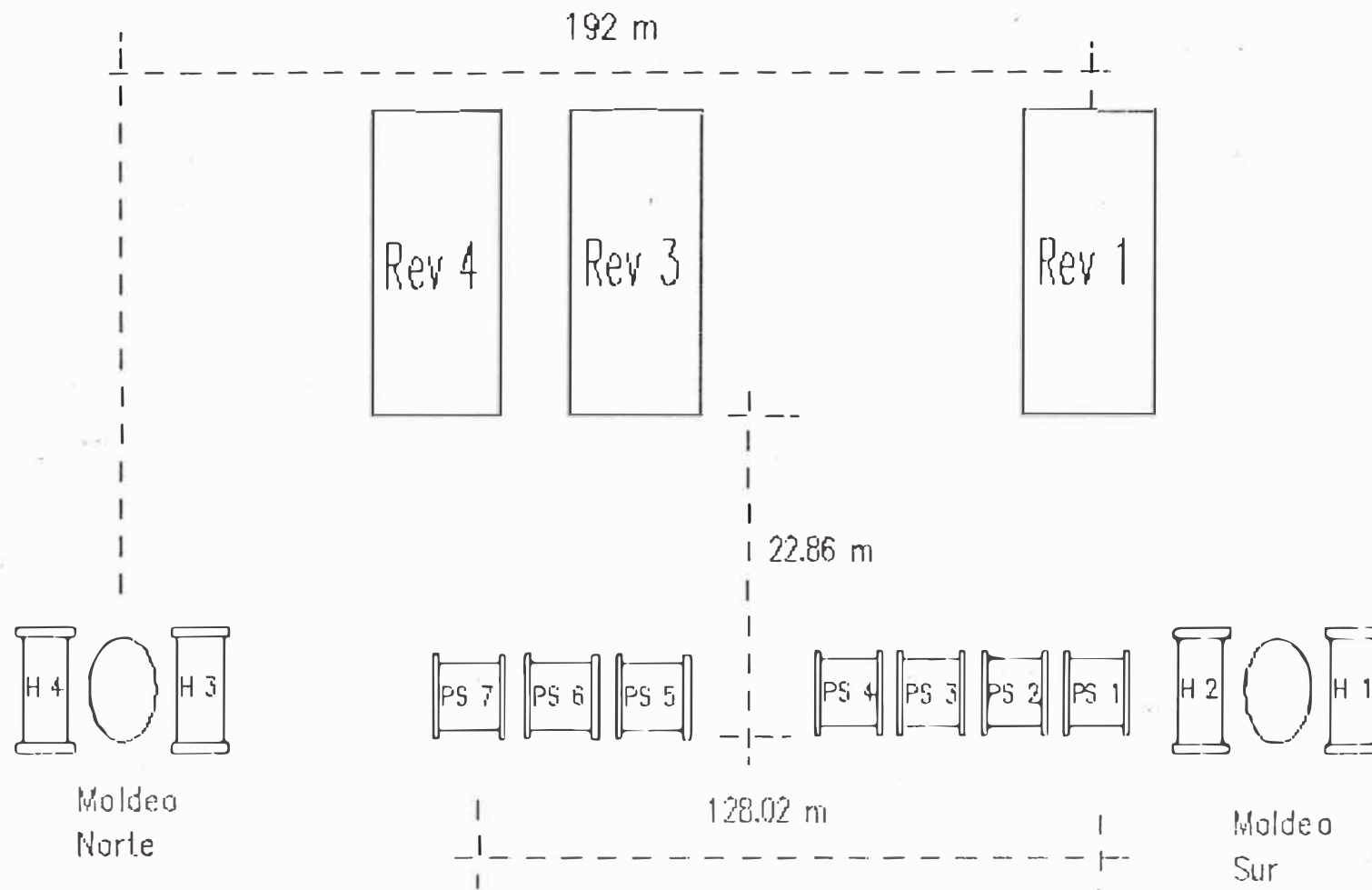
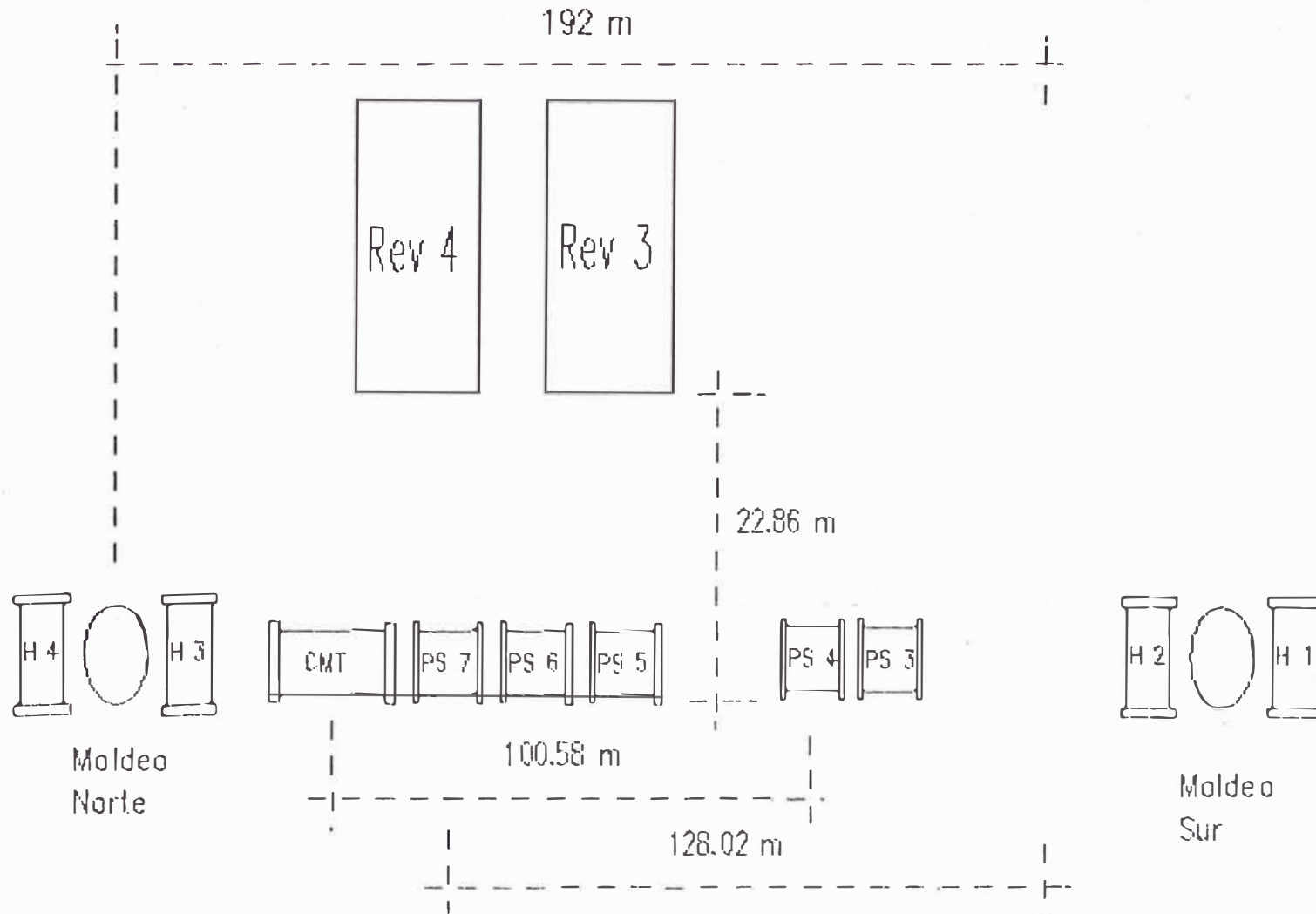


Fig. 3.2 Distribución futura de la Fundición





### **3.2 Producción de ánodos en la Fundición**

De acuerdo a las alternativas que involucran la instalación de una planta de ánodos y la modificación de la planta de moldeo norte de la Fundición, los cambios necesarios en el flujo de la producción de ánodos serían los siguientes. La actual planta de ánodos de la Refinería sería dejada fuera de operación, siendo el vapor producido solamente por fuego directo en el caldero Babcock mientras en la Fundición, la actual planta de moldeo sur sería mantenido con una disponibilidad parcial en caso de emergencia para la producción de barras de cobre ampolloso. En cada caso los ánodos moldeados serían prensados y alineados en la actual maquina, que se encuentra localizada en la planta de ánodos de la Refinería.

Estas alternativas incluyen la recepción y tratamiento de los desechos de ánodos producidos en la planta electrolítica de la Refinería. Para este propósito será considerada una nueva maquina para el lavado de desechos de ánodos y para su posterior descarga en forma de paquetes que serán fácilmente transportadas por ferrocarril desde la Refinería hasta la Fundición. Estos desechos de ánodos serán tratados en la Fundición, el 50 % como material frío para los convertidores Peirce-Smith y el otro 50 % para el reactor Convertidor Modificado Teniente (CMT).

Realizar la producción de ánodos en la Fundición ha considerado dos capacidades de refinación electrolítica : la actual capacidad de 190,000 toneladas métricas de cátodos de cobre por año, y una futura capacidad de 224,000 toneladas métricas de cátodos de cobre por año. Para el primer caso se tiene dos posibilidades : Instalación de una nueva planta de ánodos en el lado norte de la

Fundición ó la modificación de la actual planta de moldeo norte de la Fundición, mientras el segundo caso, contempla la instalación una planta de ánodos con mayor capacidad de producción. Para ambas capacidades de producción de cátodos se considera una disponibilidad de ánodos para la refinación electrolítica aproximadamente del 81 % de la producción de cátodos y una generación de desechos de ánodos de las celdas electrolíticas del 17 % de los ánodos requeridos para la refinación.

Tabla 3.1 Requerimientos y recirculación de ánodos para 190,000 TM cátodos

Descripción	Instalación de una planta de ánodos y Modificación de la planta de moldeo
Producción de Cobre ampoloso	272,160
Anodos requeridos por la Refinería (123 % de la producción de cátodos)	233,700
Recirculación de ánodos para la Fundición (4 % de la producción de ánodos)	9,348
Desechos de Refinería para Fundición (17 % de la producción de cátodos)	32,300
Cobre ampoloso para comercialización	80,108

En este análisis, la transferencia de los equipos existentes de la Refinería a la Fundición no son considerados, por las siguientes razones técnicas : (1) Los hornos basculantes de la Refinería, tienen la función de fundir y refinar el cobre ampoloso y es por tanto es considerado innecesario y complejo su uso en la Fundición. Su utilización incrementará los costos de instalación y de operación, (2) La Rueda de moldeo de la planta de ánodos de la Refinería requiere comúnmente de extensas campañas de reparaciones y (3) La nueva localización del equipo existente producirá en algunos casos pérdida de producción de la Refinería.

### 3.2.1 Instalación de una planta de ánodos

Esta alternativa considera la instalación de una planta de ánodos en el lado norte del corredor de convertidores de la Fundición, con una capacidad de 316,816 toneladas métricas por año, necesaria para poder abastecer los futuros incrementos de capacidad de refinación de la planta electrolítica (224,000 TM por año de cátodos). Se contempla la instalación de dos hornos de refino ígneo de 4.57 m Ø x 13.72 m L y un nuevo sistema de rueda de moldeo de 32 moldes (100 toneladas métricas por hora). Se considera una disponibilidad de ánodos para la refinación electrolítica aproximadamente del 81 % de la producción de cátodos y una generación de desechos de ánodos de las celdas electrolíticas del 17 % de los ánodos requeridos para la refinación. En la Figura 3.3 se muestra la ubicación de la instalación de una nueva planta de ánodos.

Tabla 3.2 Producción de la nueva planta de ánodos

Descripción	TM
Producción de Cobre ampoloso	272,160
Producción de cátodos	224,000
Producción de ánodos	316,816
Anodos requeridos por la Refinería (123 % de la producción de cátodos)	275,520
Recirculación de la planta de ánodos para la Fundición (2% de la producción de ánodos)	6,336
Desechos de Refinería para Fundición (17 % de la producción de ánodos)	38,080
Anodos de cobre para comercialización	41,296
Carga a los hornos de Refinación ígnea (102 % de los ánodos requeridos)	323,152
Anodos por colada	327
Coladas por año	988
Coladas por semana	19

Fig. 3.3 Instalación de planta de áridos en la Fundación

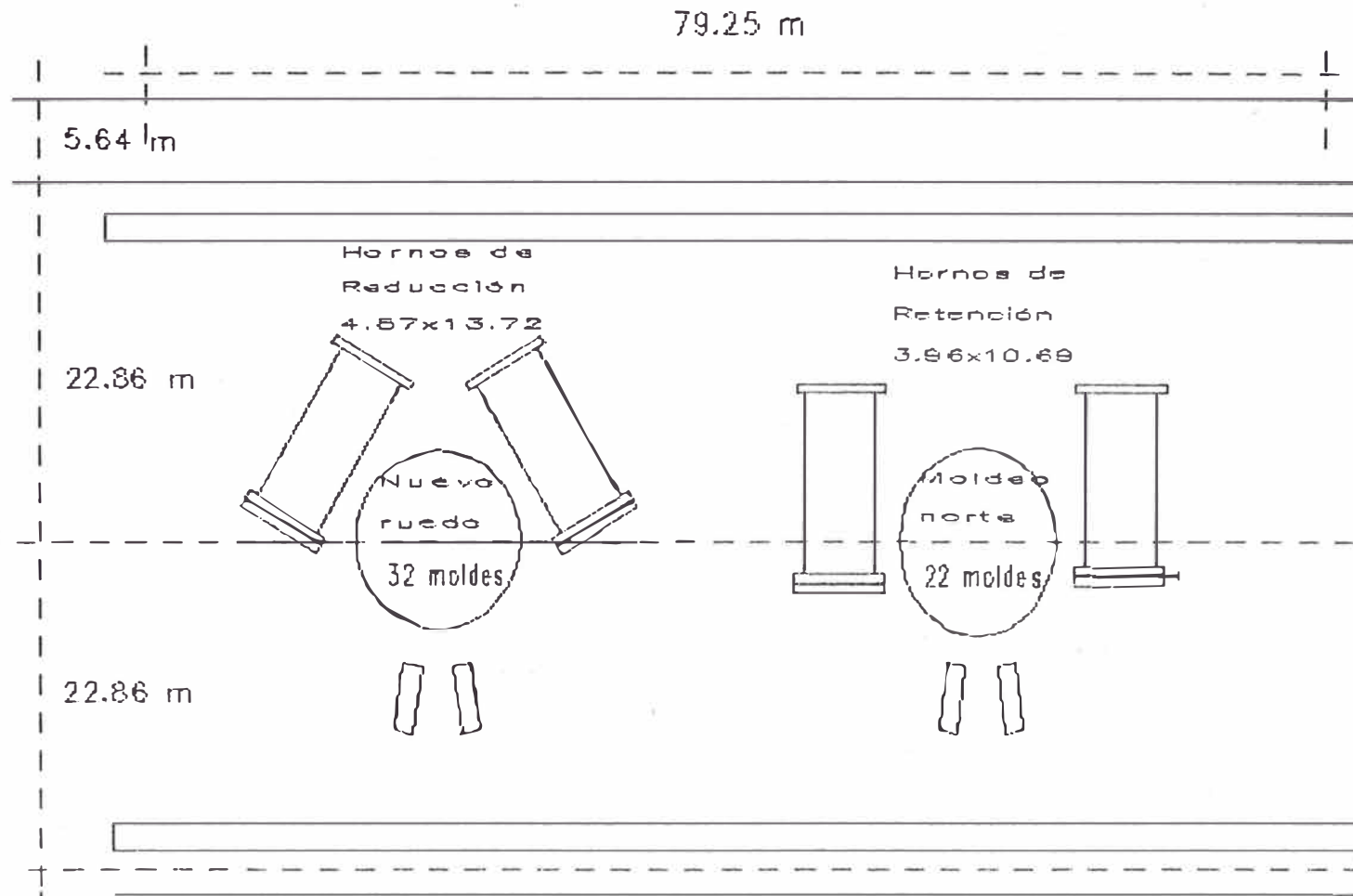


Tabla 3.3 Características del proceso de la nueva planta de ánodos

Etapa del Proceso	Tiempo, horas
Carga	8.0
Oxidación (simultáneamente con la carga)	2.0
Reducción (30seg/TM cobre ampoloso)	3.0
Moldeo de ánodos de cobre (Capacidad de 100 TM/h)	3.3
Limpieza	1.0
<b>Total</b>	<b>17.3</b>

En la Figura 3.4 se muestra las etapas del proceso de refinación con la nueva planta de ánodos.

### 3.2.2 Modificación de la planta de moldeo

Esta alternativa considera el cambio de las condiciones actuales de la planta de moldeo norte para la producción de ánodos requeridos por la planta electrolítica de la Refinería y comprende principalmente la modificación de los actuales hornos de retención (3.96 m Ø x 10.67 m L) de la planta de moldeo norte, la rueda de moldeo norte (22 moldes); y la instalación de equipos auxiliares. La producción de ánodos será 233,700 toneladas métricas por año, necesario para la actual capacidad de refinación de planta electrolítica (190,000 TM por año). En la Figura 3.5 se muestra la ubicación de la modificación de la actual planta de moldeo norte.

Tabla 3.4 Producción de la planta de moldeo modificada para refinar

Descripción	TM
Anodos requeridos por la Refinería (123 % de la producción de cátodos)	233,700
Carga a los hornos de refinación	238,374
Anodos por colada	235
Coladas por año	1036
Coladas por semana	20

Fig. 3.4 Etapas del proceso de refinación con la nueva planta de ánodos

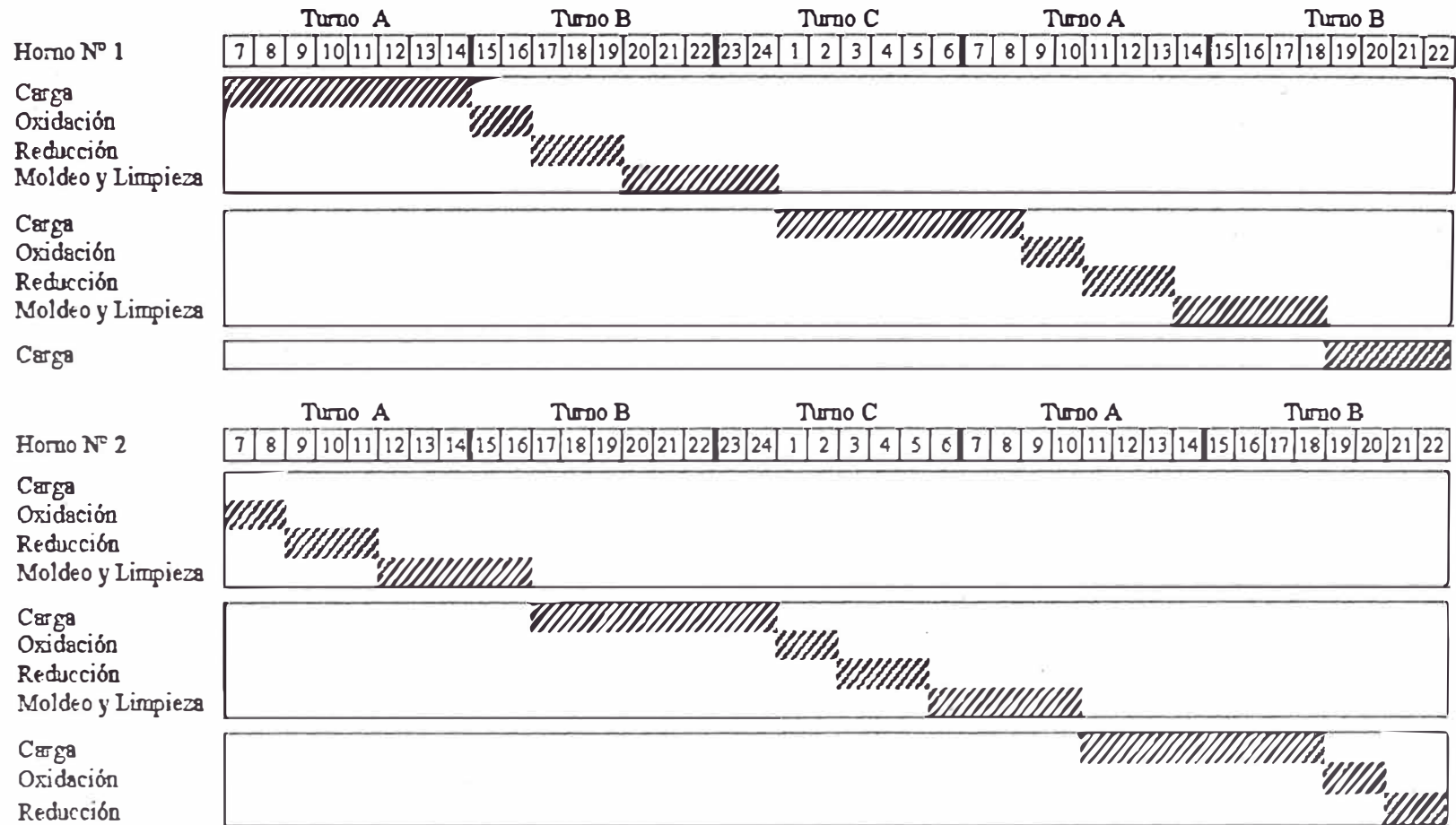


Fig. 3.5 Modificación de la planta de moldeo norte de la Fundición

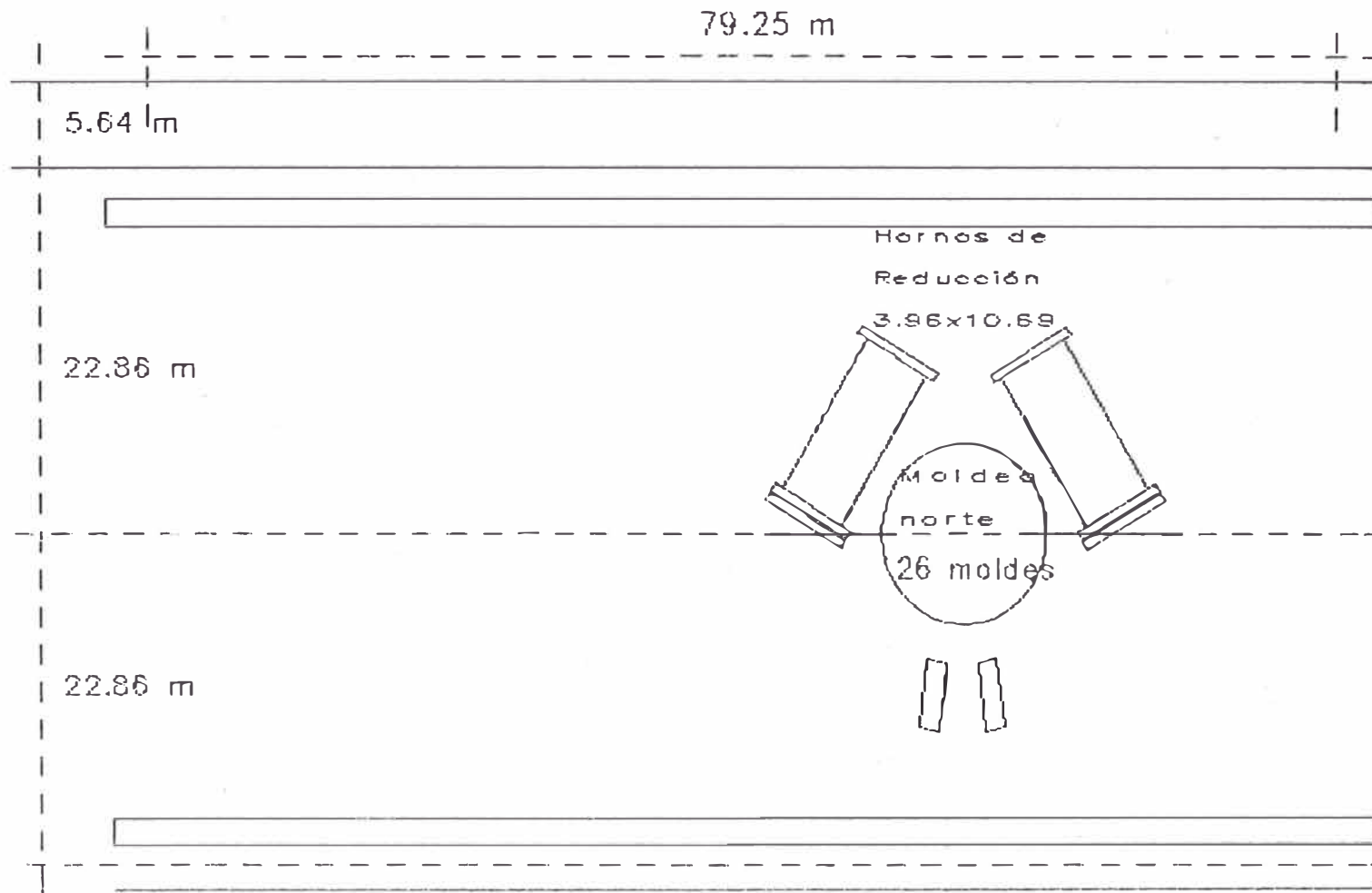




Tabla 3.5 Características del proceso de la planta de moldeo modificada

Etapa del Proceso	Tiempo, horas
Carga (9 ollas)	6.5
Oxidación (simultáneamente con la carga)	2.0
Reducción (30seg/TM cobre ampoloso)	1.9
Moldeo de ánodos de cobre (Capacidad 50 TM/h)	4.7
Limpieza	1.0
<b>Total</b>	<b>16.1</b>

En la Figura 3.6 se muestra las etapas del proceso de refinación para la planta de moldeo modificada.

### 3.2.3 Costo de inversión

Los costos de la infraestructura y equipos (costo capital fijo) requerido por las alternativas que involucren el uso de una planta convencional de refinación a fuego y un sistema de moldeo necesario para la producción de ánodos en la Fundición, son los siguientes :

#### **Alternativa A.-**

Esta alternativa, requerirá de la instalación de 2 hornos de refinación ígnea de 4.57 m Ø x 13.72 m L, un nuevo sistema de rueda de moldeo de 32 moldes (100 toneladas métricas por hora), modificación y/o extensión de la línea (35 metros) de la grúa de convertidores (lado norte del corredor), extensión de la planta de moldeo norte (35 metros), instalación de equipos adicionales y servicios auxiliares.

Fig. 3.6 Etapas del proceso de refinación para la planta de moldeo modificada

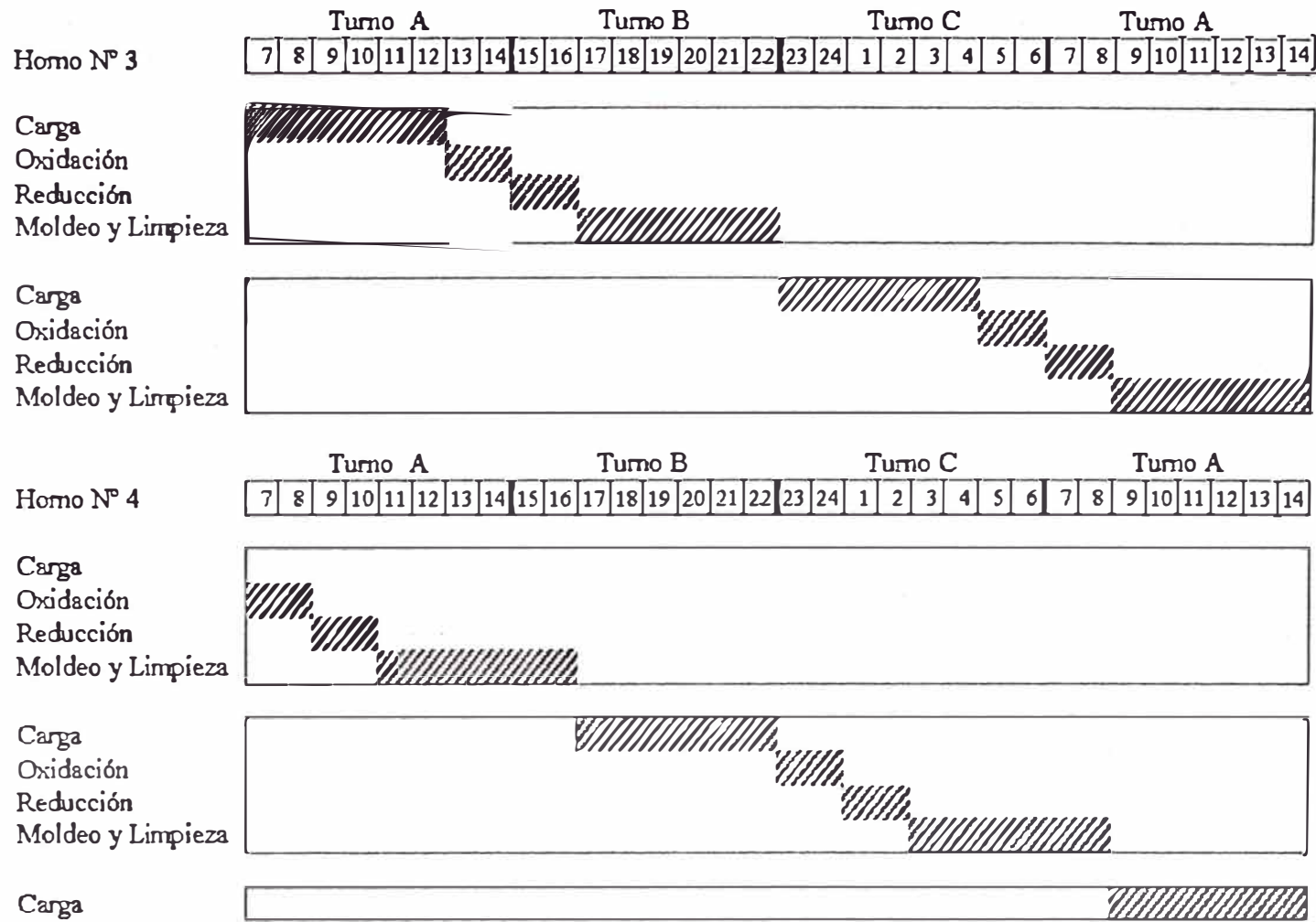


Tabla 3.6 Costo de la infraestructura principal para la instalación

Descripción	Costo (US\$)
2 hornos de refinación (ínea (c/u 4.57m Ø x 13.72m L)	9'592,700
Infraestructuras de soporte para los hornos	
Sistema de control del giro de los hornos	
Sistema de líneas de tuberías para la oxidación y reducción	
Mecanismo neumático de emergencia para la rotación	
Instrumentación para el control de los hornos	
Quemador de petróleo-vapor	
Revestimiento de ladrillos refractarios	
1 Sistema de Moldeo con capacidad de 100 TM por hora	5'473,000
Rueda de moldeo de 32 moldes de operación hidráulica	
Cuchara de doble sistema de colada	
Sistema de moldeo y enfriamiento progresivo	
Tanques de enfriamiento de ánodos	
Sistema hidráulico	
Sistema de control electrónico	

Tabla 3.7 Costo de los equipos adicionales para la instalación

Descripción	Costo (US\$)
2 Montacargas c/u de 10 TM de capacidad	210,000
1 Grúa puente, de 10 TM de capacidad para el movimiento de ánodos y servicios auxiliares	300,000
1 Blower para la oxidación, de 20 Kpa de capacidad	200,000
1 Bomba para aprovisionamiento de agua potable, 6.5 m <sup>3</sup> /h	2,000
2 Bombas para reemplazar el agua industrial, c/u 30 m <sup>3</sup> /h	18,000
2 Bombas para provisión de agua de enfriamiento, c/u 300 m <sup>3</sup> /h	250,000
2 Bombas para retorno de agua caliente, c/u 280 m <sup>3</sup> /h	235,000
Intercambiador de calor (35 °C - 50 °C), 300 m <sup>3</sup> /h	500,000
Sistema de enfriamiento de agua industrial	100,000
Sistema de provisión de aire, accesorios, válvulas, manómetros.	50,000
Sistema de línea de petróleo, accesorios (válvulas, medidores de flujo, etc.)	50,000
Sistema eléctrico	100,000
(medidores de potencia, voltímetros, etc.)	
<b>Total</b>	<b>2'015,000</b>

Tabla 3.8 Costo capital fijo para la instalación de una planta de ánodos

Descripción	Costo (US\$)
Hornos de refinación ígneo	9'592,700
Sistema de moldeo	5'473,000
Equipos adicionales	2'015,000
Modificación y/o extensión de la línea de grúas puente (lado norte del corredor de convertidores)	2'040,780
Extensión de la planta de moldeo norte	590,135
Instalación de equipos adicionales (15 % del costo de los equipos adicionales)	302,250
Planta auxiliar y servicios auxiliares (10 % del costo de infraestructura principal)	1'506,570
<b>Costo de equipos, modificación e instalación</b>	<b>21'520,435</b>
Supervisión e Ingeniería (10 % del costo de equipos, modificación e instalación)	2'152,044
Subtotal	23'672,479
Contingencia (20 % del subtotal)	4'734,496
<b>Total</b>	<b>28'406,975</b>

#### **Alternativa B.-**

Esta alternativa, requerirá de modificaciones en la planta de moldeo norte de la Fundición, lo cual consta principalmente de la modificación y reubicación de los 2 hornos de retención de 3.96m Ø x 10.67m L, conversión de la rueda de moldeo de 26 moldes, extensión de la planta de moldeo norte en 10 metros, instalación de equipos adicionales y servicios auxiliares.

El cobre ampolloso producido durante las modificaciones será moldeado en la planta de moldeo sur. La pérdida de producción de cobre ampolloso ocasionada por esta modificación se ha estimado en aproximadamente el 3 % de la producción diaria (740 toneladas métricas), lo que es decir 22.2 TMPD. Durante el tiempo necesario (seis meses) para la ejecución de las modificaciones en la planta de moldeo norte, la pérdida de producción será de 3,996 toneladas métricas, lo que a un costo de 2.2 US\$/Kg, será de US\$ 8'791,200.

Tabla 3.9 Costo de infraestructura y equipos adicionales para la modificación

Descripción	Costo (US\$)
Modificación de la planta de moldeo norte	
2 Hornos de retención (3.96 m Ø x 10.67 m L)	1'040,000
1 Rueda de moldeo (26 moldes)	2'500,000
Equipos auxiliares	2'015,000
Sistema de líneas de tuberías para la oxidación y reducción	
Sistema de cámara de moldeo y control electrónico	
Tanques de enfriamiento de ánodos	
4 Bombas de provisión de agua de enfriamiento, 180 m <sup>3</sup> /h	
1 Grúa puente de 10 TM de capacidad	
Intercambiador de calor	

Tabla 3.10 Costo capital fijo para la modificación de la planta de moldeo norte

Descripción	Costo (US\$)
Modificación de los hornos de retención y rueda de moldeo	3'540,000
Reubicación de los dos hornos de retención	260,000
Equipos adicionales	2'015,000
Extensión de la planta de moldeo norte	168,610
Instalación de equipos adicionales (15 % del costo de los equipos adicionales)	302,250
Planta auxiliar y servicios auxiliares (10 % del costo de infraestructura principal)	380,000
Costo de equipos, modificación e instalación	7'665,860
Supervisión e Ingeniería (10 % del costo de equipos, modificación e instalación)	1'333,172
Subtotal	7'999,032
Contingencia (20 % del subtotal)	1'599,806
Total	9'598,838

### 3.2.4 Costos de tratamiento

Los costos de tratamiento de las alternativas que involucran la producción de ánodos en las instalaciones de la Fundición, será de acuerdo a los costos de materiales, y de operaciones (personal requerido para realizar las operaciones y mantenimiento), 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 :

• Petróleo residual N° 6	154.03 US\$/m <sup>3</sup>
• Petróleo residual N° 2	258.81 US\$/m <sup>3</sup>
• Energía eléctrica	0.07 US\$/Kwh
• Agua potable	2.10 US\$/m <sup>3</sup>
• Aire	15.10 US\$/TM
• Vapor de agua	7.07 US\$/TM
• Supervisión y labor de operaciones	5.60 US\$/horas-hombre
• Mat. de operación y reparación	2.06 US\$/TM de moldeo

En la tabla 3.11 se muestran los cálculos de los costos de tratamiento para ambas alternativas.

### 3.3 Transporte de Cobre líquido

La posibilidad de transportar cobre líquido desde las instalaciones de la Fundición hasta la Refinería de Ilo es la alternativa más viable para solucionar el problema de los altos costos de refinación debido al elevado consumo de

Tabla 3.11 Costos del tratamiento para la producción de ánodos en la Fundición

	Unidades	Alternativa A	Alternativa B
<b>Producción</b>			
Anodos	Tm	316,816	275,520
<b>Consumo de materiales</b>			
Petróleo residual Nº 6	m3	10,792	13,490
Petróleo residual Nº 2	m3	1,462	995
Energía eléctrica	Kwh	3,946,679	1,670,260
Agua	m3	107,890	73,485
Aire	Tm	4,538	5,673
Vapor	Tm	28,911	19,692
<b>Personal</b>			
Hornos y Moldeo	hombres	36	46
Horas totales hombre operación	hh/año	102,168	130,548
Horas totales hombre rep. M/E	hh/año	42,192	53,912
Costo anual de operación	US\$		
<b>Materiales de operación</b>			
Petróleo residual Nº6		1,662,292	2,077,865
Petróleo residual Nº2		378,380	257,516
Energía eléctrica		276,268	116,918
Agua		226,569	154,319
Aire		68,524	85,655
Vapor		204,401	139,222
<b>Sub-Total</b>		<b>2,816,433</b>	<b>2,831,495</b>
<b>Labores de operación</b>			
Supervisión y Labor de operación		572,141	731,069
Reparación mecánica/eléctrica		236,275	301,907
Materiales de operación y reparación		652,641	567,571
<b>Sub-total</b>		<b>1,461,057</b>	<b>1,600,547</b>
<b>Total directo</b>		<b>4,277,490</b>	<b>4,432,042</b>
<b>Labor indirecta</b>		<b>641,624</b>	<b>664,806</b>
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>4,919,114</b>	<b>5,096,848</b>



combustible tanto en Fundición como en la Refinería e igualmente importante en la reducción de los costos de mano de obra y mantenimiento de las ruedas de moldeo de la Fundición.

### **3.3.1 Alternativas para el transporte del cobre**

La Fundición de Ilo, con una capacidad actual de producción de 273,000 toneladas métricas de cobre ampolloso por año, con el transporte del cobre líquido a la Refinería, la cantidad de cobre sería de 316,000 toneladas métricas por año, siendo este incremento debido al cobre recirculante proveniente de la planta electrolítica. La capacidad actual de refinación es 233,700 toneladas métricas de ánodos por año, obteniéndose una producción de 190,000 toneladas métricas de cátodos de cobre por año. Sin embargo la Refinería tiene proyectado incrementar su capacidad de refinación, en un 20 % de la actual.

Se ha analizado dos alternativas siendo la primera, (C1) el de refinar parcialmente el cobre en Fundición para ajustar el set de colada en la Refinería; esta alternativa permite usar un solo horno de refinación tipo basculante de la Refinería, sin embargo involucra, hacer cambios sustanciales en la Fundición para poder refinar el cobre. El segundo, es el de usar los dos hornos de refinación en la Refinería para tratar completamente el cobre. Esta última alternativa, resulta ser la más atractiva dado que no requiere de una mayor inversión; ha sido desdoblada en tres alternativas, siendo estas : (C2) cubrir las necesidades actuales de la Refinería, (C3) cubrir las necesidades de la Refinería cuando se amplíe, y (C4) moldear todo el cobre producido en la Fundición como ánodos.

Tabla 3.12 Producción en la planta de ánodos en el transporte de cobre líquido

Descripción	C2	C3	C4
Producción de ánodos	233,700	275,520	316,816
Producción de cátodos	190,000	224,000	224,000
Anodos requeridos por la Refinería	233,700	275,520	275,520
Recirculación de la planta de ánodos para la Fundición	9,348	11,021	6,336
Desechos de Refinería para Fundición (17 % de la producción de cátodos)	32,300	38,080	38,080
Carga a los hornos de refinación	243,048	286,541	323,152
Anodos por colada	365	340	365
Coladas por año	665	843	885
Coladas por semana	13	16	17

### 3.3.1.1 Operación de un horno de refinación

Esta alternativa C1 considera refinar al fuego parcialmente en la Fundición y ajustar el set de colada en la Refinería para lo cual se tendría que modificar las instalaciones en la Fundición, adecuando dos de los hornos de retención para refinar el cobre ampolloso; además sería necesario trasladar todo el cobre recirculante de la Refinería a la Fundición para poder ser procesado en los convertidores; si consideramos que el recirculante es 17 %; se tendría que procesar en la Fundición alrededor de 90 toneladas métricas de cobre, lo que llegado el momento puede dar problemas por la generación de excesivo material frío.

La principal ventaja de esta alternativa es la utilización al 100 % de un horno de refinación Maerz, lo que reduciría significativamente el consumo de combustible. Dentro de las desventajas sería la necesaria realización de inversiones adicionales en la Fundición con la finalidad de acondicionar dos de los hornos de retención actuales para hacer el refino al fuego; así mismo se requiere de mayor cantidad de

personal, así como mayor consumo de materiales. Para tiempos muy estrechos en la Refinería, sería necesario transportar todo el cobre recirculante a la Fundición para procurar dar mayor capacidad a los hornos basculantes Maerz, así mismo, no tendría capacidad para abastecer de ánodos a la planta electrolítica de la Refinería luego que sea ampliada.

### **3.3.1.2 Operación de los dos hornos de refinación**

Esta alternativa considera enviar el cobre líquido a la Refinería para su tratamiento total, para lo cual se requiere operar los dos hornos basculantes Maerz. Esta alternativa se ha desdoblado en tres, siendo estas : considerar la producción actual (alternativa C2), la producción proyectada con la ampliación de la capacidad de refinación (alternativa C3) y por último moldear toda la producción de cobre como ánodos (alternativa C4).

Las alternativas C2 y C3, consideran enviar el cobre líquido a la Refinería para su total tratamiento, para lo cual se requiere de los dos hornos basculantes Maerz. La ventaja de estas alternativas sería el no requerir realizar ninguna inversión adicional en la Fundición para modificar los equipos actuales, así mismo no requiere personal para refinar el cobre ampoloso; el cobre recirculante puede ser alimentado a los hornos basculantes Maerz durante las etapas de espera, durante la cual pueden calentarse sin ninguna premura, retornando a la Fundición solo una parte de este recirculante para ser tratado en los Convertidores y además permite tener suficiente capacidad como para abastecer la ampliación de las celdas electrolíticas. Como desventaja sería tiempos de espera demasiados largos en la Refinería sobre todo para la alternativa C1.

La alternativa C4 considera moldear toda la producción de cobre en la Refinería parando la planta de moldeo en la Fundición, pero manteniéndola operativa mientras se ajustan los parámetros de operación en la Refinería; así como para tener la capacidad necesaria para moldear cobre ampoloso cuando uno de los hornos basculantes Maerz se encuentre en mantenimiento.

Las ventajas que presenta esta alternativa sería la disminución total de los tiempos de espera en la Refinería, así como reduce los costos de moldeo en la Fundición, debido a que esta operación ya no se realizaría. En las desventajas se tiene la necesidad de acondicionar un viaje de transporte al día, al igual que la alternativa C1, no ofrece mayor flexibilidad, dado que los horarios son muy estrechos. Además cualquier problema en la rueda de moldeo o los hornos basculantes Maerz traería consigo pérdida de producción.

### **3.3.2 Costo de inversión**

El costo de la inversión necesaria para la implementación del sistema de transporte de cobre líquido por carros torpedo, tiene como objetivo determinar las ventajas tentativas que se tendría con la implementación de está alternativa. Dentro de las inversiones necesarias tenemos : (1) Utilización de carros torpedo (tres en operación y 1 en stand-by) con la capacidad necesaria para poder satisfacer la demanda de la Refinería, (2) Modificaciones de infraestructura en la Refinería y Fundición para la ubicación de los carros torpedo, (3) Instalación de equipos de combustión en ambas plantas para mantener el cobre líquido.

Dentro de las modificaciones de infraestructura e instalaciones de equipos a realizar en ambas plantas de producción, se tiene los siguientes

**(1) Fundición (Planta de moldeo Sur)**

- Una estación de calentamiento con quemadores de petróleo Bunker.
- Instalación de un ventilador y líneas de tuberías para alimentar aire a la estación de calentamiento.
- Empalme e Instalación de líneas de tuberías a líneas existentes de petróleo.
- Un cambio en la línea férrea cerca de la zona de la planta de cal.
- Línea férrea nueva para la zona de calentamiento.
- Ampliación de la línea férrea dentro de la nave de la fundición (zona de carga de los carros torpedos).

**(2) Refinería (Planta de ánodos)**

- Una estación de calentamiento con quemadores de petróleo Bunker.
- Cimentación para rieles de los carros torpedos dentro de la planta de ánodos.
- Losa de concreto de 0.15 m a 1.5 m aproximadamente sobre la losa existente (dado la altura de la ventana de alimentación de los hornos, es necesario elevar el nivel para poder alimentar el cobre líquido a través de canales a los hornos).
- Un muro de aproximación a la entrada de la planta de ánodos (lado norte).
- Canaletas y Cucharas de colada de cobre líquido (3 % de pendiente cada una).
- Línea férrea nueva con un "switch" a 1 Km aproximadamente de la planta de ánodos. Esta línea tendrá adicionalmente un cambio y una espuela a 0.5 Km y 0.3 Km respectivamente; a partir de la planta de ánodos.

Tabla 3.13 Costo de implementación de los carros torpedo

Inversión	Costo (US\$)
Ollas torpedo	2'400,000
Infraestructura	701,250
Refractarios	300,000
<b>Total</b>	<b>3'401,250</b>

Tabla 3.14 Costo de la modificación de infraestructuras y servicios auxiliares

Descripción	Costo (US\$)
<b>Obras Civiles en Refinería (Planta de ánodos)</b>	
Trabajos preliminares	28,615
Cimientos para rieles de carro torpedo	266,633
Losa de concreto	129,879
Muro de aproximación	75,879
Fabricación y montaje de cuchara y canal	63,618
<b>Estaciones de Calentamiento (Fundición y Refinería)</b>	
Estación de combustión y red de tuberías	54,129
<b>Servicios auxiliares</b>	
Equipos mecánicos (cimientos y montaje de equipos)	13,142
Instalaciones eléctricas	20,692
Equipos	40,000
<b>Total</b>	<b>694,587</b>

Para un transporte seguro de la carga de cobre líquido en los carros torpedos, es necesario realizar cambios en la línea férrea actual, dado que la capacidad de soporte de algunos sectores de la misma no están diseñadas para soportar la carga requerida; y por lo tanto es necesario las siguientes consideraciones

(1) Teniendo en cuenta el peso de los carros torpedos cargados (208 toneladas métricas), el tipo de carga (cobre líquido), la frecuencia de transporte y la seguridad con que se debe dirigir estas operaciones; es necesario la sustitución del tipo de riel actual de 44.64 Kg/m por el de 57.04 Kg/m; que ofrece la resistencia y

fortaleza proporcionando la seguridad necesaria; minimizando cualquier riesgo durante el transporte.

(2) En el tramo del recorrido de los carros torpedos de Fundición a Refinería, existe aproximadamente 09 Km, los cuales en un 80 % están conformados por rieles de buen peso (línea de 59.02 Kg/m y 64.97 Kg/m); que no requerirá ser sustituida y/o fortificada. El 20 % restante será necesario sustituir y/o fortificar, para lo cual se esta presentando dos propuestas. Propuesta ajustada, donde solamente se prevee la sustitución de línea en los sectores necesarios, y reforzamiento de los cambios. La otra propuesta mejorada, se considera el mejoramiento total de la línea de ese tramo; para darle una mejor estabilidad, resistencia y seguridad a este tipo de operaciones.

(3) En la Fundición será necesario construir un desvío con dos cambios para poder cambiar de posición las maquinas de tal modo que venga de la Refinería jalando los carros torpedos y en la zona de la Fundición cerca a los hornos de reverberos, entre empujando. En el Km 7.5 hacia la Refinería se requiere de cuatro cambios uno para el desvío principal a la Refinería, dos para el bolsillo necesario para cambiar la posición de la locomotora, y un último cambio para la espuela de estacionamiento.



Tabla 3.15 Costos de las propuestas de acondicionamiento de las líneas férreas

Propuestas	Costo (US\$)
<b>Ajustada</b>	
Materiales	709,373
Equipos	32,943
Labor	19,756
<b>Total</b>	<b>782,073</b>
<b>Mejorada</b>	
Materiales	835,445
Equipos	32,943
Labor	19,756
<b>Total</b>	<b>888,144</b>

Tabla 3.16 Costo capital fijo del sistema de transporte

Descripción	Costo (US\$)
Implementación de los carros torpedos	3'401,250
Modificación de infraestructura y servicios auxiliares	694,587
Instalación de nuevas líneas férreas	888,144
<b>Subtotal</b>	<b>4'983,981</b>
Contingencias (20 % del subtotal)	996,796
<b>Total</b>	<b>5'980,777</b>

### 3.3.3 Costos de tratamiento

#### Costo de operación y mantenimiento de los carros torpedo.-

Los costos de transporte de cobre líquido mediante los carros torpedo involucran el consumo de petróleo residual N° 6, refractarios y costo de operación y mantenimiento. El costo operativo es calculado de acuerdo al personal requerido para realizar la operación, teniendo en cuenta un trabajo de en tres guardias a tiempo completo.



Tabla 3.17. Consumo del Petróleo residual Nº 6 en los Carros torpedo  
 Alternativas C2 y C3 : Transporte de Cobre ampoloso líquido (192,052 TM y 226,419 TM respectivamente)

Hora		Etapa	Carros torpedo		h/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa
		Hornos	Operación	Calentando				
01:00	04:00	Carga y Calentamiento	Descarga en la Refinería					
02:00	05:00			2	3.72	0.27	1.01	156.15
03:00	06:00							
04:00	07:00							
05:00	08:00	Reducción final,	Espera en Ref	3	1.00	0.41	0.41	62.96
06:00	09:00	Escorificación y	Transp. a Fundición	0	1.00	0.00	0.00	0.00
07:00	10:00	Set de moldeo	Espera en Fund.	3	1.00	0.41	0.41	62.96
08:00	11:00	Moldeo	Carga					0.00
09:00	12:00		en la	2	3.28	0.27	0.89	137.68
10:00	13:00		Fundición					0.00
11:00	14:00		Transp. a Refinería	0	1.00	0.00	0.00	0.00
12:00	15:00		Espera en Ref	3	1.00	0.41	0.41	62.96
13:00	16:00	Cargando y Calentamiento	Descarga en la Refinería					
14:00	17:00			2	3.72	0.27	1.01	156.15
15:00	18:00							
16:00	19:00							
17:00	20:00	Reducción final,	Espera en Ref	3	1.00	0.41	0.41	62.96
18:00	21:00	Escorificación y	Transp. a Fundición	0	1.00	0.00	0.00	0.00
19:00	22:00	Set de moldeo	Espera en Fund.	3	1.00	0.41	0.41	62.96
20:00	23:00	Moldeo	Carga					
21:00	00:00		en la	2	3.28	0.27	0.89	137.68
22:00	01:00		Fundición					
23:00	02:00		Transp. a Refinería	0	1.00	0.00	0.00	0.00
00:00	03:00		Espera en Ref	3	1.00	0.41	0.41	62.96
		Total	Por día			3.54	6.27	965.45
			Por año (330 días)			1,169.11	2,068.43	318,597.84

Tabla 3.18 Costo del Consumo de Petróleo residual Nº 6 en los Carros torpedos  
 Alternativa C4 : Transporte de Cobre ampoloso líquido (272,162 TM)

Horas		Etapa	Carros torpedo		h/etapa	m3/hr	m3/etapa	US\$/etapa
		Hornos	Operación	Calentando				
05:00	13:00	Carga	Descarga					
06:00	14:00	y	en la	2	3.00	0.14	0.41	62.96
07:00	15:00	Calentamiento	Refinería					
08:00	16:00	Oxidación	Transp. a Fundición	0	1.00	0.00	0.00	0.00
09:00	17:00		Carga					
10:00	18:00		en la	2	3.00	0.14	0.41	62.96
11:00	19:00	Escorificación	Fundición					
12:00	20:00	y	Transp. a Refinería	0	1.00	0.00	0.00	0.00
13:00	21:00	Reducción	Descarga					
14:00	22:00		en la	2	3.00	0.14	0.41	62.96
15:00	23:00		Refinería					
16:00	00:00		Transp. a Fundición	0	1.00	0.00	0.00	0.00
17:00	01:00		Carga					
18:00	02:00	Moldeo	en la	2	3.00	0.14	0.41	62.96
19:00	03:00		Fundición					
20:00	04:00		Transp. a Refinería	1	1.00	0.00	0.00	0.00
Total		Por colada				0.55	1.64	251.86
		Cada 2 días (6 coladas)				3.27	9.81	1,511.14
		Por año (320 días)				523.24	1,569.72	241,781.76

Tabla 3.19 Costos del transporte de cobre líquido por carros torpedo

	Unidades	Alternativa C2	Alternativa C3	Alternativa C4
<b>Producción</b>				
Transporte de cobre líquido	Tm	192,052	226,419	272,160
Consumo del petróleo residual N° 6	m3	2,068	2,068	1,570
Personal	hombres	9	9	9
Horas totales hombre operación	hh/año	25,542	25,542	25,542
Horas totales hombre rep. M/E	hh/año	10,548	10,548	10,548
<b>Costo anual de operación</b>				
Petróleo residual N° 6		318,534	318,534	241,827
Refractarios		11,523	13,585	16,330
Labor de transporte		148,144	148,144	148,144
Reparación mecánica/eléctrica		61,178	61,178	61,178
Materiales de operación y reparación		34,569	40,755	48,989
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>573,949</b>	<b>582,197</b>	<b>516,468</b>

• Energía eléctrica	0.07 US\$/KWH
• Agua potable	2.10 US\$/m <sup>3</sup>
• Aire	15.10 US\$/TM
• Vapor de agua	7.07 US\$/TM
• Supervisión y labor de operaciones	5.60 US\$/horas-hombre
• Mat. de operación y reparación	2.06 US\$/ TM de moldeo

El cálculo del consumo y costo del petróleo residual Nº 6 necesario para la refinación ígnea en la planta de ánodos, de acuerdo a las alternativas C2 (233,700 TM de ánodos), C3 (275,520 TM de ánodos) y C4 (316,816 TM de ánodos) son mostrados en las Tablas 3.20, 3.21 y 3.22

En la tabla 3.23 se muestran los cálculos de los costos de tratamiento para estas alternativas.

### **3.4 Comparación de los costos de inversión y de tratamiento**

Considerando las alternativas que involucran la producción de ánodos en la Fundición, el costo capital que se requiere para poder realizar los cambios necesarios en la infraestructura de la Fundición, así como, la instalación de nuevos equipos, serán de acuerdo a la magnitud de los cambios y a la capacidad de producción de la nueva planta de ánodos.

La alternativa A que tendrá una capacidad de producción de 316,816 toneladas métricas de ánodos requerirá de mayores modificaciones en la Fundición y la instalación de nuevos equipos (2 hornos de refino ígneo y una rueda de moldeo), lo

Tabla 3.20 Costo del Consumo de Petróleo residual N° 6 en la planta de ánodos

Alternativa C2 : Transporte de Cobre ampolloso líquido (Producción de 233,700 TM de ánodos)

Horas	Etapa	Consumo de los hornos				Consumo del caldero			
		h/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa	
21:00	04:00	Carga y Calentamiento	3.72	0.81	3.00	461.95	0.38	1.41	216.88
22:00	05:00								
23:00	06:00								
00:00	07:00								
01:00	08:00	Oxidación	1.95	1.62	3.15	485.43	0.40	0.77	119.37
02:00	09:00								
03:00	10:00								
04:00	11:00	Esconificación y Reducción	5.61	0.36	2.00	307.44	0.30	1.70	261.65
05:00	12:00			1.37	7.71	1,187.24			
06:00	13:00			1.73	9.70	1,494.68			
07:00	14:00								
08:00	15:00								
09:00	16:00								
10:00	17:00								
11:00	18:00	Moldeo	5.28	1.15	6.08	935.78	0.51	2.70	415.56
12:00	19:00								
13:00	20:00								
14:00	21:00								
15:00	22:00								
16:00	23:00								
17:00	00:00	Espera	7.44	0.26	1.97	303.63	0.87	6.48	997.63
18:00	01:00								
19:00	02:00								
20:00	03:00								
Total	Por colada		7.30	23.90	3,681.47				
	Por día (2 coladas)		14.59	47.80	7,362.94	2.08	11.65	1,794.21	
	Por año (330 días)		4,816.34	15,774.75	2,429,770.27	686.98	3,844.01	592,089.84	

Tabla 3.21 Costo del Consumo de Petróleo residual N°6 en la planta de ánodos  
 Alternativa C3 : Transporte de Cobre ampoloso líquido (Producción de 275,520 TM de ánodos)

Hora	Etapa	Consumo del horno N°1			Etapa	Consumo del horno N°2				
		h/etapa	m3/h	m3/etapa		US\$/etapa	h/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa
05:00	Carga				Esconificación					
06:00	y	3.60	0.81	2.90	447.04	y	5.60	1.73	9.69	1,492.01
07:00	Calentamiento					Reducción				
08:00	Ondación	1.60	1.62	2.59	398.31					
09:00										
10:00					Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61	
11:00	Esconificación									
12:00	y	5.60	1.73	9.69	1,492.01					
13:00	Reducción									
14:00										
15:00										
16:00										
17:00										
18:00	Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61					
19:00										
20:00					Espera	16.00	0.26	4.24	652.96	
21:00	Carga									
22:00	y	3.60	0.81	2.90	447.04					
23:00	Calentamiento									
00:00	Ondación	1.60	1.62	2.59	398.31					
01:00										
02:00										
03:00	Esconificación									
04:00	y	5.60	1.73	9.69	1,492.01					
05:00	Reducción					Carga				
06:00						y	3.60	0.81	2.90	447.04
07:00						Calentamiento				
08:00	Ondación	1.60	1.62	2.59	398.31					
09:00										
10:00	Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61					
11:00						Esconificación				
12:00						y	5.60	1.73	9.69	1,492.01
13:00	Carga					Reducción				
14:00	y	3.60	0.81	2.90	447.04					
15:00	Calentamiento									
16:00	Ondación	1.60	1.62	2.59	398.31					
17:00										
18:00					Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61	
19:00	Esconificación									
20:00	y	5.60	1.73	9.69	1,492.01					
21:00	Reducción					Carga				
22:00						y	3.60	0.81	2.90	447.04
23:00						Calentamiento				
00:00	Ondación	1.60	1.62	2.59	398.31					
01:00										
02:00	Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61	Esconificación				
03:00						y				
04:00						Reducción				
Total	Por 2 días (6 colada	15.91	63.47	9,776.91			10.87	46.56	7,170.90	
	Por año (320 días)	2,545.34	10,155.91	1,564,305.60			1,739.28	7,448.88	1,147,344.00	



Tabla 3.22 Costo del Consumo de Petróleo residual Nº 6 en la planta de ánodos  
 Alternativa C4 : Transporte de Cobre ampoloso líquido (Producción de 316,816 TM de ánodos)

Horas		Etapa	Consumo de los hornos			Consumo del caldero			
			h/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa	m3/h	m3/etapa	US\$/etapa
05:00	13:00	Carga							
06:00	14:00	y	3.60	0.81	2.90	447.04	0.38	1.36	209.88
07:00	15:00	Calentamiento							
08:00	16:00	Oxidación	1.60	1.62	2.59	398.31	0.40	0.64	97.94
09:00	17:00								
10:00	18:00								
11:00	19:00	Escorificación							
12:00	20:00	y	5.60	1.73	9.69	1,492.01	0.30	1.70	261.18
13:00	21:00	Reducción							
14:00	22:00								
15:00	23:00								
16:00	00:00								
17:00	01:00								
18:00	02:00	Moldeo	5.20	1.15	5.98	921.61	0.51	2.66	409.27
19:00	03:00								
20:00	04:00								
Total		Por colada		5.30	21.16	3,258.97	1.59	6.35	978.27
		Cada 2 días (6 coladas)		31.82	126.95	19,553.82	4.77	19.05	2,934.82
		Por año (320 días)		5,090.67	20,311.82	3,128,611.20	763.06	3,048.59	469,571.52

Tabla 3.23 Costos de tratamiento en la planta de ánodos de la Refinería para el sistema de transporte

	Unidades	Actual	Alternativa C2	Alternativa C3	Alternativa C4
<b>Producción</b>					
Anodos	Tm	233,700	233,700	275,520	316,816
<b>Consumo de materiales</b>					
Petróleo residual N° 6	m3	26,624	19,619	20,653	23,360
Petróleo residual N° 2	m3	3,607	2,658	2,798	3,165
Energía eléctrica	Kwh	3,403,000	3,319,000	3,624,000	3,924,000
Agua	m3	93,600	93,600	110,349	126,889
Aire	Tm	11,195	8,250	8,685	9,823
Vapor	Tm	18,280	11,965	12,339	14,188
<b>Personal</b>					
Hornos y Moldeo	hombres	43	37	48	48
Horas totales hombre operación	hh/año	98,777	105,006	136,224	136,224
Horas totales hombre rep. M/E	hh/año	25,198	43,364	56,256	56,256
<b>Costo anual de operación</b>					
US\$					
<b>Materiales de operación</b>					
Petróleo residual N° 6		4,100,895	3,021,915	3,181,182	3,598,141
Petróleo residual N° 2		933,469	687,865	724,118	819,029
Energía eléctrica		238,210	232,330	253,680	274,680
Agua		196,560	196,560	231,734	266,467
Aire		169,049	124,571	131,136	148,324
Vapor		129,240	84,593	87,237	100,309
Sub-Total		5,767,422	4,347,833	4,609,087	5,206,950
<b>Labores de operación</b>					
Supervisión y Labor de operación		553,151	588,034	762,854	762,854
Reparación mecánica/eléctrica		141,109	242,838	315,034	315,034
Materiales de operación y reparación		481,422	481,422	567,571	652,641
Sub-total		1,175,682	1,312,294	1,645,459	1,730,529
Total directo		6,943,104	5,660,127	6,254,546	6,937,479
Labor indirecta		1,041,466	849,019	938,182	1,040,622
Total	US\$	7,984,570	6,509,146	7,192,728	7,978,101

que junto a otras consideraciones de servicio hacen una inversión de US\$ 28'406,975

La alternativa B que básicamente la inversión está dada por la modificación de los dos hornos de retención y la rueda de moldeo de la planta norte de la Fundición (US\$ 9'598,838), ocasionará una pérdida de producción de cobre ampolloso en la planta de moldeo norte, equivalente a US\$ 8'791,200, por lo que la inversión total será de US\$ 18'390,038

La alternativa C que establece un sistema de transporte de cobre líquido mediante carros torpedo, requerirá de menores inversiones, realizándose en las siguientes partes : US\$ 3'401,250 para los tres carros torpedos (ollas, infraestructura y refractarios), US\$ 694,587 para las modificaciones en la Fundición y Refinería (plataformas de soporte para los carros torpedo, cimientos y equipos para la combustión para las estaciones de calentamiento), y US\$ 888,144 para los cambios en la línea férrea actual (propuesta mejorada), que sumados a las contingencias (20 %) resulta una inversión de US\$ 5'980,777 para esta alternativa.

El costo de tratamiento están de acuerdo al costo de los materiales (petróleo residual, agua potable, vapor, energía eléctrica, repuestos, etc.) y de las labores de operación y reparación a realizar en los procesos de refinación, la cual en el caso de la alternativa C involucrará las labores de transporte del cobre líquido y operación en la planta de ánodos. El costo de operaciones en la actual planta de ánodos es US\$ 7'984,570 por año.

Los costos anuales de tratamiento en la planta de ánodos para las posibilidades que involucran la producción de ánodos en la Fundición será : US\$ 4'919,114 para la alternativa A y US\$ 5'096,848 para la alternativa B. La alternativa C, presentará costos de operación para el transporte de cobre líquido y planta de ánodos en cada una de sus tres posibilidades que incluyen la operación de los dos hornos de refinación, siendo los totales : US\$ 7'083,095 para la alternativa C2, US\$ 7'774,925 para la alternativa C3 y US\$ 8'494,569 para la alternativa C4.

## CAPITULO IV

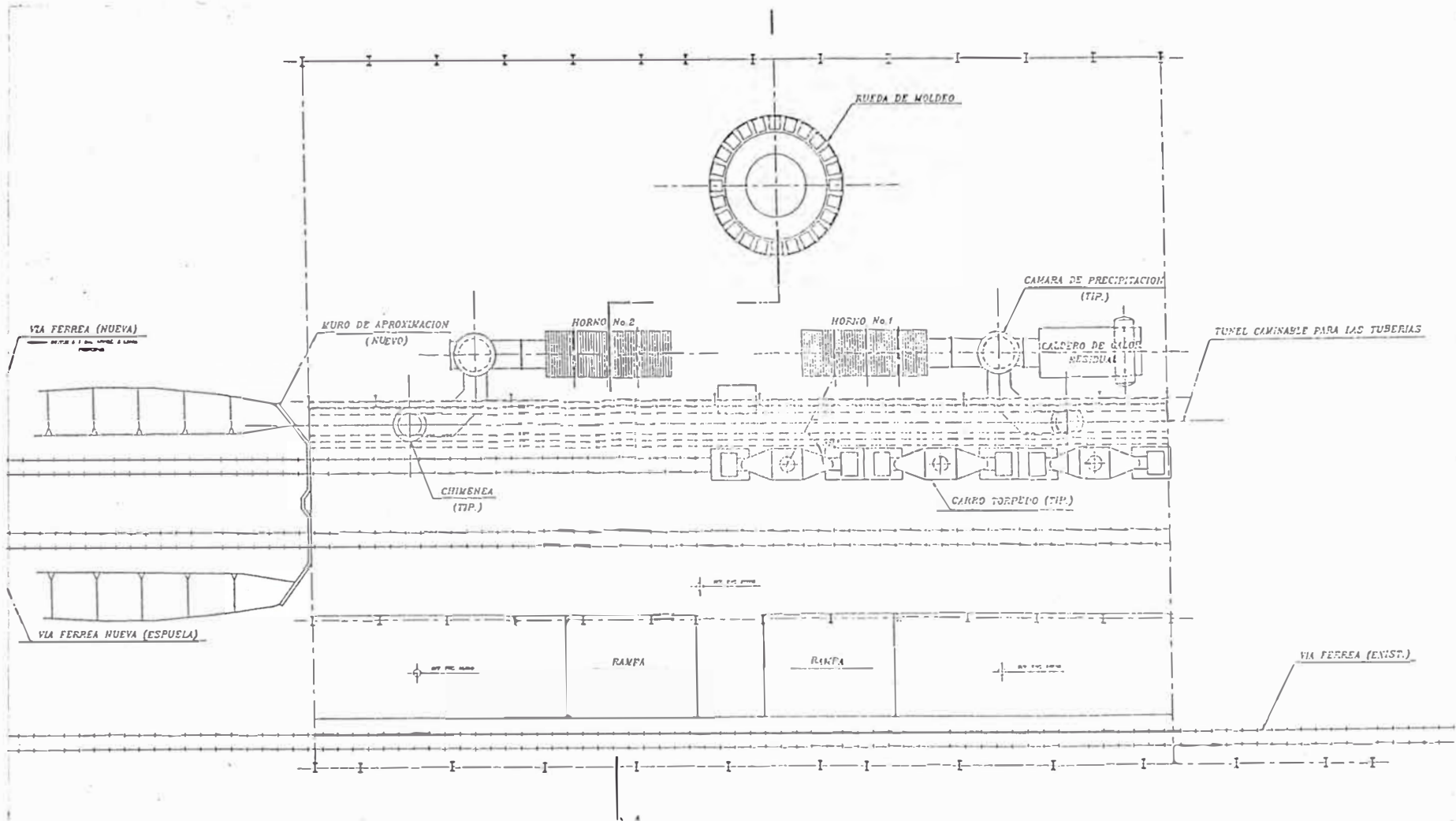
### INGENIERIA DEL TRANSPORTE DE COBRE LIQUIDO

#### 4.1 Sistema del transporte de cobre líquido

El transporte de metal líquido mediante carros torpedos, es una operación comúnmente realizada en las plantas siderúrgicas para el transporte de arrabio procedente del alto horno hacia la planta donde operan los convertidores. El transporte de cobre líquido desde la Fundición hasta la Refinería de Ilo, se realizaría a través de un sistema compuesto de carros torpedo, siendo desplazados por la locomotora a través de la línea férrea actual, en aproximadamente una hora. El recorrido a considerar sería desde los hornos de retención de moldeo sur de la Fundición (donde se realizaría la carga de cobre líquido) y la sección hornos de refino ígneo de la Refinería (operación de descarga del cobre líquido hacia los hornos basculantes).

Para cualquier capacidad de refinación electrolítica, se ha considerado disponer de tres carros torpedos (mayor eficiencia), las cuales transportarán el cobre líquido de la Fundición a la Refinería en dos viajes. Las horas del transporte para el transporte serán las 04 horas y las 21 horas. Se ha estimado que los torpedos demorarán 5 horas desde que salen de la Fundición hasta que regresan por lo que estarían de vuelta a las 09 horas quedando en las instalaciones de la Fundición hasta las 21 horas. En la Figura 4.1 se muestra la disposición de los carros torpedo en la planta de ánodos.

Fig. 4.1 Disposición de los Carros torpedo en la Refinería



## 4.2 Especificaciones del Carro torpedo

Las principales variables que se deben tener en cuenta para realizar esta operación están vinculadas directamente con el carro torpedo, que es básicamente un recipiente térmico de gran dimensión que permite mantener la temperatura del metal líquido durante su desplazamiento entre plantas de procesos continuos. El carro torpedo está compuesto por una depósito (olla) de estructura metálica (planchas de acero) con revestimiento interior de ladrillos refractarios, en donde permanecerá el metal en estado líquido y presenta como las principales zonas de contacto con el metal caliente : cilindro, cono y cabezal. En las Figuras 4.2 y 4.3 se ilustra el carro torpedo.

### 4.2.1 Diseño del carro torpedo

(1) Cálculo del volumen total del carro torpedo

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi r_e^2 \ell$$

$$\text{Volumen del cono truncado} = (\pi \ell/3) (R_e^2 + r_e^2 + R_e r_e)$$

Donde :

$$\ell = \text{Longitud del cilindro, m}$$

$$R_e = \text{Radio exterior de la base mayor del cono, m}$$

$$r_e = \text{Radio exterior de la base menor del cono, m}$$

$$\text{Volumen exterior del carro} = \text{volumen del cilindro} + \text{volumen de cono truncado}$$

(2) Cálculo de volumen interior del carro torpedo

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi r_i^2 \ell$$

$$\text{Volumen del cono truncado} = (\pi \ell/3) (R_i^2 + r_i^2 + R_i r_i)$$

Fig. 4.2 Diagrama del carro torpedo

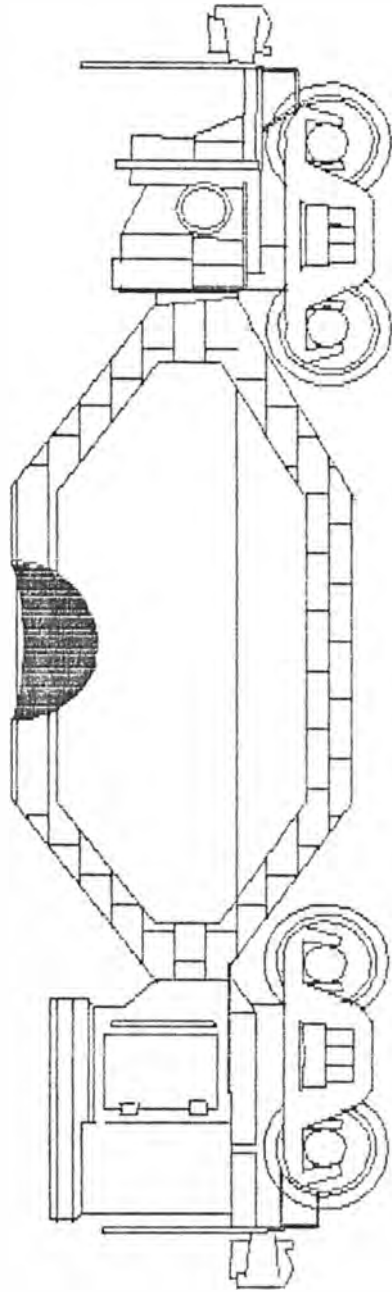
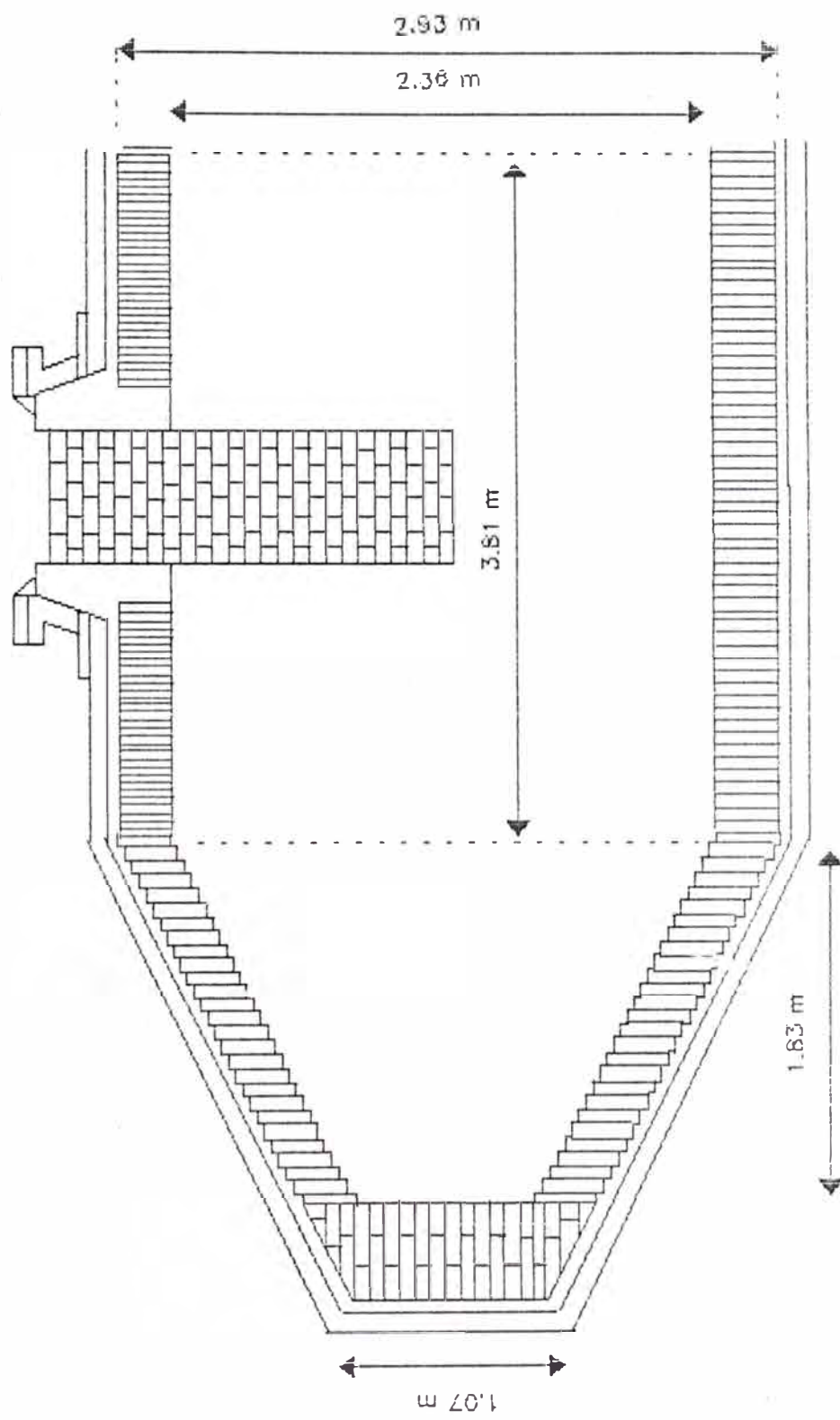




Fig. 4.3 Especificaciones del carro torpedo



Donde :

$l$  = Longitud del cilindro, m

$R_i$  = Radio interior de la base mayor del cono, m

$r_i$  = Radio interior de la base menor del cono, m

Volumen interior del carro = volumen cilindro + 2 (volumen de cono truncado)

### (3) Volumen y Peso de refractarios

Volumen, m<sup>3</sup> = volumen exterior carro – volumen interior carro

Peso, TM. = (Volumen) (Peso específico del refractario)

### (4) Capacidad del carro torpedo

Capacidad, TM = (volumen interior carro)(Peso específico del cobre)

Tabla 4.1 Dimensiones del Carro torpedo

Diseños de Carros torpedo	A	B	C	D
Dimensiones de la estructura, m				
Altura de fondo	1.60	1.60	1.60	1.60
Altura de casco	1.23	1.23	1.23	1.23
Altura de eje	2.78	2.78	2.83	2.83
Diámetro exterior	2.99	2.99	3.09	3.09
Casco metálico	0.03	0.03	0.03	0.03
Altura total	4.22	4.22	4.32	4.32
Longitud total	15.45	15.45	15.45	15.45
Dimensiones del carro torpedo, m				
Radio interior (cilindro y base mayor cono)	1.18	1.18	1.23	1.23
Radio interior (base menor cono)	0.54	0.54	0.59	0.59
Longitud cilindro	3.81	3.81	3.81	3.81
Longitud cono	1.83	1.83	1.83	1.83
Refractario de la solera	0.34	0.34	0.34	0.34
Refractario de la bóveda	0.23	0.23	0.23	0.23
Diámetro exterior del cilindro	2.93	2.93	3.03	3.03
Diámetro exterior de la base menor del cono	1.64	1.64	1.74	1.74

Tabla 4.2 Capacidades de Carros torpedo

Diseños de Carros torpedo	A	B	C	D
<b>Volumen exterior del carro torpedo, m<sup>3</sup></b>				
Cilindro	25.69	25.69	27.47	27.47
Cono	7.70	7.70	8.37	8.37
<b>Total</b>	<b>41.10</b>	<b>41.10</b>	<b>44.22</b>	<b>44.22</b>
<b>Volumen interior del carro torpedo, m<sup>3</sup></b>				
Cilindro	16.67	16.67	18.11	18.11
Cono	4.43	4.43	4.93	4.93
<b>Total</b>	<b>25.52</b>	<b>25.52</b>	<b>27.98</b>	<b>27.98</b>
<b>Carga de cobre</b>				
Altura, %	50.00	55.00	50.00	55.00
Altura en el cilindro, m	1.18	1.30	1.23	1.35
Altura en el cono, m	0.54	0.59	0.59	0.64
<b>Angulo (cilindro y cono), grados</b>	<b>180.00</b>	<b>191.49</b>	<b>180.00</b>	<b>191.49</b>
<b>Volumen de cobre líquido, m<sup>3</sup></b>				
Cilindro	8.33	8.86	9.05	9.63
Cono	2.21	2.35	2.47	2.62
<b>Total</b>	<b>12.76</b>	<b>13.57</b>	<b>13.99</b>	<b>14.88</b>
<b>Volumen de refractarios, m<sup>3</sup></b>	<b>15.58</b>	<b>15.58</b>	<b>16.25</b>	<b>16.25</b>
<b>Peso específico de los materiales, TM/m<sup>3</sup></b>				
Cobre	8.94	8.94	8.94	8.94
Refractario	2.90	2.90	2.90	2.90
<b>Peso de los materiales, TM</b>				
Cobre	114.07	121.35	125.06	133.04
Refractario	45.17	45.17	47.11	47.11

#### 4.2.2 Refractarios del carro torpedo

En la actualidad para la industria metalúrgica que realiza operaciones de transporte de metal caliente mediante recipientes térmicos (ollas y carros torpedo), la empresa Harbison Walker Refractories ofrece una amplia línea de refractarios, de las cuales se debe seleccionar los tipos de ladrillos de acuerdo a las necesidades propuestas en el diseño del Carro torpedo. Además los refractarios a ser seleccionados deben tener ciertas características de tal manera que

proporcionen una alta resistencia en caliente, baja porosidad, positiva expansión durante el recalentamiento y resistencia química al ataque del metal caliente.

El mayor beneficio que provocará una adecuada selección de refractarios será la reducción del costo de refractario por tonelada métrica de metal producido, ya que largos periodos de mantenimiento en los Carros torpedo incrementará el costo de mantenimiento y desfavorecerá la productividad.

#### **4.2.2.1 Ladrillos refractarios**

Harbison Walker Refractories, provee una adecuada designación de los ladrillos refractarios a utilizar en el Carro torpedo. Es así, que para obtener un alto grado de calidad en la selección de los ladrillos refractarios, es necesario una combinación óptima de sus propiedades físicas y químicas, las cuales son muy importantes para afrontar con los requerimientos de servicio que requiere cada zona del carro torpedo.

##### **1) Implicancias corrosivas a los Refractarios.-**

El cobre líquido no reacciona con el refractario debido a su composición química y características del mismo, sino por efecto de la tensión superficial logra penetrar a través de las porosidades de los refractarios impregnándose por infiltración. Comúnmente se presenta los desgastes : (1) "spalling", que es debido a tensiones causadas por enfriamientos diferenciales entre el cobre que es muy buen conductor y el refractario; y (2) cambio volumétrico, originado al oxidarse el cobre infiltrado en los poros a  $\text{Cu}_2\text{O}$  y  $\text{CuO}$ , lo cual produce tensiones internas en el refractario.

Las características de servicio que realizan los ladrillos refractarios es distinta para cada zona del carro torpedo, y por tanto llegan a presentar diferentes formas de desgaste, entre las cuales se tienen las siguientes :

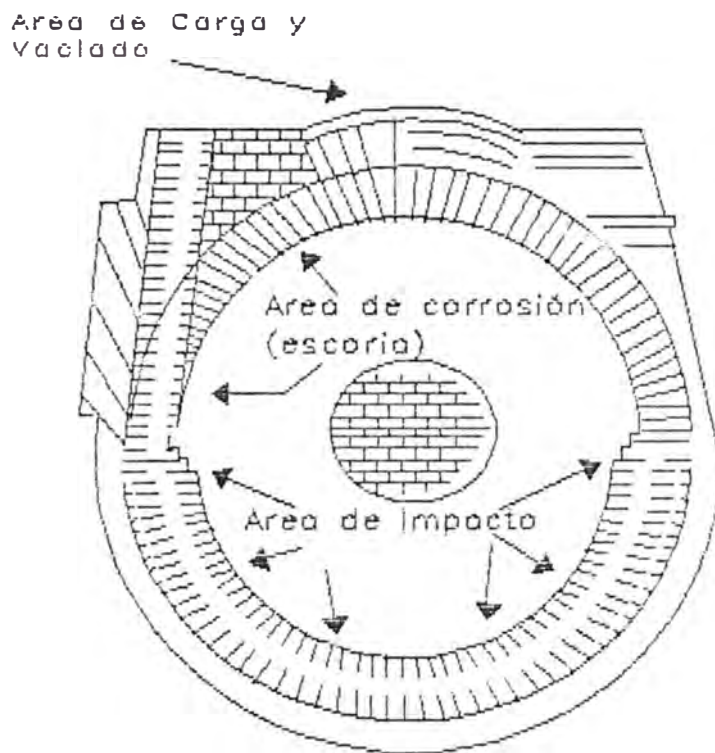
(1) Area de impacto, en la cual comúnmente se presenta excesiva erosión y por lo tanto es necesario que los refractarios presenten ciertas propiedades requeridas para afrontar esfuerzos a alta temperaturas, alta resistencia al ataque químico corrosivo y al choque térmico. (2) Boca, ésta zona mayormente presenta problemas que están asociados con la instalación de los ladrillos refractarios y con la resistencia a los mecanismos destructivos durante el servicio. (3) Cilindro y conos, las cuales están sujetas a distintos ataques mecánicos provocados por el metal caliente, especialmente cuando el metal es mantenido en el carro por largos periodos de tiempo.

En la Figura 4.4 se ilustra las áreas de corrosión y de impacto de los refractarios del carro torpedo.

Tabla 4.3 Mecanismos de uso del ladrillo refractario

Area del Carro torpedo	Tipo de desgaste
Impacto	Impacto del metal
	Erosión del metal
	Alta temperatura de fusión y carga
Carga	Choque térmico
Vaciado	Impacto del metal
	Erosión por metal
	Alta temperatura de fusión
Contacto con el baño	Alta temperatura de fusión y carga
	Corrosión por metal

Fig. 4.4 Area de Corrosión e Impacto en el Carro torpedo



## 2) Selección de Refractarios.-

Para las zonas de contacto con el metal caliente (cilindro y conos), el uso de los refractarios básicos de liga directa son los más apropiados para el fin que se persigue. Estos refractarios básicos presentan las más notables características de resistencia mecánica en caliente, resistencia al ataque de escorias y estabilidad dimensional a temperaturas cercanas a 1800 °C. Para este grupo se presenta la serie Nucon de ladrillos de Magnesita y Cromo, las cuales presentan contenidos de 50, 60, 70 y 80 % MgO. En el diseño de estos refractarios se limita la unión de partículas mediante silicatos, y en cambio se promueve la unión directa de periclasa y espinel, lo que garantiza su desempeño aún bajo las condiciones más severas. Dentro de este tipo de ladrillos refractarios básicos se ha seleccionado el HW-21/74 y Novus VL.

Tabla 4.4 Características de los ladrillos refractarios de contacto

Características	HW- 21/74	Novus VL
<b>Propiedades Físicas</b>		
Densidad global, kg/m <sup>3</sup>	3,100	3,252
Porosidad aparente, %	17	18
Resistencia a la compresión, KPa	17,283	15,509
Modulos de Rotura, KPa		
21 °C		5,102
1482 °C		5,998
<b>Composición Química, %</b>		
SiO <sub>2</sub>	1.8	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.5	9.9
TiO <sub>2</sub>		0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.9	12.9
CaO	0.4	0.6
MgO	62.8	47.8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.4	28.0

Para las partes de las zona cilíndrica y cónica que no están en contacto con el metal caliente, el ladrillo más indicado es el tipo de refractario aislante por tener baja conductividad térmica y por consiguiente mantener la temperatura del metal líquido. Estos refractarios son productos livianos, porosos con una capacidad calorífica y conductividad térmica mucho menor que los refractarios comunes. La A.S.T.M. clasifica los refractarios aislantes en los grupos 16, 20, 23, 26 y 28; y este número de grupo representa la temperatura máxima nominal a la cual el refractario puede ser expuesto en servicio en su cara caliente. El ladrillo refractario seleccionado es el tipo HW-28.

Tabla 4.5 Características del ladrillo refractario aislante HW-28

Características	HW-28
<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad global, kg/m <sup>3</sup>	770
Resistencia a la compresión, KPa	1,618
Modulo de Rotura, KPa	1,520
Conductividad térmica, Kcal/h m <sup>2</sup> °C	
200 °C	0.248
400 °C	0.248
600 °C	0.324
800 °C	0.372
<b>Composición Química, %</b>	
SiO <sub>2</sub>	51.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.5
TiO <sub>2</sub>	1.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6
CaO	0.2
MgO	0.2



#### 4.2.2.2 Morteros

La erosión en las juntas es un problema común en los Carros torpedo, haciéndose la selección del correcto mortero como una decisión crítica como el caso de escoger el correcto ladrillo. El mortero realiza más que la función de un lazo individual en la unión de ladrillos refractarios (juntas), sino también como un medio de protección de la juntas contra el ataque de metales calientes. El uso de este mortero también se extiende como ladrillo refractario, ubicándose por encima del revestimiento interior (forro) del carro torpedo, y presentando la misma velocidad de desgaste que sufre como mortero refractario.

De acuerdo a los problemas de desgaste (erosión) que se presentan en las juntas, en la selección de un mortero que sea compatible con el ladrillo refractario en uso se debe tener en cuenta lo siguiente : Los morteros presentan una composición más o menos igual al ladrillo refractario, pero cuando la erosión en las juntas es severa, un mortero de alta calidad es requerido para resistir el ataque del metal caliente.

Existen varios tipos de morteros refractarios entre las cuales tenemos : (1) Coralbond (80 % de alumina), mortero de alta resistencia mecánica. (2) HW 16-73 (65 % de alumina), mortero altamente refractario, volumen estable, adecuada trabajabilidad y adherencia. (3) Ankorite (65 % de alumina), mortero de la versión seca de HW 16-73. (4) Harnix (alta alumina), mortero de excelente estabilidad volumétrica a altas temperaturas.

Tabla 4.6 Características del Mortero refractario Harnix

Características	Harnix (alta alumina)
<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad global, kg/m <sup>3</sup>	2,771
Porosidad aparente, %	17
Resistencia a la compresión, KPa	
110 °C	24,177
1,260 °C	62,283
Modulo de Rotura, KPa	
110 °C	4,119
1260 °C	13,830
<b>Composición Química, %</b>	
SiO <sub>2</sub>	11.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	84.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1

### 4.3 Transferencia de Calor

La condición fundamental para que exista transferencia de calor entre dos puntos, es que uno de ellos se encuentra a mayor temperatura. La energía calorífica se transferirá del punto de mayor temperatura al de menor y esto puede efectuarse directamente de una partícula de la materia a otra, por mezcla de materia, o por el transporte de energía radiante en forma de ondas electromagnéticas (si entre los puntos materiales existe el vacío).

#### 4.3.1 Mecanismos de Transferencia

El flujo de calor no está regido por una sola relación, sino más bien por una combinación de varias leyes independientes. Existe tres modelos matemáticos distintos de mecanismos de transmisión de calor : (1) Conducción, (2) Convección y (3) Radiación.

#### 4.3.1.1 Conducción

La conducción es proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso). En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. Cuando existe una gradiente de temperatura en un cuerpo (entre dos regiones), se ha demostrado que existe una transferencia de energía por conducción y que la razón de la transferencia de calor por unidad de área es proporcional a la gradiente normal de temperatura.

$$\frac{q}{A} \propto \frac{dt}{dx}$$

Cuando la constante  $K$  (conductividad térmica del material) de proporcionalidad es introducida,  $q = -K A dt / dx$ . Esta ecuación (Ley de Fourier de conducción de calor), donde  $q$  es la razón de transferencia de calor y  $dt / dx$  es la gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

La conducción térmica se puede dar por intermedio de una pared simple ó múltiple, plana o cilíndrica (para el caso del carro torpedo se tomara el sistema cilíndrico), para lo cual se deberá considerar un cilindro largo de radio interior  $R_i$ , radio exterior  $R_e$  y longitud  $L$ , la cual se expondrá a una diferencial de temperaturas (interior  $T_i$  y exterior  $T_e$ ). El flujo de calor será en la dirección radial, así que la única coordenada en el espacio necesaria para especificar el sistema es  $r$ . El flujo de calor para una pared cilíndrica de una capa sería :

$$q = \frac{2\pi L (T_i - T_e)}{\ln (r_e / r_i)}$$

Para el caso de una pared cilíndrica de dos capas de ladrillos refractarios y de una capa metálica que recubre a estas según la Figura 4.5

Aplicando la ley de Fourier tenemos que la pérdida de calor estaría dada por :

$$q = \frac{2\pi L (T_1 - T_4)}{\frac{\ln (r_2 / r_1)}{k_a} + \frac{\ln (r_3 / r_2)}{k_b} + \frac{\ln (r_4 / r_3)}{k_c}}$$

Donde :

$q$  = Flujo calorífico, Kcal/h

$L$  = Longitud del cilindro, m

$T_1$  = Temperatura interior en el cilindro, ° C

$T_4$  = Temperatura exterior de la placa metálica, ° C

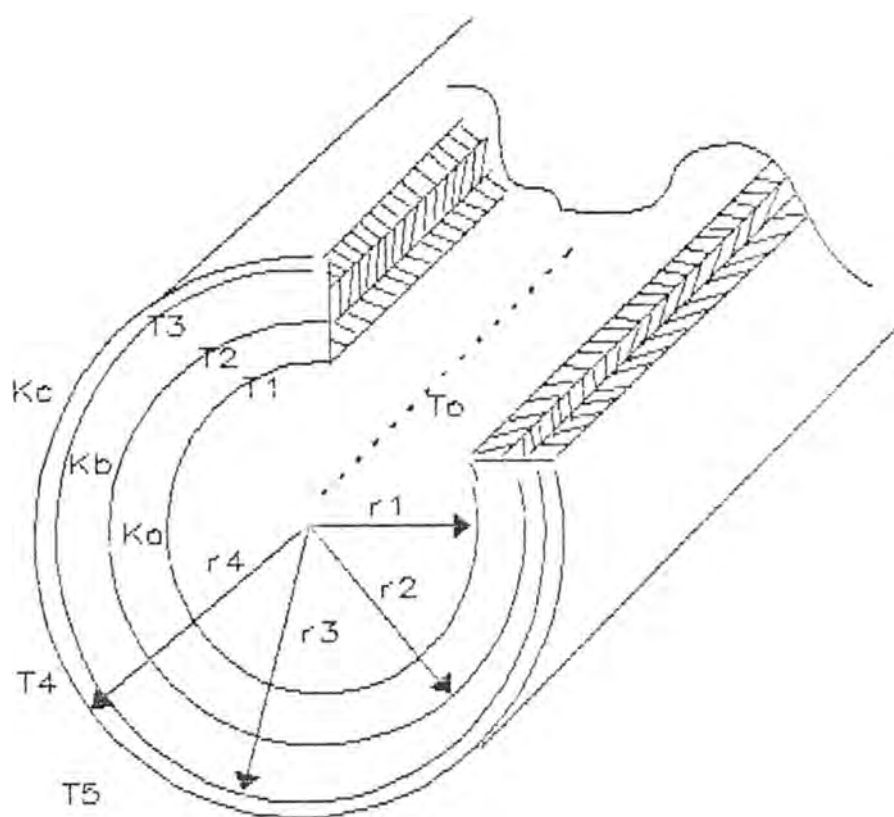
$r_1, r_2, r_3, r_4$  = Radios de las capas interiores, m

$K_a, K_b, K_c$  = Constantes de conductividad térmica, Kcal/h m<sup>2</sup> °C/cm

#### 4.3.1.2 Convección

La Convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. La transferencia de calor por convección ocurre siempre que un cuerpo se coloca en un fluido cuya temperatura es mayor o menor que la del cuerpo. Como resultado resultado de la diferencia de temperaturas, fluye calor entre el fluido y el cuerpo y ocasiona un cambio de densidad de las capas de fluido en la vecindad de

Fig. 4.5 Diagrama de conducción de calor en el carro torpedo



la superficie. La diferencia de densidades provoca un flujo descendente del fluido más pesado y un flujo ascendente del fluido más ligero.

Cuando el movimiento del fluido es ocasionado solamente por las diferencias de densidad resultantes de los gradientes de temperatura, el mecanismo de transferencia de calor asociado se conoce como convección libre o natural. Considerando una placa caliente con una temperatura en la pared exterior  $T_e$  expuesta a un fluido exterior con una temperatura  $T_a$ , la rapidez de la transferencia de calor por convección en la frontera entre la placa y el fluido es por medio de la ecuación :

$$q = h_c A (T_e - T_a)$$

Donde transferencia de calor  $q$  esta relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, el área de la superficie  $A$  y el coeficiente de la transferencia de calor por convección  $h_c$ .

Convección libre ó natural	$h_c = C \Delta T^{1/3}$
Convección forzada (aire)	$h_c = 1.674 (\Delta T)^{1/4} (0.975V + 1)^{1/2}$
	$\Delta T = T_s - T_a$

Donde :

$h_c$  – Coeficiente de Convección para el fluido exterior (aire), Kcal/h m<sup>2</sup> °C

$T_s$  – Temperatura de la superficie radiante, °C

$T_a$  = Temperatura del medio ambiente, °C

$C$  – Constante que depende de la forma y posición de la superficie de transferencia

$V$  – Velocidad del fluido (aire), Km/h

### 4.3.1.3 Radiación

La radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La cantidad total de radiación emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo, se denomina poder de emisión total (coeficiente de emisividad), que depende de la temperatura y de las características de la superficie del cuerpo. En este mecanismo, la transferencia de calor ocurre entre un cuerpo radiador y un cuerpo absorbente, propagándose el calor desde el cuerpo radiador en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio hasta que chocan con el cuerpo absorbente, donde una parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna.

Las consideraciones termodinámicas muestran que un radiador ideal o cuerpo negro emitirá energía a una razón proporcional con una temperatura absoluta del cuerpo elevada a la cuarta potencia. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio neto de calor es entonces proporcional a la diferencia de temperaturas.

$$q = \sigma A E ((T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4)$$

Donde :

- $\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann
- $A$  – Area de la superficie radiante,  $m^2$
- $E$  = Factor de emisividad de la superficie
- $T_s$  – Temperatura de la superficie radiante,  $^{\circ}C$
- $T_a$  = Temperatura del cuerpo absorbente,  $^{\circ}C$

El factor que rige la transferencia de calor por radiación de una pared caliente al medio ambiente, es la diferencia de temperaturas. Generalmente la transferencia de calor por radiación del fluido interior a la pared interna es un factor muy pequeño para tenerlo presente en el cálculo. En cambio la temperatura de la transferencia de calor por radiación de la pared externa al medio ambiente si es un término muy importante. El coeficiente de película por radiación es función de la temperatura exterior del sólido que radia el calor, y de la temperatura del medio ambiente, y del tipo de la superficie (estado) que radia calor y está dada por la ecuación

$$h_r = 4.925 E (((T_s + 273)/100)^4 - ((T_a + 273)/100)^4) / (T_s - T_a)$$

Donde :

- $h_r$  = Coeficiente de película por radiación, Kcal/h m<sup>2</sup> °C
- $T_s$  – Temperatura de la superficie radiante, °C
- $T_a$  = Temperatura del ambiente (aire), °C
- $E$  – Factor de emisividad de la superficie

El flujo de calor en el carro torpedo estará sujeta un tipo de mecanismo que involucrará los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación de acuerdo a las condiciones de transferencia de calor de un cuerpo sólido a un fluido en movimiento. Dentro de los parámetros a tomar en consideración en el flujo de calor, es necesario indicar la apreciable diferencia de temperaturas que existe entre el cuerpo sólido y el fluido y la necesidad de tomar en cuenta la resistencia que presentará el aire en el lado exterior de la pared del carro torpedo.



El flujo de calor en función de la longitud del carro torpedo será :

$$q = \frac{\pi L (T_0 - T_5)}{\frac{\ln(d_2 / d_1)}{2k_a} + \frac{\ln(d_3 / d_2)}{2k_b} + \frac{\ln(d_4 / d_3)}{2k_c} + \frac{1}{(h_c + h_r) d_4}}$$

Donde :

L = Longitud del carro torpedo, m

K<sub>a</sub> = Conductividad térmica del ladrillo refractario de contacto, Kcal/h m<sup>2</sup> °C/m

K<sub>b</sub> = Conductividad térmica del ladrillo refractario aislante, Kcal/h m<sup>2</sup> °C/m

K<sub>c</sub> = Conductividad térmica del forro de acero (100 °C), Kcal/h m<sup>2</sup> °C/m

d<sub>1</sub> = Diámetro del ladrillo refractario de contacto, m

d<sub>2</sub> = Diámetro al inicio del ladrillo refractario aislante, m

d<sub>3</sub> = Diámetro al fin del ladrillo refractario aislante, m

d<sub>4</sub> = Diámetro al fin del forro de acero, m

T<sub>0</sub> = Temperatura del cobre líquido, °C

T<sub>5</sub> = Temperatura del medio ambiente, °C

#### 4.3.2 Flujo de Calor en el carro torpedo

La relación para determinar el flujo de calor en el carro torpedo será :

$$q = \frac{\pi L (T_0 - T_5)}{\frac{\ln(d_2 / d_1)}{2k_a} + \frac{\ln(d_3 / d_2)}{2k_b} + \frac{\ln(d_4 / d_3)}{2k_c} + \frac{1}{(h_c + h_r) d_4}}$$

De acuerdo a especificaciones técnicas del diseño del carro torpedo y características de los ladrillos refractarios a ser considerados en el carro torpedo con una capacidad de carga de 120 toneladas métricas de cobre líquido, se tendrá los siguientes datos para la relación del flujo de calor :

$$\begin{aligned}
 L &= 7.47 \text{ m} \\
 K_a &= 14.88 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m} \\
 K_b &= 0.372 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m} \\
 K_c &= 372 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m} \\
 d_1 &= 2.36 \text{ m} \\
 d_2 &= 2.74 \text{ m} \\
 d_3 &= 2.93 \text{ m} \\
 d_4 &= 2.99 \text{ m} \\
 T_0 &= 1,450 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_5 &= 27 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Cálculo de Coeficiente por Convección :  $h_c = 1.674 (\Delta T)^{1/4} (0.975V + 1)^{1/2}$

$$\Delta T = T_s - T_a$$

Donde :

$$\begin{aligned}
 T_s &= 60 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_a &= 27 \text{ }^\circ\text{C} \\
 V &= 24.135 \text{ Km/h}
 \end{aligned}$$

Reemplazando los datos se tiene :

$$h_c = 18.026 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m}$$

Cálculo del Coeficiente por radiación :

$$h_r = 4.925 E \left( \left( \frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right) / (T_s - T_a)$$

Donde :

$$E = 0.75$$

$$T_s = 60^\circ\text{C}$$

$$T_a = 27^\circ\text{C}$$

Reemplazando los datos se tiene :

$$h_c = 4.697 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m}$$

Cálculo del flujo de Calor en el carro torpedo :

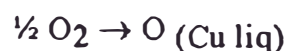
$$Q = \frac{(\pi)(7.47)(1450 - 27)}{\frac{\ln(2.74/2.36)}{(2)(14.88)} + \frac{\ln(2.93/2.74)}{(2)(0.372)} + \frac{\ln(2.99/2.93)}{(2)(372)} + \frac{1}{(18.026 + 4.697)(2.99)}}$$

$$Q = 303,929 \text{ Kcal/h}$$

#### 4.4 Físico-Química en el transporte del cobre líquido

Durante el transporte de cobre líquido en el carro torpedo se inyectará un quemador al baño para mantener la temperatura del baño y así poder contrarrestar las pérdidas de energía que se originen durante el traslado. Principalmente las reacciones que se producirán serán debidos a la oxidación de las impurezas presentes en el cobre líquido y reducción de los hidrocarburos presentes en el petróleo residual.

Para el proceso de oxidación se dispone de un baño de cobre líquido impuro que se encuentra como una solución metálica en la cual se encontrarán disueltas una gran variedad de solutos metálicos en concentraciones muy diversas. El proceso químico propiamente comenzará cuando se introduce el oxígeno en el baño líquido y tendrá como principal reacción



Esta reacción corresponde a la disolución química del oxígeno gaseoso en la fase líquida del cobre y presentará como energía libre de Gibbs la siguiente relación

$$\Delta G \frac{1}{2} \text{O}_2 = - 20,710 + 4.575 \log [\text{O}] + 10.87 T$$

La expresión es válida para un rango de temperatura entre 1,100 °C y 1,500 °C, y se ha tomado al  $\text{O}_{(g)}$  con una temperatura T y una presión de 100 Kpa como estado estándar tanto para el oxígeno diatómico como para el oxígeno disuelto. Cuando la concentración del oxígeno en el baño es 1% atómico ( $[\text{O}] = 0.01$ ), la expresión para  $\Delta G \frac{1}{2} \text{O}_2$  es :

$$\Delta G \frac{1}{2} \text{O}_2 = - 20,710 + 1.72 T$$

Esta reacción de atomización y disolución es exotérmica y espontánea, es decir que la inyección de oxígeno en el baño de cobre favorecerá la liberación de calor y su cinética dependerá de la transferencia de masa que ocurra entre la fase gaseosa y líquida.

El parámetro de interacción del oxígeno (solubilidad del oxígeno en el cobre líquido) es negativa, por lo cual existe una tendencia por el agrupamiento entre átomos de cobre y oxígeno dentro de la solución líquida a medida que se incrementa la concentración de oxígeno. Este efecto se debe a la diferencia de electronegatividad entre el cobre y el oxígeno, y es así que a medida que aumenta la concentración de oxígeno, los grupos O–Cu–O, se convertirán cada vez en polares, es decir  $O^{-2}-Cu^{+}-O^{-2}$ , las cuales estarán sometidas constantemente a la unión de otros átomos de oxígeno a medida que el porcentaje de oxígeno aumente. De esta manera se explica la tendencia que tiene el oxígeno disuelto hacia la formación del compuesto  $Cu_2O$ .

Si el cobre líquido tiende a oxidarse hasta alcanzar el estado de oxidación (grado de saturación), aparecerá una fase líquida que es inmisible en el cobre oxidado y se separa de acuerdo a la siguiente reacción de equilibrio



En la expresión el Cu (l), es el cobre líquido que contiene átomos de oxígeno en solución, y la fase  $Cu_2O$ , es el óxido cuproso líquido que contiene cobre disuelto, la cual por ser de menor densidad que el cobre (aprox.  $5.7 \text{ gr/cm}^3$ ) se encontrará en suspensión sobre el cobre líquido. La formación del óxido cuproso presentará las siguientes relaciones para la energía libre de Gibbs

$$\Delta G_{Cu_2O} = -45,373 + 21.7 T, \text{ para un rango entre } 1356 \text{ }^\circ\text{C y } 1515 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta G_{Cu_2O} = -35,611 - 8.77 \ln T + 42.56 T, \text{ para un rango entre } 1515 \text{ }^\circ\text{C y } 1800 \text{ }^\circ\text{C}$$

El propósito principal de la inyección de un quemador en el baño de cobre líquido es aprovechar simultáneamente la reacción exotérmica y la eliminación de impurezas contenidas en el baño, por tal motivo las reacciones de las impurezas serán fundamentales en el proceso de oxidación. Para este efecto se tiene tres mecanismos de oxidación para cualquier tipo de impureza (Me) disuelta en el cobre líquido, las cuales tienen las siguientes reacciones de equilibrio .

- (1) En el seno del líquido :  $x \text{ Me (Cu liq)} + y \text{ O (Cu liq)} \rightarrow \text{Me}_x\text{O}_y$   
 (2) En la interfase gas-líquido :  $x \text{ Me (Cu liq)} + y/2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{Me}_x\text{O}_y$   
 (3) En la interfase metal-escoria :  $x\text{Me(Cu liq)} + y\text{Cu}_2\text{O} \rightarrow 2y\text{Cu (l)} + \text{Me}_x\text{O}_y$

donde : x,y son parámetros estequiométricos

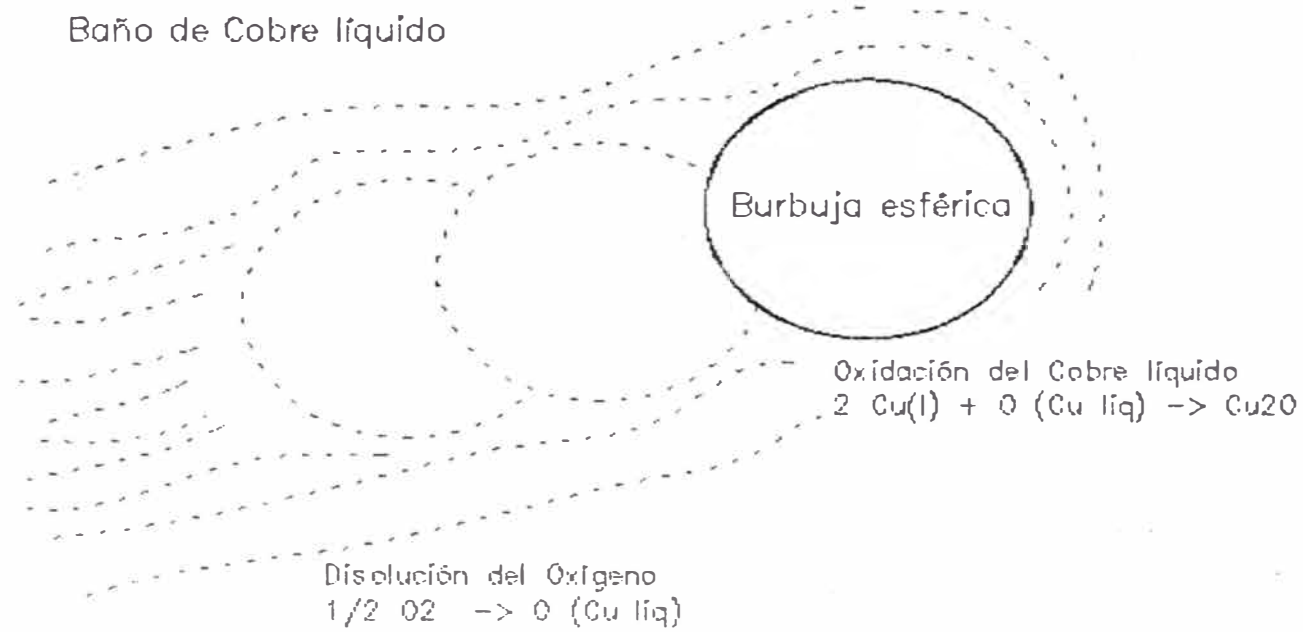
La constante de equilibrio de estas reacciones es :

$$K_E = \frac{a_{\text{Me}_x\text{O}_y}}{(a_{\text{Me}})^x \cdot (a_{\text{O}})^y}$$

Los dos primeros mecanismos se ilustran esquemáticamente en la Figura 4.6, que representa un modelo esférico ideal de burbuja de aire que se desplaza en el seno de la masa del cobre líquido. La termodinámica indica que el primer mecanismo es el más favorecido, pero es controlada por la difusión del oxígeno en el baño de cobre líquido con el fin de concentrar átomos de las respectivas impurezas.

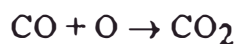
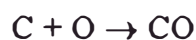
Para la formación de  $\text{Me}_x\text{O}_y$  existe tres posibilidades para el estado de agregación de este compuesto, es decir sólido, líquido ó gaseoso, lo cual a su vez produce tres vías para la eliminación de las impurezas

Fig. 4.6 Mecanismo de Oxidación de las impurezas



- (1) Eliminación parcial en la escoria y fase gaseosa, como son el Pb, Sn y Bi.
- (2) Eliminación casi total en la escoria, que ocurre con los óxidos condensados no volátiles, tales como las impurezas (Fe, Ni, Mn) y metales reactivos.
- (3) Eliminación total en la fase gaseosa, la cual ocurre con los óxidos volátiles, tales como el S, Se y Te.

La introducción de petróleo residual Nº 6 en el baño de cobre líquido originaría una reacción de reducción en el baño. Una vez craqueados los hidrocarburos y liberados los elementos que participarán directamente en la reducción pueden plantearse las siguientes reacciones



#### 4.5 Balance de Energía en el Carro torpedo

##### 4.5.1 Calores de entrada

(1) Calor sensible de los materiales de entrada

Calor sensible del cobre líquido e impurezas a 1450 °C

Calor sensible del cobre :  $Q_s = W_{Cu} \cdot L_{Cu} \cdot T$

Donde :

$Q_s$  = Calor sensible del cobre líquido, Kcal

$W_{Cu}$  = Peso de cobre líquido, Kg

$L_{Cu}$  = Calor específico del cobre líquido, Kcal/Kg °C



$$T = \text{Calor del cobre líquido, } ^\circ\text{C}$$

Reemplazando datos :

$$Q_s = (121,350 \text{ Kg})(0.992)(0.112 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(1450 ^\circ\text{C})$$

$$Q_s = 19'549,582 \text{ Kcal}$$

Calor sensible de las impurezas :  $Q'_s = W_{\text{imp}} \cdot L_{\text{imp}} \cdot T$

Donde :

$$Q'_s = \text{Calor sensible de las impurezas, Kcal}$$

$$W_{\text{imp}} = \text{Peso de las impurezas, Kg}$$

$$L_{\text{imp}} = \text{Calor específico de las impurezas, Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = \text{Temperatura de las impurezas, } ^\circ\text{C}$$

Reemplazando datos :

$$Q_s = (121,350 \text{ Kg})(0.08)(0.3 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(1450 ^\circ\text{C})$$

$$Q_s = 422,298 \text{ Kcal}$$

Calor sensible del cobre  $Q_{\text{Cu}} = Q_s + Q'_s$

$$Q_{\text{Cu}} = 19'971,880 \text{ Kcal}$$

Calor sensible del petróleo residual N° 6

De acuerdo al flujo (pérdidas) de calor por conducción, convección y radiación, estas serían contrarrestadas con el uso de petróleo residual N° 6.

Calor sensible del petróleo :  $Q_p = (Q / P_{\text{cp}}) \cdot t \cdot L_p \cdot T$

Donde :

$Q_D$  = Calor sensible del petróleo, Kcal

$Q$  = Flujo de calor en el Carro torpedo, Kcal/h

$P_{CD}$  = Poder calorífico del petróleo, Kcal/Kg

$t$  = Tiempo de traslado de Fundición a Refinería, h

$L_D$  = Calor específico del petróleo, Kcal/Kg °C

$T$  = Temperatura del petróleo

Reemplazando datos :

$$Q_p = (303,929 \text{ Kcal/h} / 10,632 \text{ Kcal/Kg})(1 \text{ h})(0.5 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(28 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_p = 400.21 \text{ Kcal}$$

Calor sensible del aire

Distribución del petróleo residual N° 6 en base a su composición química :

$$C = (28.59 \text{ Kg})(0.859) = 24.56 \text{ Kg}$$

$$H = (28.59 \text{ Kg})(0.107) = 3.06 \text{ Kg}$$

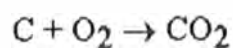
$$O = (28.59 \text{ Kg})(0.007) = 0.20 \text{ Kg}$$

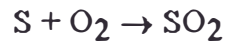
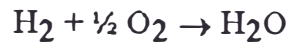
$$N = (28.59 \text{ Kg})(0.0164) = 0.47 \text{ Kg}$$

$$S = (28.59 \text{ Kg})(0.0106) = 0.30 \text{ Kg}$$

$$\text{Total} = 28.59 \text{ Kg}$$

Cálculo del Oxígeno teórico para la combustión del petróleo residual N° 6 de acuerdo a las siguientes reacciones de combustión :





Oxígeno requerido para cada reacción :

$$\text{O}_2 (\text{C}) = (24.56 \text{ Kg})(32/12) = 65.49 \text{ Kg}$$

$$\text{O}_2 (\text{H}) = (3.06 \text{ Kg})(16/2) = 24.48 \text{ Kg}$$

$$\text{O}_2 (\text{S}) = (0.3 \text{ kg})(32/32) = 0.30 \text{ Kg}$$

$$\text{Total} = 90.25 \text{ Kg}$$

$$\text{O}_2 (\text{petróleo residual}) = 0.20 \text{ Kg}$$

$$\text{O}_2 (\text{aire a suministrar}) = 90.07 \text{ Kg}$$

Volumen de oxígeno a condiciones normales

$$V_a = (90.07 \text{ Kg})(22.4 \text{ m}^3/\text{mol kg})/(32 \text{ kg/mol kg}) = 63.05 \text{ m}^3$$

Volumen del aire requerido a condiciones normales

$$V_o = 63.05 \text{ m}^3 / 0.21 = 300.23 \text{ m}^3$$

Volumen del aire requerido a condiciones reales

$$V_o = (300.23 \text{ m}^3)((273 + 28)/273)(760/756) = 332.77 \text{ m}^3$$

Calor sensible del aire

$$Q_a = (332.77 \text{ m}^3)((0.303 + 0.000022(28))\text{Kcal/m}^3 \text{ }^\circ\text{C})(28 \text{ }^\circ\text{C}) = 2,828.96 \text{ Kcal}$$

Calor sensible total :  $Q_t = Q_{Cu} + Q_p + Q_a$

$$Q_t = 19'975,109 \text{ Kcal}$$

(2) Calor suministrado por la combustión del petróleo residual N° 6

$$Q'_p = (28.59 \text{ Kg})(10,632 \text{ Kcal/Kg}) = 303,969$$

(3) Calores producidos por las reacciones exotérmicas

La introducción de petróleo residual N° 6 en el baño de cobre líquido originará la reducción del  $\text{Cu}_2\text{O}$  en el baño.

Cantidad de  $\text{Cu}_2\text{O}$  reducido por el petróleo residual



$$\text{Carbono en el petróleo} = (28.59 \text{ Kg})(0.859) = 24.56 \text{ Kg}$$

Considerando que el 70 % de C está en forma de CO

$$(24.56 \text{ Kg C})(0.70)(28 \text{ Kg CO})/12 \text{ Kg C} = 40.11 \text{ Kg CO}$$

$$(40.11 \text{ Kg CO})(143 \text{ Kg Cu}_2\text{O})/28 \text{ Kg CO} = 204.84 \text{ Kg Cu}_2\text{O}$$

Calor producido por la reducción del  $\text{Cu}_2\text{O}$  :

$$Q_{\text{Cu}_2\text{O}} = (204.84 \text{ Kg Cu}_2\text{O})(37,692 \text{ Kcal/mol Kg})(1 \text{ mol kg}/143 \text{ Kg Cu}_2\text{O})$$

$$Q_{\text{Cu}_2\text{O}} = 53,992 \text{ Kcal}$$

#### 4.5.2 Calores de Salida

(1) Calores sensibles de los materiales de entrada

Calor sensible del cobre líquido a 1250 °C

$$Q_s = (121,350 \text{ Kg})(0.992)(0.112 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(1250 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_s = 16'853,088 \text{ Kcal}$$

Calor sensible de las impurezas del cobre a 1250 °C

$$Q'_s = (121,350 \text{ Kg})(0.008)(0.3 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(1250 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_s = 364,050 \text{ Kcal}$$

Calor sensible del cobre  $Q_{Cu} = Q_s + Q'_s$

$$Q_{Cu} = 17'217,138 \text{ Kcal}$$

Calor sensible de los gases de Combustión

Cálculo del peso de los productos de combustión

$$\text{CO}_2 = (24.56 \text{ Kg C})(44 \text{ Kg CO}_2/12 \text{ Kg C}) = 90.05 \text{ Kg CO}_2$$

$$\text{SO}_2 = (0.3 \text{ Kg S})(64 \text{ Kg SO}_2/32 \text{ Kg S}) = 0.60 \text{ Kg SO}_2$$

$$\text{H}_2\text{O} = (3.06 \text{ Kg H})(18 \text{ Kg H}_2\text{O}/2 \text{ Kg H}) = 27.54 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

$$\text{N}_2 = (332.77 \text{ m}^3)(0.79) = 262.89 \text{ m}^3 \text{ N}_2$$

$$\text{O}_2 = (332.77 \text{ m}^3)(0.21) = 69.88 \text{ m}^3 \text{ O}_2$$

Calor llevado por el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>

$$Q = (90.05 + 0.60)((0.406 + 0.00009(1150^\circ\text{C}))\text{Kcal/Kg}^\circ\text{C})(1150 - 28)^\circ\text{C}$$

$$Q = 51,821 \text{ Kcal}$$

Calor llevado por el H<sub>2</sub>O

$$Q' = (27.54 \text{ Kg})(1 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C})(100-288) ^\circ\text{C} + (27.54 \text{ Kg})((0.406 + 0.00005(1150 ^\circ\text{C}))\text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C})(1150 - 28)^\circ\text{C}$$

$$Q' = 16,305 \text{ Kcal}$$

Calor llevado por el N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>

$$Q'' = (262.89 + 69.88)((0.302 + 0.000022(1150))\text{Kcal/m}^3)(1150 - 28) ^\circ\text{C}$$

$$Q'' = 122,203 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor sensible de los gases : } Q_{\text{gases}} = Q + Q' + Q''$$

$$Q_{\text{gases}} = 190,329 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor sensible de salida : } Q = Q_{\text{Cu}} + Q_{\text{gases}}$$

$$Q = 17'407,467 \text{ Kcal}$$

(2) Calor de pérdida por conducción, convección y radiación

$$Q = 303,969 \text{ Kcal}$$

(3) Calor absorbido por los refractarios

$$Q = 2'621,634 \text{ Kcal}$$

Tabla 4.7 Balance de energía en el Carro torpedo

	Kcal
<b>Calores de entrada</b>	
Calores sensibles de los materiales	19'975,109
Calor de combustión del petróleo	303,969
Calor de reacción de reducción	53,992
Total	20'333,070
<b>Calores de salida</b>	
Calores sensibles de los materiales	17'407,467
Calor de pérdida en los entornos	2'925,603
Total	20'333,070

## **CAPITULO V**

### **EVALUACIÓN ECONÓMICA**

#### **5.1 Introducción**

Teniendo en cuenta los análisis de costos de inversión (costo fijo de capital y costos de tratamiento) de cada una de las alternativas de incremento de la capacidad de producción de ánodos (Capítulo III), es necesario evaluar las inversiones con el objetivo de establecer hasta que punto tiene justificación económica la implementación de un sistema de transporte de cobre líquido por medio de carros torpedo desde la Fundición hasta la Refinería. En base a esta evaluación económica, y de acuerdo a una producción de 233,700 toneladas métricas de ánodos (Alternativa C2), se calculara la rentabilidad de esta inversión comparado al actual proceso de refinación ígnea, tiempo de recuperación de la inversión, relación económica costo-beneficio (índice de rentabilidad), análisis de sensibilidad y determinación del punto de equilibrio de la inversión.

#### **5.2 Evaluación económica de las alternativas de incremento**

Esta evaluación económica tiene por finalidad comparar las inversiones (costo fijos de capital) y el costo de tratamiento (materiales y operación) de las alternativas A y B, que involucran producir ánodos en la instalaciones de la Fundición con las alternativas C3 y C4, que consideran el transporte de cobre líquido desde la Fundición hasta la planta de ánodos de la Refinería, de acuerdo a

las proyectadas capacidades de producción de ánodos de 275,520 y 316,816 toneladas métricas.

Tabla 5.1 Costos fijos de capital y de tratamiento de las alternativas de incremento

Producción de ánodos	Costo fijos de capital US\$	Costos de tratamiento US\$
275,520 TM		
Alternativa B	18'390,038	5'096,848
Alternativa C3	5'980,777	7'774,925
316,816 TM		
Alternativa A	28'406,975	4'919,114
Alternativa C4	5'980,777	8'494,569

Las alternativas que consideran el transporte de cobre líquido por medio de carros torpedo, es indudable que son las de menor inversión y no dependen de la capacidad de producción de ánodos. Sin embargo, de acuerdo a los costos de tratamiento, llegara el momento en donde los costos anuales (costos fijos de capital y costos de tratamiento) de las alternativas que involucran producir ánodos en la Fundición serán menores que los costos anuales de las alternativas de transporte de cobre líquido. Por lo tanto es necesario determinar el tiempo a partir del cual será más rentable la producción de ánodos en la Fundición.

La forma de realización de los proyectos es variable, es decir la inversión se realizaría de acuerdo a dos posibles modos : (1) Propios recursos económicos de la empresa y (2) Financiamiento (préstamo) de una entidad bancaria o corporativa (pago del 10% de interés anual). En el caso de financiamiento el procedimiento del cálculo será de acuerdo al método del costo anual, la cual consiste en comparar los costos anuales actualizados en que incurre cada alternativa. Con la finalidad de simplificar los cálculos, se considerará constante el



costo de tratamiento. El costo anual actualizado esta dado por la siguiente expresión :

$$C_a = C_e + C_t$$

Donde :

$C_a$  = Costo anual actualizado

$C_e$  = Costo equivalente de inversión (interés)

$C_t$  = Costo de tratamiento

El costo equivalente de la inversión se obtiene de la expresión :

$$C_a = [ P (1 + i)^n ] / [ ((1 + i)^n - 1) / i ]$$

Donde :

$C_a$  = Costo actualizado de la inversión (interés)

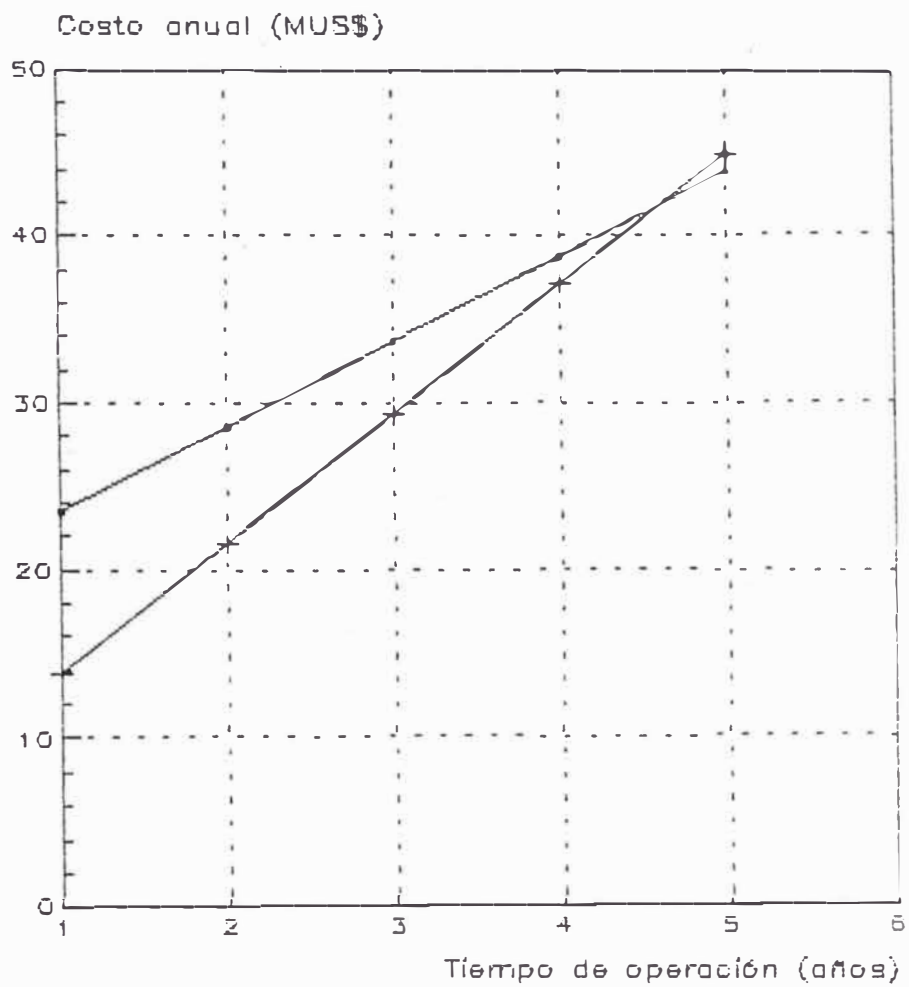
$P$  = Costo de la inversión

$i$  = Tasa de interés

$n$  = Años de operación del proyecto

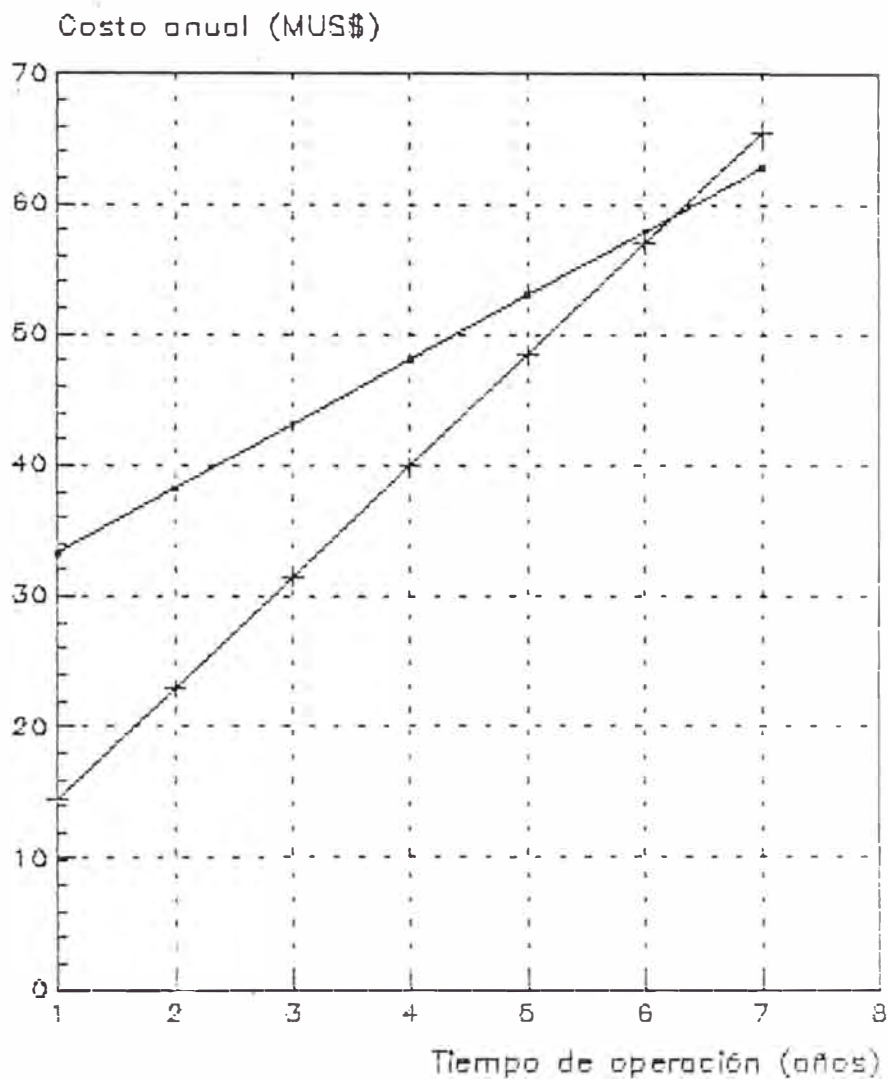
En las Tablas 5.2 y 5.3 se resume los costos anuales obtenidos para las capacidades de producción de 275,520 y 316,816 TM de ánodos respectivamente. En las Figuras 5.1 y 5.2 se muestra esta variación de los costos anuales con el transcurrir del tiempo de operación.

Fig. 5.1 Costos anuales para 275,520 TM ánodes  
(Para  $i=0\%$ )



—•— Alternativa B + Alternativa C3

Fig. 5.2 Costos anuales para 316,816 TM ánodos  
(Para  $i=0\%$ )



—•— Alternativa A + Alternativa C4

Tabla 5.2 Costo anuales para una producción de 275,520 TM de ánodos

Años de operación	Alternativa B US\$	Alternativa C3 US\$
Para $i = 0\%$		
1	23'486,886	13'755,702
2	28'583,182	21'530,627
3	33'680,582	29'305,552
4	38'777,430	37'080,477
5	43'874,278	44'855,402
Para $i = 10\%$		
1	43'715,928	20'334,557
2	39'179,899	24'976,694
3	41'075,489	31'710,511
4	44'578,950	38'967,238
5	48'725,524	46'433,116
6	53'193,614	54'003,558

Tabla 5.3 Costo anuales para una producción de 316,816 TM de ánodos

Años de operación	Alternativa A US\$	Alternativa C4 US\$
Para $i = 0\%$		
1	33'326,089	14'475,346
3	43'164,317	31'464,484
5	53'002,545	48'453,622
6	57'921,659	56'948,191
7	62'840,773	65'442,760
Para $i = 10\%$		
1	64'573,761	21'054,201
3	54'587,182	33'869,443
5	60'496,233	50'031,336
6	64'444,110	58'321,336
7	68'675,722	66'671,244
8	73'084,605	75'058,390

De acuerdo a la tablas 5.2 y 5.3, los costos anuales para la producción de ánodos en la Fundación serán menores a partir

(1) Recursos propios : 4.6 y 6.2 años para la alternativa B y A respectivamente.

(2) Financiamiento : 5.6 y 7.5 años para la alternativa B y A respectivamente.

### 5.3 Costos de tratamiento en la planta de moldeo de la Fundición

Los costos de tratamiento en la planta de moldeo de la Fundición involucra el consumo de materiales (petróleo residual N°6, energía eléctrica, refractarios, aire, agua, vapor) 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 :

- Petróleo residual N° 6                      154.03 US\$/m<sup>3</sup>
- Refractarios                                      0.63 US\$/TM de moldeo
- Energía eléctrica                                0.07 US\$/Kwh
- Agua potable                                      2.10 US\$/m<sup>3</sup>
- Aire    15.10 US\$/TM
- Vapor de agua                                    7.07 US\$/TM
- Supervisión y labor de operaciones    5.60 US\$/horas-hombre
- Materiales de operación y reparación    0.56 US\$/ TM de moldeo

El requerimiento de personal de operación por cada turno de trabajo es de 9 operarios (1 en relevo) por cada rueda de moldeo.

Tabla 5.4 Costos de tratamiento en la planta de moldeo de la Fundición para el sistema de transporte

	Unidades	Actual	Alternativa C2	Alternativa C3	Alternativa C4
<b>Producción</b>					
Moldeo de Cobre <u>ampollos</u>	Tm	272,160	80,108	45,741	
<b>Consumo de materiales</b>					
Petróleo residual N° 6	m3	8,288	4,644	4,644	4,644
Energía eléctrica	Kwh	1,180,443	590,229	590,223	295,114
Agua	m3	42,589	21,366	12,200	
Aire	Tm	3,485	1,953	1,953	1,953
Vapor	Tm	12,098	6,778	6,778	6,778
<b>Personal</b>					
Hornos y Moldeo	hombres	46	11	11	
Horas totales hombre operación	hh/año	130,548	31,218	31,218	
Horas totales hombre rep. M/E	hh/año	53,912	26,961	26,961	13,481
Costo anual de operación	US\$				
<b>Materiales de operación</b>					
Petróleo residual N° 6		1,276,601	715,238	715,238	715,238
Energía eléctrica		82,631	41,316	41,316	20,658
Agua		89,437	44,868	25,619	
Aire		52,625	29,484	29,484	29,484
Vapor		85,536	47,923	47,923	47,923
Refractarios		171,461	50,468	28,817	8,573
Subtotal		1,758,290	929,298	888,397	821,876
<b>Labores de operación</b>					
Supervisión y Labor de operación		731,069	174,821	174,821	
Reparación mecánica/eléctrica		301,907	150,982	150,982	75,491
Materiales de operación y reparación		155,131	45,662	26,072	25,855
Sub-total		1,188,107	371,464	371,464	101,346
<b>Total</b>	US\$	<b>2,946,397</b>	<b>1,300,762</b>	<b>1,259,861</b>	<b>923,222</b>

En la tabla 5.4 se presenta los cálculos de los costos de tratamiento en la planta de moldeo de la Fundición para diferentes capacidades de producción. En la Tabla 5.5 se muestra los costos totales de tratamiento para producir ánodos en la Refinería.

Tabla 5.5 Costo total de tratamiento para producir ánodos en la Refinería

Alternativas	Actual	C2	C3	C4
Producción de ánodos, TM	233,700	233,700	275,520	316,816
Costos				
Planta de ánodos (Refinería)	7'984,570	6'509,146	7'192,728	7'978,101
Planta de moldeo (Fundición)	2'946,397	1'300,762	1'259,861	923,222
Carros torpedo		573,949	582,197	516,468
Costo total, US\$	10'930,967	8'383,857	9'034,786	9'417,791
Costo unitario, US\$/TM	46.77	35.87	32.79	29.73

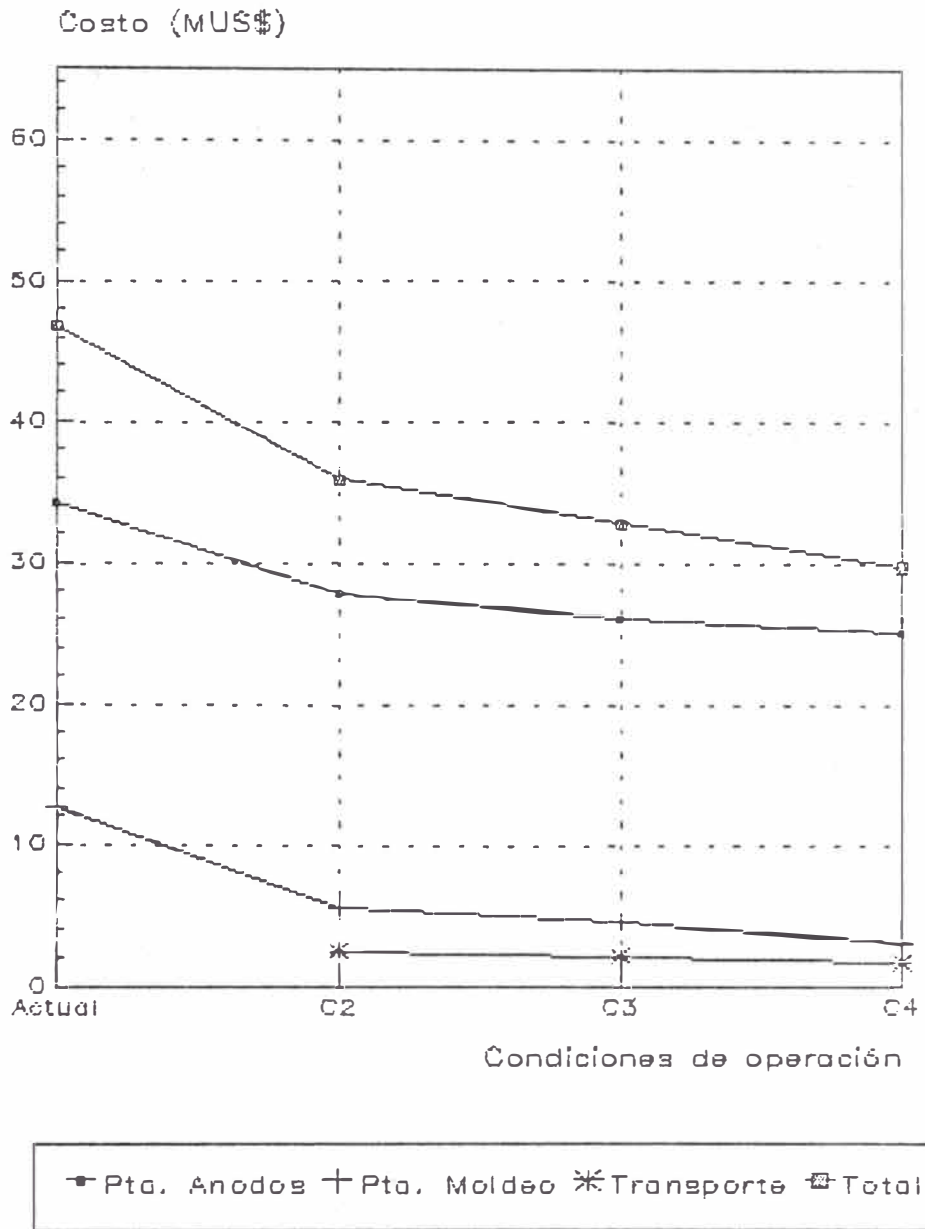
En la Figura 5.3 se muestra la variación del costo de tratamiento por tonelada métrica de ánodo.

## 5.4 Análisis económico del transporte de cobre líquido

### 5.4.1 Base de Estimación

Se tomará como indicador económico el valor presente neto (VPN) calculado en función de la capacidad de producción de ánodos, teniendo en cuenta que se trata de un mismo proyecto. El costo de inversión está dividido en costos fijos de capital y costos de tratamiento (materiales, labores de operación y mantenimiento).

Fig. 5.3 Costos de tratamiento por TM de ánodo





Los ingresos corresponderá a la economía que se tendría en la planta de ánodos de la Refinería y en la planta de moldeo de la Fundición, con la implementación del sistema de transporte de cobre líquido comparado con el actual sistema de refinación, es decir el ahorro en el consumo de materiales de operación (petróleo residual N° 6 y N° 2, energía eléctrica, agua, aire, vapor) y de reparación (mecánica y eléctrico), y en las labores de operación y mantenimiento, mientras los egresos corresponderán a todos los costos de operación del transporte de cobre líquido por los carros torpedo, tanto en materiales (petróleo residual N° 6, refractarios y reparación) y las labores de operación y mantenimiento.

#### 5.4.2 Análisis de Rentabilidad

Teniendo en cuenta los flujos netos de acuerdo a los ingresos y egresos para el sistema de transporte de cobre líquido para producir 233,700 toneladas métricas de ánodos (Alternativa C2), se calculará el valor presente neto (VPN) para diferentes tasas de actualización. Los ingresos corresponderán al ahorro en los costos de tratamiento en la planta de ánodos de la Refinería y en la planta de moldeo de la Fundición, y los egresos corresponden a los costos de transporte de los carros torpedo.

$$VPN = -I_0 + \sum [FN / (1 + i)^n]$$

Donde :

$I_0$  = Inversión neta inicia

$FN$  = Flujos netos = (ingresos – egresos) durante la operación

$i$  = Tasa de actualización

$n =$  Años de operación del proyecto

La inversión del proyecto será de US\$ 5'980,777 y el flujo neto corresponderá a la diferencia entre los ingresos y egresos durante los años de operación. Para una producción de 233,700 toneladas métricas de ánodos, se tiene el siguiente flujo neto constante :

Ingresos = US\$ 3'121,059

Egresos = US\$ 573,949

FN = US\$ 2'547,110

Para  $i = 10\%$

$VPN(10\%) = -5'980,777 + (2'547,110 / (1+0.10)) + (2'547,110 / (1+0.10)^2) + \dots$

De la misma manera se procede para una tasa de actualización de 15 % y 20 %. En la tabla 5.6 se muestra la rentabilidad del proyecto para las tasas de actualización de 10 %, 15 % y 20 %.

Tabla 5.6 Rentabilidad del transporte para producir 233,700 TM de ánodos

Años de operación	VPN		
	10 %	15 %	20 %
1	(3'665,222)	(3'765,898)	(3'858,185)
2	(1'560,172)	(1'839,917)	(2'089,358)
3	353,509	(165,151)	(615,336)
4	2'093,220	1'291,168	613,016
5	3'674,775	2'557,532	1'636,642

### 5.4.3 Tiempo de retorno de la inversión

Se determinara el tiempo de recuperación de la inversión, es decir el número de años al cabo de los cuales se logrará recuperar la inversión inicial y remunerar los costos fijos de capital a una tasa correspondiente a la tasa de actualización (oportunidad).

Tabla 5.7 Flujos netos actualizados para cada tasa de actualización

Años de operación	Flujos netos actualizados (US\$)		
	10 %	15 %	20 %
1	2'315,555	2'214,879	2'122,592
2	4'420,605	4'140,860	3'891,419
3	6'334,286	5'815,626	5'365,441
4	8'073,997	7'271,945	6'593,793
5	9'655,552	8'538,309	7'617,419

De acuerdo a las tablas 5.6 y 5.7 se calculara el tiempo de recuperación de la inversión del proyecto.

Para la tasa de actualización de 10 %

$(1'560,172 / 6'334,286) (12) = 2.9$ , la inversión se recuperaría al cabo de dos años y tres meses.

Para la tasa de actualización de 15 %

$(165,151 / 7'271,945) (12) = 0.27$ , la inversión se recuperaría en el cuarto año.

Para la tasa de actualización de 20 %

$(615,336 / 6'593,793) (12) = 1.1$ , la inversión se recuperaría al cabo de tres años y 1 mes.

#### 5.4.4 Relación Beneficio–Costo

El índice de rentabilidad es otro criterio de evaluación económica de un mismo proyecto para diferentes tasas de actualización, y esta dado por la cantidad de excedente (ganancia) generada por unidad de inversión, después de haber cubierto los costos fijos de capital y de tratamiento.

$$B/C = (VPN + I_0) / I_0$$

Donde :

B/C = Relación Costo–Beneficio

VPN = Valor presente neto

$I_0$  = Inversión inicial

Tabla 5.8 Índice de rentabilidad para el transporte de cobre líquido

Años de operación	B/C		
	10 %	15 %	20 %
1	0.39	0.37	0.36
2	0.74	0.69	0.65
3	1.06	0.97	0.90
4	1.35	1.22	1.10
5	1.61	1.43	1.27

La Figura 5.4 se muestra la variación las curvas del índice de rentabilidad de acuerdo a las tasa de actualización.

#### 5.4.5 Análisis de Sensibilidad

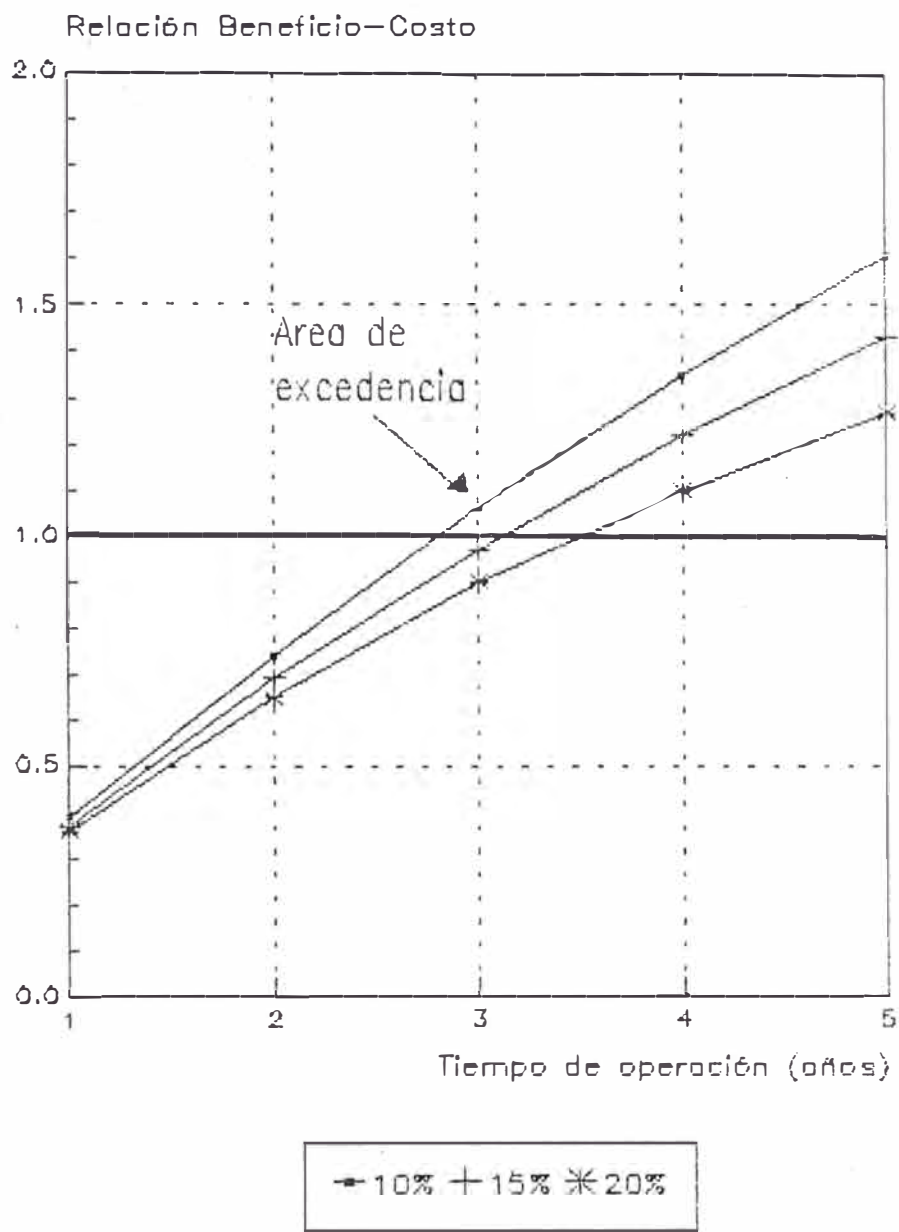
Se determinara los efectos de las variaciones de los ingresos y egresos sobre la rentabilidad (parámetro de decisión de la ejecución del proyecto). El análisis de sensibilidad se realizara de acuerdo a la variación del parámetro del precio del petróleo residual N° 6. Otros parámetros han sido considerados fijos para propósitos de este análisis.

El cálculo se ha realizado hasta un periodo de cinco años, tiempo mínimo en la cual puede ser recuperado la inversión. En la Tabla 5.9 se presenta un resumen de la variación del índice de rentabilidad para cada de tasa de actualización.

Tabla 5.9 Índice de rentabilidad con variación del precio del petróleo

Precio del petróleo US\$/BBL	Tasas de actualización (i)		
	10 %	15 %	20 %
Para n = 3			
20	0.95	0.87	0.80
22	1.00	0.91	0.84
26	1.10	1.07	1.07
28	1.15	1.05	0.97
Para n = 4			
20	1.21	1.09	0.98
22	1.27	1.14	1.04
26	1.40	1.26	1.14
28	1.46	1.32	1.19
Para n = 5			
20	1.44	1.28	1.14
22	1.52	1.34	1.20
26	1.67	1.48	1.32
28	1.75	1.55	1.38

Fig. 5.4 Índice de rentabilidad del transporte



### 5.4.6 Punto de equilibrio

Teniendo en cuenta los ingresos y egresos para el sistema de transporte de cobre líquido para producir 233,700 toneladas métricas de ánodos (Alternativa C2), se calculará el punto de equilibrio para el proyecto. Los egresos corresponderán a los costos de transporte de cobre líquido por los carros torpedo, siendo clasificados como costos fijos y costos variables.

Tabla 5.10 Costos fijos y Costos variables del transporte de cobre líquido

Descripción	Costos fijos US\$	Costos variables US\$
Petróleo residual N° 6		318,534
Refractarios		11,523
Labores de transporte	148,144	
Reparación mecánica/eléctrica	61,178	
Materiales de operación y reparación		34,569
<b>Total</b>	<b>209,322</b>	<b>364,626</b>

$$Pe = [C_f / (I - C_v)] (100)$$

Donde :

Pe = Punto de equilibrio

C<sub>f</sub> = Costos fijos

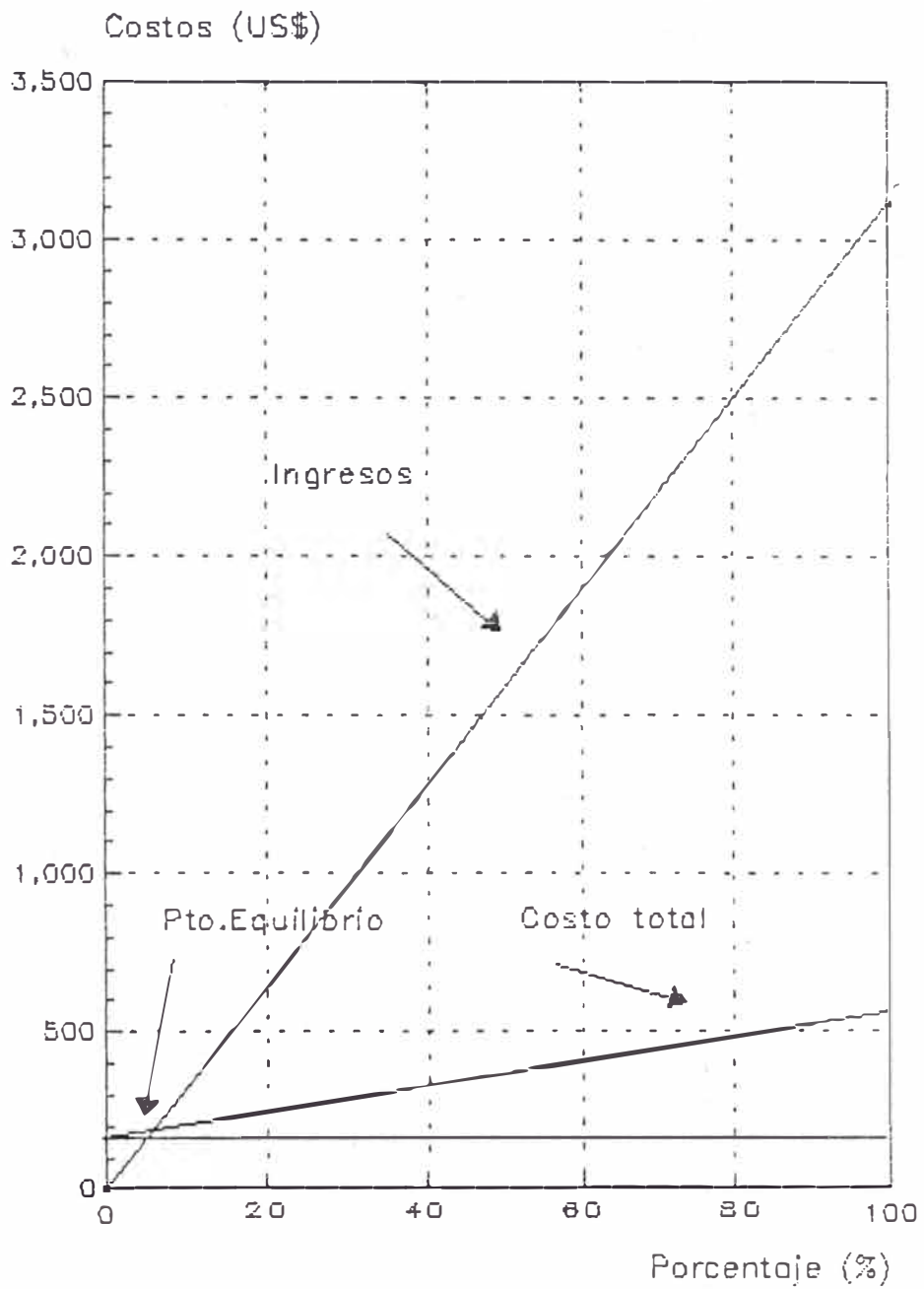
I = Ingresos

C<sub>v</sub> = Costos variables

$$Pe = [209,322 / (3'121,059 - 364,626)] (100)$$

$$Pe = 7.59 \%$$

Fig. 5.5 Punto de Equilibrio del Proyecto





## CONCLUSIONES

- La eliminación de la actual etapa de fusión de las barras de cobre ampolloso proporcionara una mayor capacidad de tratamiento de los hornos de refinación de la planta de ánodos, teniendo en cuenta los futuros incrementos de la refinación electrolítica.
- El costo de inversión necesario para la implementación del transporte de cobre líquido es bajo con relación a las otras alternativas, debido a que involucra menor compra de equipos y el aprovechamiento de la infraestructura de la actual planta de ánodos.
- El diseño de carro torpedo está de acuerdo a las condiciones operacionales que se tendrá durante el transporte, es decir, capacidad de carga de cobre líquido, número de ejes del carro, resistencia necesaria de la línea férrea para soportar el peso del carro torpedo cargado, etc.
- El sistema de transporte ha considerado disponer de tres carros torpedos de 120 toneladas métricas cada una, las cuales transportaran el cobre líquido de los hornos de retención de la planta de moldeo sur de la Fundición hasta los hornos de refinación de la planta de ánodos de la Refinería.
- La características químicas del cobre líquido no afectara, ni causara reacciones fisico-químicas en los refractarios del carro torpedo dado que estos materiales son los adecuados para brindar servicio a las condiciones de operación establecidas.

- La pérdida de calor en el carro torpedo de acuerdo a las características de los refractarios a utilizarse es alrededor de 300 Mcal/h, la cual será compensada con la instalación de un quemador en el baño para el mantenimiento del cobre en estado líquido, dado que el tiempo necesario para el transporte y descarga en los hornos de refinación es aproximadamente tres horas.
- Durante el transporte del cobre líquido no se tendría ningún problema en cuanto a posibles accidentes ocasionados por el traslado del ferrocarril, dado que el terreno entre las plantas metalúrgicas es relativamente plano y además considerando que el carro torpedo será cargado en un 50 % de su volumen útil interior.
- Con la implementación del sistema de transporte de cobre líquido se rebajará los costos de producción tanto en la Fundición y Refinería, además se tendrá un ahorro de US\$ 10.90 por tonelada métrica de ánodo producido, proporcionando mayor utilidad que la actual operación de refinación ígnea.
- El transporte de cobre líquido reducirá drásticamente el consumo de petróleo residual en la planta de ánodos, lo que significará un ahorro considerable en los costos de tratamiento, dado el combustible es susceptible a sufrir futuros incrementos del precio.

**REFERENCIAS**

1. "Manual para el Control de la Contaminación Industrial"  
Herbert Lund, 1974
2. Revista "Cobre"  
Nº 52-54, 1994
3. "Extractive Metallurgy of Copper"  
A. Biswas y W. Davenport, 1980
4. "Ingeniería Metalúrgica"  
Reinhardt Schuhmann, 1978
5. "Principles of Unit Operations"  
A. Foust y L. Wenzel, 1960
6. "Biblioteca del Ingeniero Químico"  
R. Perry y C. Chilton, 1975
7. Revista "The Magazine of Metals Producing"  
Julio, 1967
8. "Heat and Thermodynamics"  
M. Zemansky, 1957

9. "Principios de Transferencia de Calor"  
Frank Kreith, 1970
  
10. Revista "Harbison Walker Refractories"  
Junio, 1994
  
11. "Normas para Elaborar y Evaluar Proyectos de Inversión"  
PetroPeru, 1984
  
12. "Diseño y Evaluación de Proyectos de Inversión"  
J. Carbonel, 1984