

**Universidad de Concepción**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería  
Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**  
Dr. Roberto Parra Figueroa  
Dr. Roberto Parada Araya

# **“ESTUDIO DE COMPETITIVIDAD DE LA INDUSTRIA DE FUNDICIONES DE COBRE”**



**Esteban Alfonso Saravia Riffo**

Informe Memoria de Título

para optar al Título de

**Ingeniero Civil Metalúrgico**

Abril, 2019

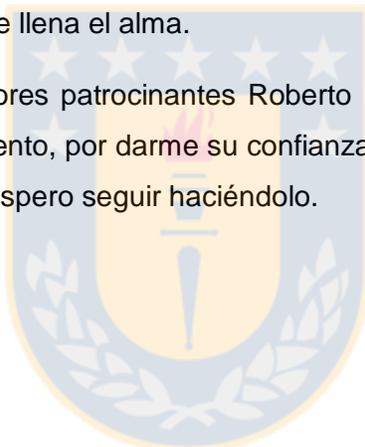
## Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mis padres por todo el esfuerzo que han hecho para que yo pueda ser la persona que soy hoy, por entregarme amor, valores y consejos de los cuales me fueron y serán de mucha ayuda en las decisiones que tome. Sin duda me siento orgulloso de ellos y espero que ellos también de mí.

A mis hermanas Maritza y Elizabeth por ser un soporte fundamental en mi vida, gracias por la relación hemos logrado consolidar y aunque a veces no lo demuestre, tienen un espacio bien grande en mi corazón.

A mis amigos y compañeros, gracias por cada momento compartido, las risas, el estrés y por hacer grato este camino. En especial a la que se convirtió en mi compañera de vida, gracias por apoyarme y entenderme en todas las decisiones, por ser mi complemento y yo el tuyo, y por sobre todo, gracias por entregarme ese afecto que me llena el alma.

Agradecer también a mis profesores patrocinantes Roberto Parra y Roberto Parada, quienes se portaron excelente en cada momento, por darme su confianza y haber conocido parte de ellos. Sin duda aprendí muchos de ellos y espero seguir haciéndolo.



***¡Amulepe taiñ weichan!***

## Resumen

El objetivo general de este estudio fue identificar una estrategia de negocio que permita disminuir los costos operacionales basados en economía de escalas y tecnología de fusión. Primeramente se describe la cadena de valor de la industria de cobre detallando las actividades primarias de una fundición, seguido de un análisis de mercado indicando la participación de los principales países y posteriormente se analiza la actividad comercial de la industria de la fundición de cobre considerando factores clave que dominan en la rentabilidad.

El estudio de competitividad se lleva a cabo mediante la realización de un benchmarking competitivo correlacionando las variables escala de producción, naturaleza tecnológica e integración a la mina versus los costos operacionales. Los resultados indican que la escala de procesamiento sobre las 1.500 ktoneladas de concentrado al año, la utilización de una tecnología emergente o flash y desacoplando la instalación a la mina se obtienen los costos operacionales más bajos.

La veracidad de esta información es verificada mediante un análisis de precio y productividad de los insumos relevantes de los costos operacionales (mano de obra y energía), con el fin de confirmar que los bajos costos corresponden a una mayor eficiencia en el uso de los insumos por parte de economías de escala y el uso de tecnologías emergentes o flash. Los resultados indican que la tecnología flash y una alta producción obtienen las mayores eficiencias de insumos.

Por último se analiza si estos dos factores son independientes entre ellos, uno es consecuencia del otro, o bien actúan en simultáneo. Los resultados indican que el aumento de la capacidad de producción no presenta una clara relación lineal con respecto a la eficiencia de los insumos. Se observa una leve correlación hasta las 1.250 ktoneladas de concentrado al año, pero sobre esta escala deja de ser evidente. Adicionalmente, las instalaciones que pertenecen al grupo de mayor escala de producción, tienen una alta correlación con la tecnología flash y al mismo tiempo con la zona geográfica donde se encuentran estas instalaciones ya que más del 50% se encuentran en China.

Finalmente se concluye como hallazgo principal de este estudio, que los factores tecnología de fusión y nivel de producción no constituyen en sí mismo elementos contundentes de reducción del costo operacional. El factor primario para obtener una ventaja competitiva en el costo operacional, está fuertemente asociado a la ubicación geográfica donde operen los precios de energía y mano de obra más baratas.

## Abstract

The general objective of this study was to identify a business strategy that allows reducing operational costs based on economies of scale and fusion technology. Firstly, the value chain of the copper industry is described, detailing the primary activities of a smelter, followed by a market analysis indicating the participation of the main countries and finally, the commercial activity of the copper smelting industry is analyzed, considering key factors that dominate profitability.

The competitiveness study was performing with a competitive benchmarking correlating the variables production scale, technological basecamp and integration to the mine versus the operational costs. The results indicate that the processing scale over the 1,500 ktonnes of concentrate per year, the use of an emerging technology or flash and decoupling the installation to the mine yields get the lowest operational costs.

The accurate of this information is verified through a price and productivity analysis of the relevant of the operational costs inputs (labor and energy), in order to confirm that the low costs correspond to a greater efficiency in the inputs use on the part of economies of scale and the use of emerging or flash technologies. The results indicate that flash technology and high production obtain the highest efficiencies input.

Also, if these two factors are independent of each other, one is a consequence of the other, or they act simultaneously, it is analyzed. The results indicate the increase in production capacity does not show a clear linear relationship with respect to the efficiency of inputs. A slight correlation is observed up to 1,250 kton of concentrate per year, but on this scale it is no longer evident. Additionally, the facilities that belong to the largest scale production group, have a high correlation with flash technology and at the same time with the geographical area where these facilities are located since more than 50% are in China located.

Finally, as the main finding of this study it is concluded, that the factors of fusion technology and production level do not in constitute themselves conclusive elements of reduction of the operational cost. The primary factor for obtaining a competitive advantage in the operational cost is strongly associated with the geographical location where the cheapest energy and labor prices operate.

# Índice

1. Introducción: Tema de Investigación .....	1
1.1 Importancia y razones del estudio.....	2
1.2 Objetivos generales y específicos .....	2
2. Metodología de Investigación .....	3
2.1 Recopilación y procesamiento de datos .....	3
2.2 Características de la base de datos obtenidas .....	4
3. Cadena de Valor y Tecnologías de Fusión.....	5
3.1 Cadena de valor.....	5
3.2 Cadena de valor industria fundición .....	7
3.2.1 Secado .....	7
3.2.2 Fusión .....	7
3.2.3 Conversión.....	8
3.2.4 Refino a fuego .....	9
3.2.5 Limpieza de escoria .....	10
3.2.6 Manejo de gases y planta de ácido.....	10
3.3 Tecnologías de fusión .....	11
3.3.1 Flash (Outokumpu, Inco) .....	12
3.3.2 Convertidor Teniente .....	13
3.3.3 TSL .....	14
3.3.4 Horno Reverbero .....	15
3.3.5 Proceso Mitsubishi .....	16
3.3.6 Horno Eléctrico .....	17
3.3.7 Blast Furnace .....	18
3.3.8 Emergentes .....	19
4. Mercado de la Industria de Fundición .....	20
4.1 Producción y consumo mundial de cobre.....	20
4.1.1 Producción de cobre refinado .....	21
4.1.2 Consumo de cobre refinado .....	22
4.2 Producción de cobre anódico .....	23
4.2.1 Producción de cobre anódico por geografía.....	24
4.2.2 Producción de cobre anódico por tecnología .....	26

4.2.3 Producción de cobre anódico por escala de capacidad de fusión .....	28
4.2.4 Producción de cobre fundido por integración o custom .....	30
4.3 Aspectos relevantes de análisis .....	32
5. Negocio Fundiciones de Cobre .....	33
5.1 Análisis del negocio de la fundición .....	33
5.1.1 Costos operacionales .....	34
5.1.2 Recuperación metalúrgica fundición .....	35
5.1.3 Costo de flete .....	35
5.1.4 Crédito por subproducto .....	35
5.2 Aspectos relevantes .....	36
6. Benchmarking Competitivo .....	37
6.1 Benchmarking internacional de fundición .....	37
6.1.1 Selección del conjunto de fundiciones .....	37
6.1.2 Clasificación de fundiciones .....	39
6.2 Costos operacionales .....	41
6.2.1 Costos operaciones por tecnología .....	42
6.2.2 Costos operaciones por escala de procesamiento .....	43
6.2.3 Costos operaciones por integración o custom .....	44
6.3 Tabla resumen benchmarking .....	45
7. Resultados y Discusiones .....	46
7.1 Competitividad del costo operacional .....	46
7.2 Factores de competitividad de la productividad .....	48
7.2.1 Factor naturaleza tecnológico .....	55
7.2.2 Factor nivel de producción .....	58
7.3 Discusiones .....	60
8. Conclusiones y Recomendaciones .....	64
8.1 Conclusiones .....	64
8.2 Recomendaciones .....	65
9. Anexos .....	66
10. Bibliografía .....	69

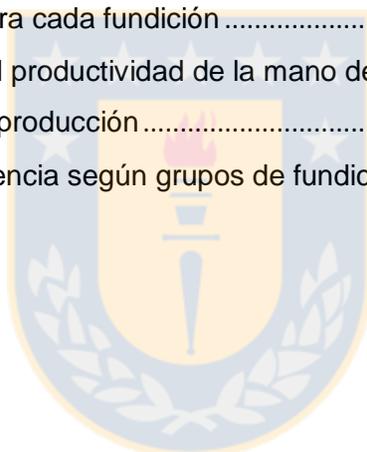
## Índice de figuras

Figura 3.1 Diagrama de Procesos de Minerales Sulfurados.....	6
Figura 3.2 Diagrama de Procesamiento de Concentrados.....	11
Figura 3.3 Esquema de Horno-Flash Outokumpu.....	12
Figura 3.4 Esquema del Convertidor Teniente.....	13
Figura 3.5 Esquema del Horno Isasmelt .....	14
Figura 3.6 Esquema del Horno Reverbero.....	15
Figura 3.7 Esquema Proceso Continuo Mitsubishi .....	16
Figura 3.8 Esquema del Horno Eléctrico.....	17
Figura 3.9 Esquema del Alto Horno.....	18
Figura 3.10 Esquema del Horno Bottom-Blowing .....	19
Figura 4.1 Estadísticas de Producción y Consumo Mundial de Cobre.....	21
Figura 4.2 Producción de cobre refinado año 2017 .....	21
Figura 4.3 Producción de cobre refinado año 2007 .....	21
Figura 4.4 Consumo de cobre refinado año 2007.....	22
Figura 4.5 Consumo de cobre refinado año 2017.....	22
Figura 4.6 Estadística y Producción de Cobre Anódico Mundial.....	23
Figura 4.7 Distribución Geográfica de Fundiciones.....	24
Figura 4.8 Participación Geográfica de Fundiciones.....	25
Figura 4.9 Distribución Tecnológica de Fusión .....	26
Figura 4.10 Participación de las Tecnologías de Fusión .....	27
Figura 4.11 Distribución por Escala de Procesamiento de Concentrados.....	28
Figura 4.12 Participación por Escala de Procesamiento de Concentrados.....	29
Figura 4.13 Distribución por Integración a la Mina.....	30
Figura 4.14 Participación por Integración a la Mina.....	31
Figura 6.1 Costo Operacional por Fundición.....	41
Figura 6.2 Distribución Costos de Operación.....	41
Figura 6.3 Costos Operacionales Comparados por Tecnología.....	42
Figura 6.4 Costos Operacionales Comparados por nivel de Procesamiento.....	43
Figura 6.5 Costos Operacionales Comparados por Integración.....	44
Figura 7.1 Mapa de Competitividad por Costo Energía-Mano de Obra de las 57 fundiciones.....	47
Figura 7.2 Mapa de Precio de Energía y Mano de Obra para las 57 Fundiciones .....	49
Figura 7.3 Mapa de Productividad de Energía y Mano de obra para las 57 fundiciones.....	51

Figura 7.4 Gráfico de Utilización Mano de Obra Total Fundiciones .....	55
Figura 7.5 Gráfico Utilización Energía Total Fundiciones .....	55
Figura 7.6 Utilización mano de obra tecnología no flash .....	56
Figura 7.7 Utilización mano de obra tecnología flash .....	56
Figura 7.8 Utilización mano de obra tecnología emergente.....	56
Figura 7.9 Utilización Energía tecnología no flash .....	57
Figura 7.10 Utilización Energía tecnología flash .....	57
Figura 7.11 Utilización Energía tecnología emergentes .....	57
Figura 7.12 Utilización mano de obra producción media .....	58
Figura 7.13 Utilización mano de obra producción baja .....	58
Figura 7.14 Utilización mano de obra producción alta .....	58
Figura 7.15 Utilización energía producción media .....	59
Figura 7.16 Utilización energía producción baja .....	59
Figura 7.17 Utilización energía producción alta .....	59
Figura 7.18 Relación escala producción-Eficiencia mano de obra. Tecnología Flash.....	61
Figura 7.19 Relación precio mano de obra-Eficiencia mano de obra. Tecnología Flash.....	61
Figura 7.20 Relación escala producción-Eficiencia energética. Tecnología Flash .....	62
Figura 7.21 Relación precio energía-Eficiencia energética. Tecnología no Flash .....	62
Figura 9.1 Relación escala de procesamiento-costo operacional .....	66
Figura 9.2 Relación escala procesamiento-eficiencia mano de obra. Tecnología no flash .....	67
Figura 9.3 Relación escala procesamiento-eficiencia mano de obra. Tecnología emergente.....	67
Figura 9.4 Relación escala procesamiento-eficiencia energética. Tecnología emergentes .....	67
Figura 9.5 Relación escala procesamiento-eficiencia energética. Tecnología no flash.....	67
Figura 9.9 Relación precio energía-eficiencia energética. Tecnología emergentes .....	68
Figura 9.7 Relación precio mano de obra-eficiencia mano de obra. Tecnología emergentes.....	68
Figura 9.6 Relación precio mano de obra-eficiencia mano de obra. Tecnología no flash .....	68
Figura 9.8 Relación precio energía-eficiencia energética. Tecnología no flash .....	68

## Índice de tablas

Tabla 6.1 Conjunto de fundiciones seleccionadas para el estudio de benchmarking.....	38
Tabla 6.2 Variables de clasificación de fundiciones .....	39
Tabla 6.3 Clasificación de las fundiciones por tecnología .....	40
Tabla 6.4 Resumen información benchmarking.....	45
Tabla 7.1 Valores medios precio de energía y mano de obra.....	48
Tabla 7.2 Clasificación de fundiciones por precio de energía y precio de mano de obra .....	50
Tabla 7.3 Valores medios productividades de energía y mano de obra.....	50
Tabla 7.4 Clasificación de las fundiciones sobre la base de la utilización de mano de obra y energía por clase .....	52
Tabla 7.5 Índice de eficiencias para cada fundición .....	53
Tabla 7.6 Mapa de competitividad productividad de la mano de obra y energía, de acuerdo a la naturaleza tecnológica y nivel de producción .....	54
Tabla 7.7 Clasificación de pertenencia según grupos de fundiciones .....	63



## Nomenclatura

%	Porcentaje en tanto por ciento
MJ	Mega Joules
Gr	Gramos
kg	Kilogramos
ton	Toneladas métricas
kton	Miles de toneladas métricas
lb	Libras (masa)
T° C	Temperatura en grados Celsius
(s), (l), (g)	Estados de la materia sólido, líquido y gas, respectivamente
(a)	Estado acuoso
cUS\$	Centavos de dólar de Estados Unidos
US\$	Dólares de Estados Unidos
MUS\$	Millones de dólares de Estados Unidos
ton /año	Toneladas de concentrado por año
ton Cu /año	Toneladas de cobre por año
MJ/ ton	Energía por tonelada de concentrado en (MJ)
HH	Hora hombre
US\$/HH	Salario en dólares (USA) por hora hombre
HH/ton	Horas hombre por tonelada de concentrado fundido
cUS\$/MJ	Costo de energía en centavos de dólar por MJ
ton/HH	Toneladas de concentrado por hora hombre
ton/MJ	Toneladas de concentrado por MJ de energía
cUS\$/lb	Centavos de dólar (USA) por libra de cobre

# 1. Introducción: Tema de Investigación

El presente estudio desarrolla una evaluación de la competitividad del sector industrial de fundiciones de cobre, analizando variables clave que influyen en la rentabilidad de la industria con el propósito de identificar una estrategia de negocio que permita aumentar la competitividad de la instalación.

Primeramente, se analiza la cadena de valor de la producción de cobre refinado, detallando el sector de fundiciones de cobre, describiendo las principales tecnologías de fusión existentes en el mundo. Se analiza el mercado internacional del cobre, observando la tendencia en la producción y el consumo mundial. Se describe la industria de fundiciones de cobre, representando la producción de ánodos segmentada por geografía, por tecnología de fusión, integración al complejo mina y escala de procesamiento de concentrados, con el objetivo de observar la tendencia histórica en el desarrollo de la industria. Posteriormente se describe el negocio de las fundiciones de cobre, detallando las principales variables económicas que impactan en la rentabilidad del negocio.

Se formula un benchmarking competitivo para un universo de 57 fundiciones a escala internacional, que abarcan el 77% de la producción mundial. Este análisis correlaciona las variables escala de producción, integración y tecnología de fusión versus los costos operacionales, con el objetivo de obtener una representación de la estrategia dominante focalizada en la reducción del costo operacional. La información entregada por el benchmarking se discute y se estudia mediante un análisis de productividad y precio de los insumos relevantes del costo operacional (mano de obra y energía) en función de la tecnología de fusión y nivel de producción con el fin de comprobar la veracidad de la información entregada del benchmarking.

Finalmente, el autor plantea algunas sugerencias al estudio realizado con el propósito de obtener resultados más robustos, que indiquen con mayor claridad los factores o variables que impacten en la competitividad de la industria y así diseñar una estrategia de negocio que permita una mayor creación de valor.

## 1.1 Importancia y razones del estudio

La importancia de este estudio radica en que el identificar y analizar estrategias que permitan desarrollar *la competitividad de la industria de fundiciones de cobre*, basada en tecnologías de fusión y escala de producción bajando costos operacionales. Además, identificar otras alternativas que puedan generar ingresos extras o disminución de costos, con el mismo fin de aumentar la competitividad en este eslabón de la cadena productiva.

La razón de este estudio está motivada por el impacto que ha tenido China en la industria de fundiciones de cobre, en relación con el aumento en la participación mundial la que alcanza el 39% de la producción. Además debido al avance que ha tenido el gigante asiático en el desarrollo de nuevas tecnologías de fusión con procesos continuos cada vez más eficientes. Por otro lado, el estado de la industria de fundición en Chile ha ido perdiendo peso a nivel mundial debido a lo poco competitivo de las instalaciones, lo que implica una motivación extra a la realización de este estudio [17].

## 1.2 Objetivos generales y específicos

### **Objetivo General:**

- Identificar los principales parámetros que impactan o determinan la competitividad focalizada en la reducción de costos operacionales, basada en tecnologías de fusión y escala de producción.

### **Objetivos Específicos:**

- Realizar un diagnóstico de competitividad del sector industrial de fundiciones de cobre.
- Identificar y analizar las variables tecnológicas clave que impactan en una mayor competitividad.
- Formular una recomendación de estrategia de negocio de fundiciones de cobre.

## 2. Metodología de Investigación

### 2.1 Recopilación y procesamiento de datos

La información recopilada es del tipo secundaria. Las principales fuentes de información son clasificadas según su origen:

- Reportes de consultoras internacionales y centros de estudios: éstos constituyen la fuente básica de información para caracterizar las fundiciones a estudiar. También se encuentra información económica del mercado del cobre.
- Informes de instituciones y asociaciones que operan en el mercado del cobre, tanto nacional como internacional.
- Presentaciones, principalmente en páginas web de compañías dueñas de fundiciones, en que se expone información financiera y de responsabilidad social de estas empresas.

La data recibida y recolectada fue ordenada y comparada con el fin de generar una base de datos completa, actualizada y confiable. En cuanto al levantamiento de información, en caso de existir incongruencia en algunos datos, se privilegió la data de uso público más actualizada a la fecha. A partir de esta nueva base de datos se realiza el análisis de competitividad, para detectar las correlaciones de interés donde se manifiesten las variables relevantes.

## 2.2 Características de la base de datos obtenidas

La base de datos generada abarca información histórica del mercado internacional del cobre, datos operacionales de las principales fundiciones de cobre del mundo, además de proyecciones de futuras instalaciones. Incluye información de la mayoría de las fundiciones en el mundo, pero tiene una debilidad con respecto a ciertas fundiciones Chinas y de otros países como Rusia y Kazajistán, de las cuales no se obtiene información detallada necesaria para ser incluidas en el análisis competitivo de benchmarking. Esto debido a que sus complejos metalúrgicos son relativamente nuevos y por lo tanto la información es más clasificada.

Con el fin de acotar y respetar la orientación básica de este trabajo que consiste en un análisis de competitividad basado en tecnologías de fusión y escalas de producción, se excluyen aspectos relevantes de competitividad como, estrategias de diferenciación de productos, estrategias cooperativas o de alianzas estratégicas y variables políticas de origen estatal o privada, entre otras.



### 3. Cadena de Valor y Tecnologías de Fusión

En este capítulo se describen los procesos asociados a la cadena de valor que se emplean en la producción de cobre refinado. Se detallan las operaciones primarias de la industria de fundición de cobre indicando las tecnologías asociadas. Se describen las principales tecnologías de fusión existentes en el mundo, las cuales serán analizadas en el benchmarking competitivo.

#### 3.1 Cadena de valor

Los minerales de cobre se encuentran generalmente en depósitos tipo pórfidos cupríferos, en estos se hallan minerales sulfurados y oxidados de cobre, estos se explotan y se tratan a través de distintos procesos para obtener cobre metálico. Para este estudio se explicará la cadena de valor de los minerales sulfurados de cobre desde la extracción hasta obtener un cátodo de alta pureza.

El mineral de cobre disperso en el yacimiento es extraído del macizo, mediante la perforación y posterior incorporación de explosivos para así fragmentar la roca y comenzar la liberación del mineral. La roca fracturada es cargada a camiones y transportada a los distintos lugares según corresponda, acopio de mineral o botaderos de estéril<sup>1</sup>. La extracción se puede realizar en minas de rajo abierto y subterráneas.

El mineral de cobre extraído es procesado en la planta concentradora a través de sucesivas etapas de conminución y posterior concentración con el objetivo de separar el mineral de cobre de la ganga<sup>2</sup> obteniendo como producto un concentrado rico en cobre. Las etapas de conminución generalmente son; chancado y molienda. La etapa de concentración se realiza generalmente a través de celdas de flotación, donde se produce la separación selectiva de los minerales de cobre obteniendo así dos productos, una cola baja en cobre que se deposita en relaves y un concentrado rico en cobre que es llevado a etapas de espesamiento y filtración con el objetivo de recuperar agua.

El concentrado es llevado a la fundición de cobre para ser tratado por un conjunto de procesos pirometalúrgicos que permiten la obtención de cobre metálico. Primeramente el concentrado es secado hasta alcanzar una humedad óptima para la tecnología de fusión específica que tiene una fundición. El concentrado seco se funde en los hornos de fusión entregando como productos una

---

<sup>1</sup> Estéril: Mineral que económicamente no tiene valor por su bajo contenido de Cobre.

<sup>2</sup> Ganga: Material asociado al cuerpo mineralizado que no tiene valor económico.

escoria oxidada, mata de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}$ ) y gases ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ). La mata rica en cobre es llevada a la etapa de conversión donde se elimina el resto de Fe y S, para así obtener cobre blíster<sup>3</sup>. Luego el cobre blíster pasa a la etapa de refinación, en hornos de refino donde se obtiene un ánodo de cobre (99,8% Cu). Los gases resultantes de las etapas a altas temperaturas son captados para ser alimentados a la planta de ácido sulfúrico y las escorias producidas son llevadas a los procesos que la planta disponga (flotación, horno eléctrico, etc) para la recuperación de cobre.

El ánodo de cobre es llevado a una etapa de purificación, la cual consiste en una refinación electrolítica. Aquí ocurre la disolución del ánodo de cobre en una celda electrolítica por medio de la aplicación de corriente eléctrica, para luego ser depositado selectivamente sobre los cátodos, obteniendo como producto un cobre refinado de 99,99% de pureza [32].

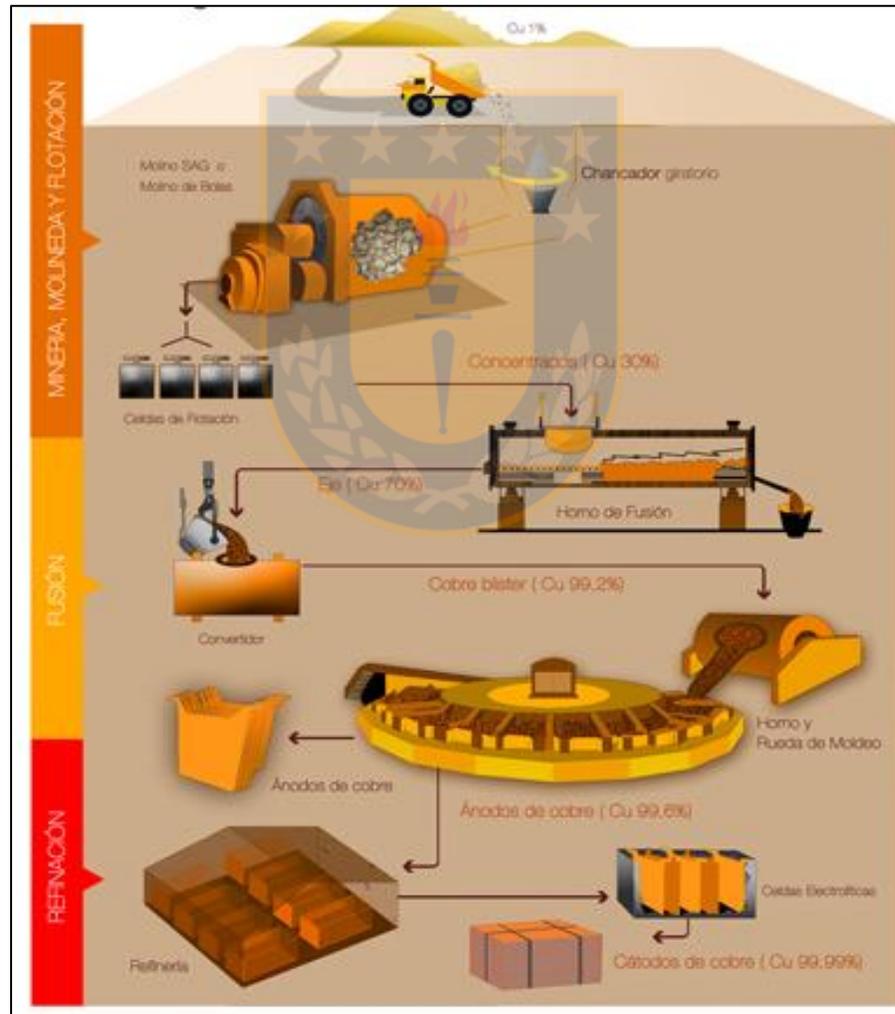


Figura 3.1 Diagrama de Procesos de Minerales Sulfurados. [30]

<sup>3</sup> Cobre blíster: Contenido mayor a 99% Cu.

## 3.2 Cadena de valor industria fundición

A continuación, se describen las operaciones primarias de una fundición de cobre para el procesamiento de concentrados: secado, fusión, conversión, refinado a fuego, limpieza de escoria y planta de ácido. Éstos son los tratamientos globales para la obtención de cobre anódico, escoria y ácido sulfúrico.

### 3.2.1 Secado

El secado de un concentrado de cobre corresponde a una deshumidificación. El proceso tiene como único fin evaporar parcial o totalmente el agua contenida en el sólido, a través del aumento de la temperatura. Un correcto control de la humedad permite mejorar la operación de los hornos y mejorar el balance térmico de las operaciones. La humedad óptima depende de la tecnología de fusión, las modernas requieren de una humedad máxima del 0,2%.

Las tecnologías de secado existentes se clasifican en dos grupos, secadores rotatorios de calor directo o indirecto y los secadores de lecho fluidizado. Existen nuevas tecnologías que han ido tomando protagonismo como los reactores calentados con vapor [33].

### 3.2.2 Fusión

El proceso de fundición consiste en fundir el concentrado de cobre para obtener cobre metálico. Esto se realiza mediante distintas reacciones químicas, que por medio de altas temperaturas (1200° C) generan dos fases líquidas inmiscibles. La fase de sulfuros líquidos, llamada mata, es donde se encuentra el cobre y parte del Fe del concentrado, además contiene los metales preciosos como el oro, plata, e impurezas como el arsénico, bismuto, antimonio. La fase oxidada líquida, llamada escoria, está constituida generalmente por óxidos de hierro y sílice. Estas fases tienen características muy distintas entre sí, una de ellas es la densidad, lo que permite separación de estas mediante gravedad. La formación de escoria se logra mediante la adición de fundentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ).

El proceso se puede representar por la siguiente ecuación:



Donde: Escoria: FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Cu<sub>2</sub>O

Mata: Cu<sub>2</sub>S, FeS

Gas: O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O

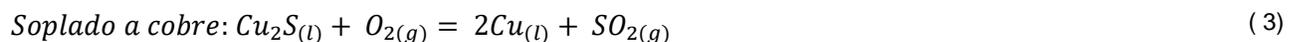
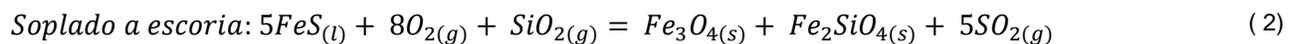
Las tecnologías de fusión existentes se clasifican en tres grupos, calentamiento directo, suspensión en torre de reacción e inyección en un baño líquido. El horno de fusión más utilizado por las instalaciones es el Horno Flash tipo Outokumpu. En este caso, las tecnologías desarrolladas se basan en la combustión de las partículas de concentrado en suspensión en altas torres de reacción, por sobre la zona de baño [32].

### 3.2.3 Conversión

El proceso de conversión consiste en oxidar sucesivamente la mata o eje de cobre con el fin de eliminar el resto de hierro y azufre para obtener como producto cobre blíster con 99% de pureza y una escoria oxidada. La conversión del eje se realiza en dos etapas química y físicamente distintas, que involucran el soplado de aire o aire enriquecido al seno de la fase de sulfuro fundido, éstas son denominadas “soplado a escoria” y “soplado a cobre”:

El soplado a escoria tiene como objetivo la eliminación del remanente de hierro presente, mediante la oxidación de los sulfuros de hierro. El soplado a cobre, tiene como objetivo la eliminación del azufre presente en el Cu<sub>2</sub>S, mediante la oxidación para producir SO<sub>2</sub>, obteniendo finalmente el cobre blíster.

El proceso se puede representar por las siguientes ecuaciones:



La conversión se lleva a cabo universalmente en los convertidores Peirce-Smith. Hoy existen procesos continuos como el Mitsubishi, continuos Flash y los procesos emergentes chinos como Bottom-Blowing y Side-Blowing (BBC, SBC) [21].

### 3.2.4 Refino a fuego

El proceso de refinación a fuego consiste en una oxidación controlada con el fin de eliminar el azufre restante y obtener como producto final un ánodo de cobre de alta pureza 99,6%. La refinación a fuego se realiza en dos etapas químicamente diferentes: Oxidación del azufre y reducción del oxígeno disuelto.

La oxidación del azufre tiene como objetivo remover selectivamente impurezas y azufre, mediante la inyección de aire o aire enriquecido<sup>4</sup>. La etapa de reducción tiene como objetivo remover el exceso de oxígeno disuelto contenido en el cobre fundido, se lleva a cabo utilizando agentes reductores sólidos, líquidos o gaseosos. El producto se moldea en forma en ánodos de cobre que posteriormente van a la refinación electrolítica.

El proceso se puede representar por la siguiente ecuación:



El refino a fuego se lleva a cabo mayoritariamente por hornos de refino cilíndricos (basculantes) para producir ánodos. Esta tecnología se ha consolidado en la industria dejando atrás los antiguos hornos reverberos [32].

---

<sup>4</sup> Enriquecido: Porcentaje de O<sub>2</sub> que se adiciona al aire de proceso.

### 3.2.5 Limpieza de escoria

Las escorias producidas en los procesos pirometalúrgicos, tanto en fusión como en conversión, contienen una cantidad significativa de cobre por lo que hace necesario su recuperación. Existen diversos tratamientos para estas escorias tales como recirculándolas al proceso o en hornos de limpieza de escorias. Las pérdidas de cobre en las escorias ocurren mediante dos mecanismos: disolución de cobre en la escoria y atrapamiento mecánico de gotas de eje o mata en la escoria [31].

Existen tres métodos básicos de limpieza de escorias: recirculación de la escoria al horno de fusión, tratamientos de escorias a través de hornos especiales y flotación de escoria enfriada. Debido a las tecnologías modernas de fusión se hace poco eficiente el primer método, es por esto que las tecnologías dominantes son los hornos especiales: hornos eléctricos y los hornos basculantes [31].

### 3.2.6 Manejo de gases y planta de ácido

Los gases generados en los procesos pirometalúrgicos, provenientes de los hornos de fusión y conversión deben ser captados y procesados con el fin de mitigar las emisiones de gases al medio ambiente. Los gases se componen principalmente de anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ). Estos son recuperados y tratados para la producción de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) convirtiéndose en un subproducto del proceso. Esto se logra mediante múltiples procesos que se generalizan en dos etapas: Sistema de manejo de gases y planta de ácido.

El sistema de manejo de gases se compone de dos etapas generales: enfriamiento de la corriente de gas y limpieza de polvos metalúrgicos. La limpieza de los gases se realiza con el fin de capturar los polvos metalúrgicos, por medio de una precipitación gravimétrica o eléctrica.

En la planta de ácido ocurren dos etapas para la producción de ácido sulfúrico: conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  y la absorción de  $\text{SO}_3$  en una solución diluida de ácido sulfúrico para la formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  comercial [31].

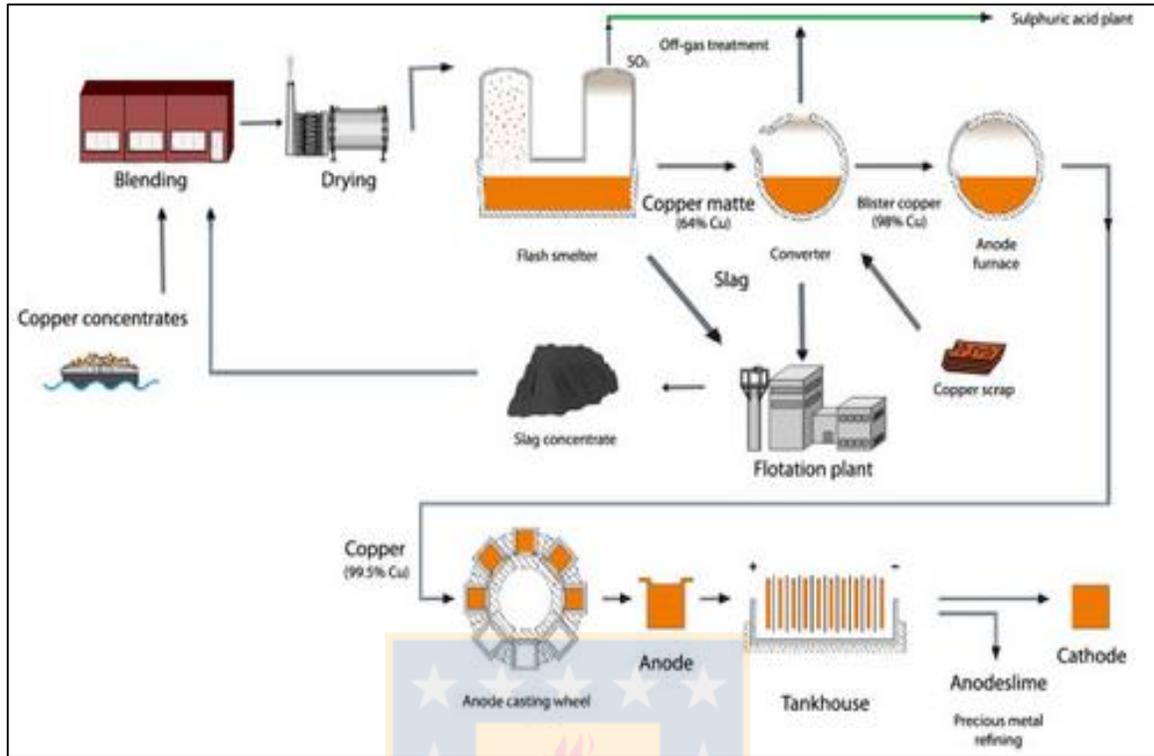


Figura 3.2 Diagrama de Procesamiento de Concentrados. [35]

### 3.3 Tecnologías de fusión

Las tecnologías de fusión existentes son diversas, cada una con sus ventajas y desventajas. En general se clasifican como fusión en baño, fusión flash y fusión por calentamiento directo [21].

- Fusión en baño: Consiste en la inyección del concentrado en un baño fundido.
- Fusión por calentamiento directo: El concentrado se funde a través de la utilización de un combustible que aporte el calor necesario para la transformación.
- Fusión Flash: El concentrado se suspende en un gas oxidante a alta temperatura ocurriendo la fusión.

La tónica en la evolución del desarrollo tecnológico ha sido aprovechar de forma más eficiente la energía liberada en el mismo proceso, asociado a la formación de  $\text{FeO}_x$  y  $\text{SO}_2$ , la captación de gases generados y de formar procesos cada vez más continuos. A continuación, se entrega una breve descripción de los principales equipos de fusión.

### 3.3.1 Flash (Outokumpu, Inco)

Esta tecnología combina las operaciones convencionales de tostación, fusión y conversión en un solo proceso. Existen dos tipos de hornos con este mecanismo; Flash Outokumpu y Flash Inco. Las partes más importantes del horno son: quemador de concentrado, torre de reacción, sedimentador y salida de gases.

El concentrado y el oxígeno son inyectados dentro del horno, creándose una suspensión donde ocurren las reacciones de oxidación en la torre de reacción. Durante el descenso de la mezcla se producen las reacciones de descomposición de los sulfuros y la escorificación. Los productos fundidos sedimentan en la base del horno y son descargados por sangrías individuales para la mata y la escoria.

La principal ventaja del proceso es el uso eficiente de la energía, utilizando la oxidación de concentrado como aporte calórico y sólo en forma ocasional combustibles fósiles, además tiene una alta tasa de recuperación de azufre.

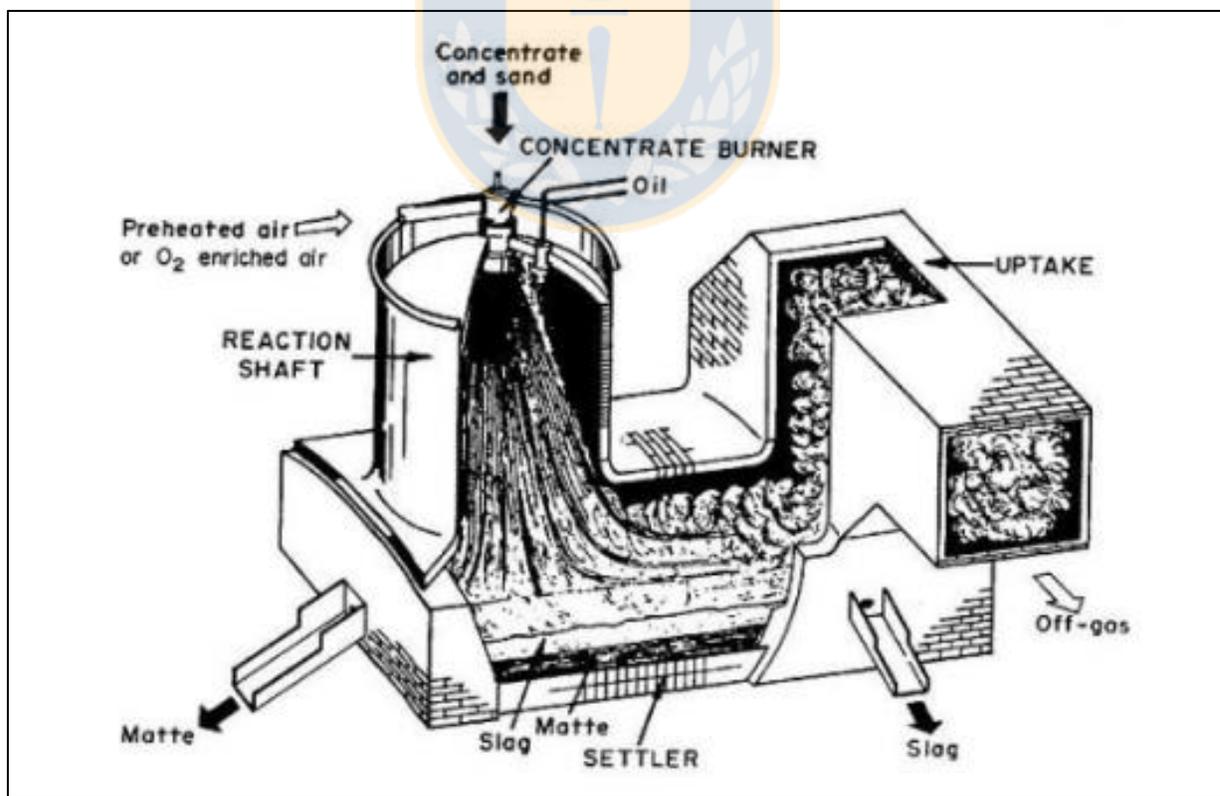


Figura 3.3 Esquema de Horno-Flash Outokumpu. [32]

### 3.3.2 Convertidor Teniente

Esta tecnología combina las operaciones convencionales de tostación, fusión y una parte de la etapa de conversión. Se clasifica como un proceso de fusión en baño. Consiste en la oxidación del concentrado seco con una corriente de aire enriquecido inyectados directamente en el baño fundido por toberas ubicadas en forma lateral al horno. Los productos son metal blanco (70-75% Cu), escoria con alto contenido de cobre (3-7% Cu) y gases con 15% (en volumen) de  $\text{SO}_2$ .

Esta tecnología tiene alta velocidad de reacción debido a la turbulencia en el baño, además produce una baja cantidad de polvos metalúrgicos arrastrados en los gases.

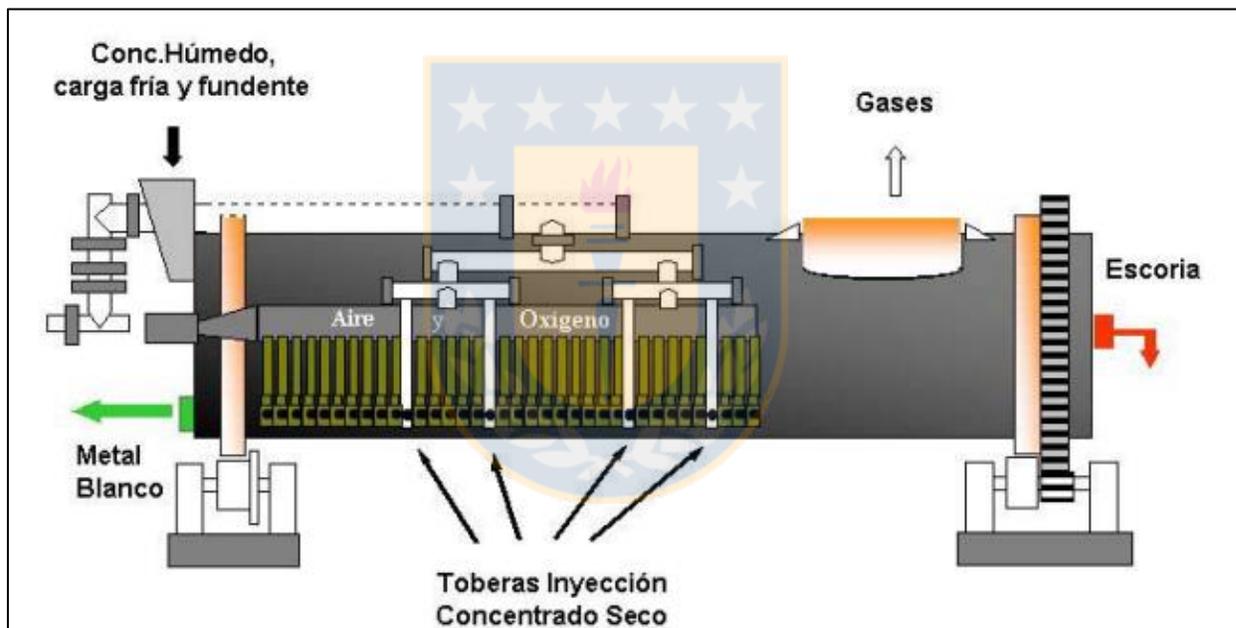


Figura 3.4 Esquema del Convertidor Teniente [32]

### 3.3.3 TSL<sup>5</sup>

Esta tecnología tiene la característica de ser un recipiente vertical en el que se inserta una lanza de combustión, sumergida en un baño de material fundido. La tecnología está clasificada como un proceso de fusión en baño. Este proceso consiste en alimentar el horno vertical con el concentrado y el fundente en el baño [7]. El aire enriquecido con oxígeno es inyectado a través de la lanza, creando una agitación intensa y obteniendo una alta velocidad de reacción. Debido a que el baño fundido se sangra a través de un único orificio y este consiste de escoria y mata de cobre es necesario la separación de estas fases mediante hornos rotatorios [3].

El proceso tiene las ventajas de producir una baja cantidad de polvos metalúrgicos y altas concentraciones de SO<sub>2</sub> producto del enriquecimiento del aire.

Las tecnologías Isasmelt y Ausmelt son procesos de fusión por lanza, sólo se diferencian por el origen de la patente tecnológica.

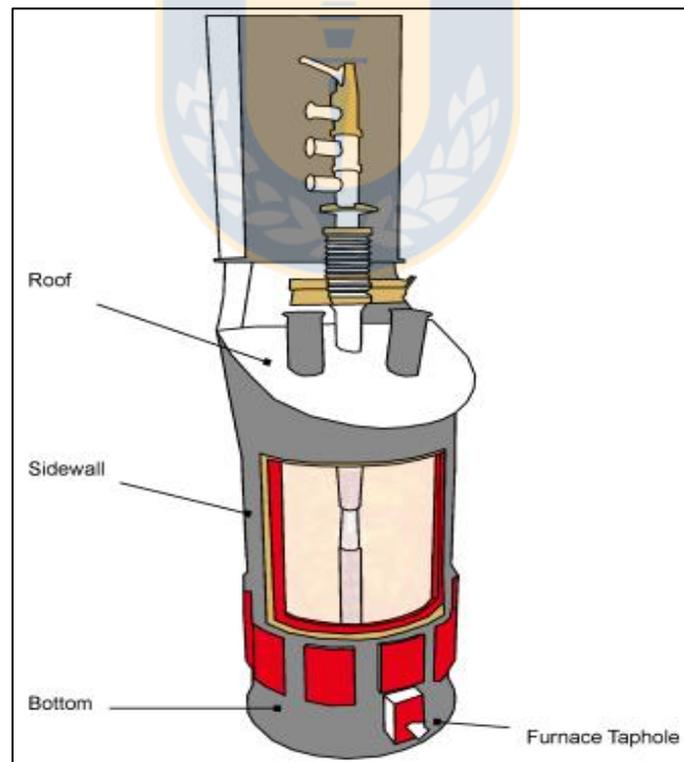


Figura 3.5 Esquema del Horno Isasmelt [7]

<sup>5</sup> TSL: Tecnología de lanza sumergida

### 3.3.4 Horno Reverbero

Esta tecnología se considera fusión por calentamiento directo. El concentrado es alimentado al horno de fusión el cual se funde producto del calor liberado por la quema de combustibles fósiles. Se obtiene como producto mata de cobre y una escoria que posteriormente se sangran por “orificios distintos”.

Los grandes problemas de esta tecnología es la producción de grandes volúmenes de gases con bajas concentraciones de  $\text{SO}_2$ .

Los hornos reverberos fueron la ruta convencional para la producción de cobre en los años 1900-1970. Hoy en día existen pocas fundiciones que mantienen en operación este tipo de hornos. Esta tecnología se considera prácticamente obsoleta debido a su alto impacto en el medio ambiente y los altos costos operacionales debido al aumento del precio de los hidrocarburos [32].

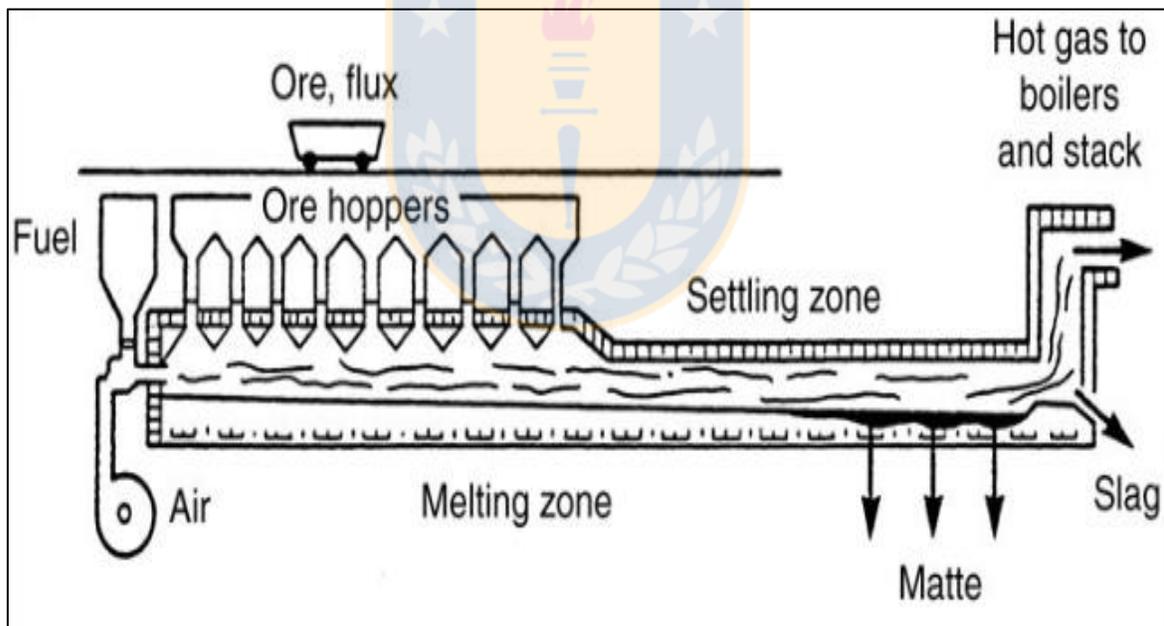


Figura 3.6 Esquema del Horno Reverbero [32]

### 3.3.5 Proceso Mitsubishi

La tecnología Mitsubishi es considerada un proceso fusión en baño continuo que consta de dos etapas: la etapa de fusión y conversión continua. Está compuesto por tres hornos: un horno de fusión, un horno de limpieza de escoria y un horno de conversión. El proceso consiste en la alimentación del concentrado al horno de fusión formando una mezcla de eje y escoria, esta fluye a través de canaletas por gravedad que conectan con el horno de limpieza donde el eje se separa de la escoria. A continuación el eje fluye al horno de conversión para formar el cobre blíster y la escoria de conversión es recirculada al horno de fusión [33].

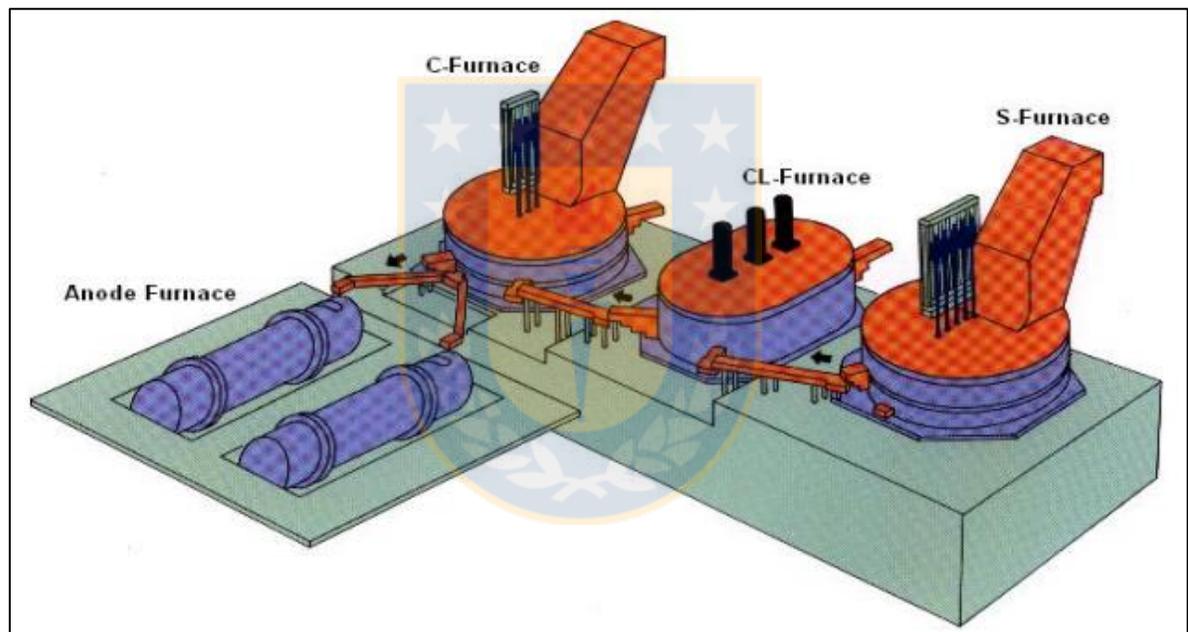


Figura 3.7 Esquema Proceso Continuo Mitsubishi. [33]

### 3.3.6 Horno Eléctrico

El horno eléctrico es una tecnología que utiliza el calor generado por la resistencia de la escoria al paso de una corriente de alto amperaje entre los electrodos de carbón pesados sumergidos en la escoria. Esta tecnología utiliza la energía eléctrica de manera eficiente liberando poco calor en forma de gas, además tiene un excelente control de la temperatura y sobre las condiciones de oxidación.

Esta tecnología tiene la ventaja de tener un buen control de la viscosidad de la escoria permitiendo bajas pérdidas de cobre. Se producen pequeñas cantidades de gas y se tiene un buen control de la concentración de  $\text{SO}_2$ . Sin embargo, la energía eléctrica es costosa y su uso tiene directa relación donde la electricidad es abundante y relativamente barata [33].

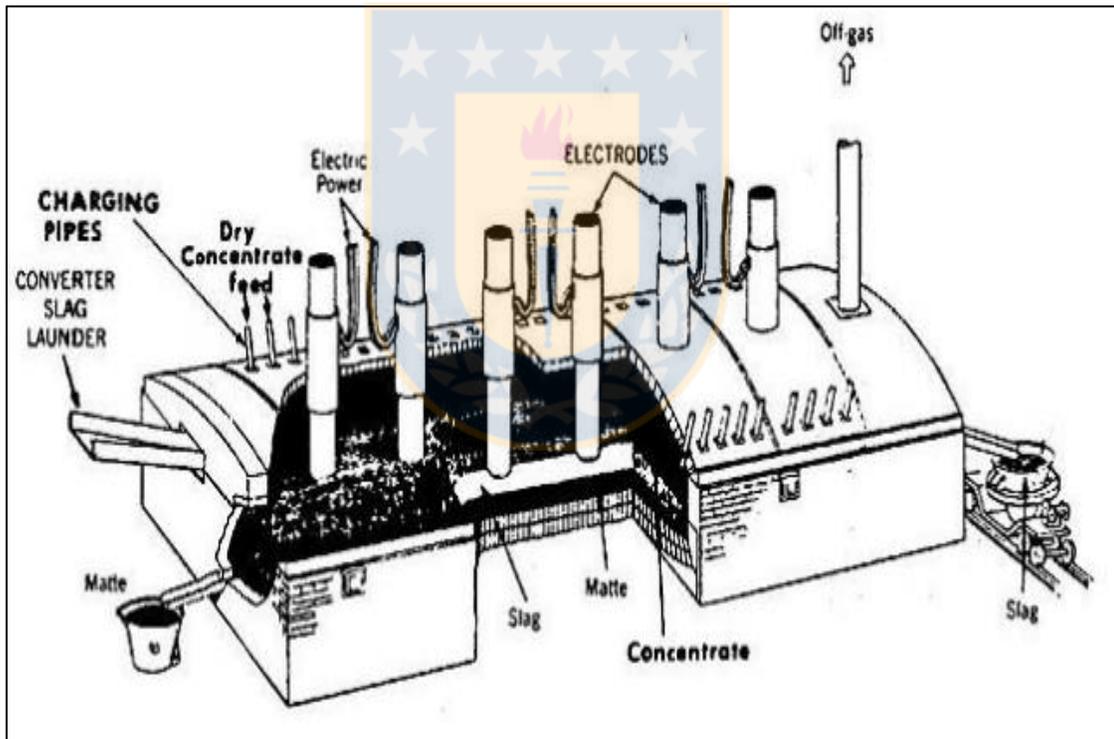


Figura 3.8 Esquema del Horno Eléctrico. [33]

### 3.3.7 Blast Furnace

El alto horno es una tecnología que opera en contracorriente. El concentrado, fundente y coque descenden por un eje vertical mientras que los gases calientes ascienden. A medida que la carga fría descende comienza el secado, calentamiento y posterior fusión para formar mata y escoria en la base del horno. Los gases ascendentes son producidos por la combustión de coque metalúrgico y los minerales sulfurados con aire ascendentes que se inyectan cerca del fondo del horno. Los productos del alto horno son una escoria líquida y un mate líquido que se descargan en un settler para su posterior separación.

Esta tecnología se encuentra en desuso debido al alto impacto medio ambiental por el uso de combustibles fósiles y su baja eficiencia energética. Además, la producción de concentrado de cobre mediante flotación hace que este material no sea adecuado para esta tecnología [33].

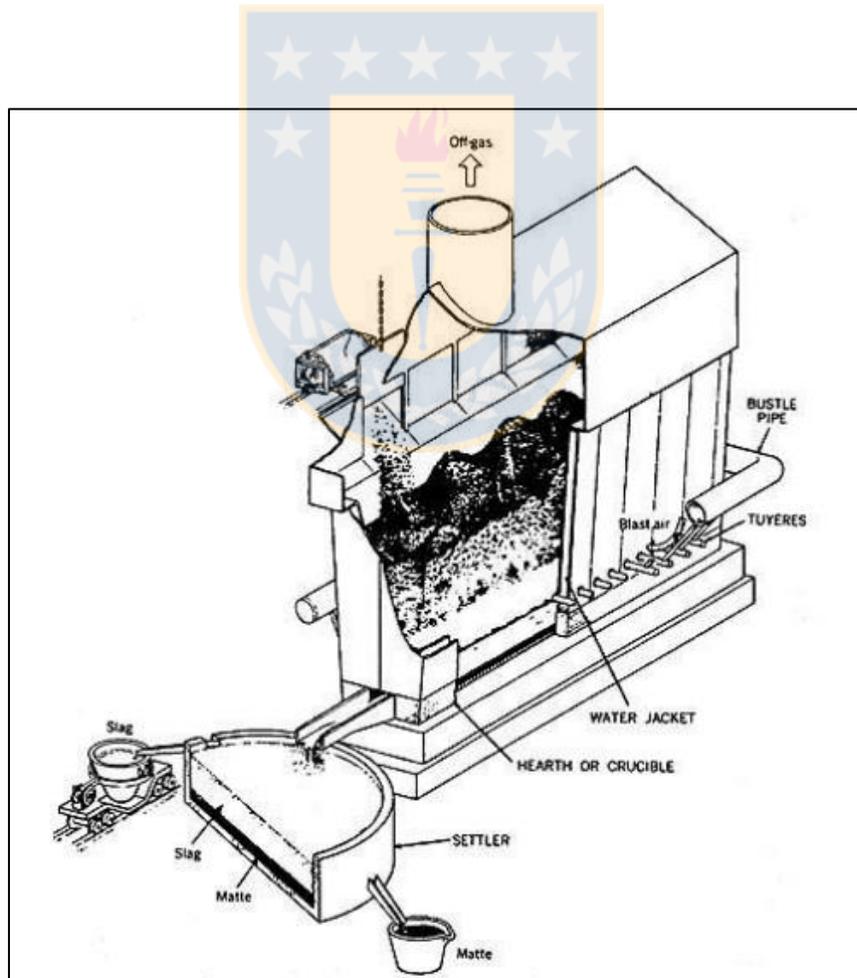


Figura 3.9 Esquema del Alto Horno. [33]

### 3.3.8 Emergentes

En los últimos años ha llamado la atención los desarrollos que han realizado las fundiciones chinas. Estas tecnologías se clasifican en dos tipos: Soplado superior (Side-Blowing) y Soplado inferior (Bottom-Blowing), ambas como proceso de fusión en baño. El concentrado es oxidado por una corriente de aire enriquecido (sobre el 70%) inyectados directamente en el baño fundido por toberas. Los productos son metal blanco, escoria con bajos contenidos de cobre y gases de proceso.

Estas tecnologías permiten: altas velocidades de reacción debido a la mayor energía de burbujeo, un aumento en la vida útil de las lanzas, baja cantidad de generación y arrastre de polvos metalúrgicos y un buen control de la formación de escoria [13].

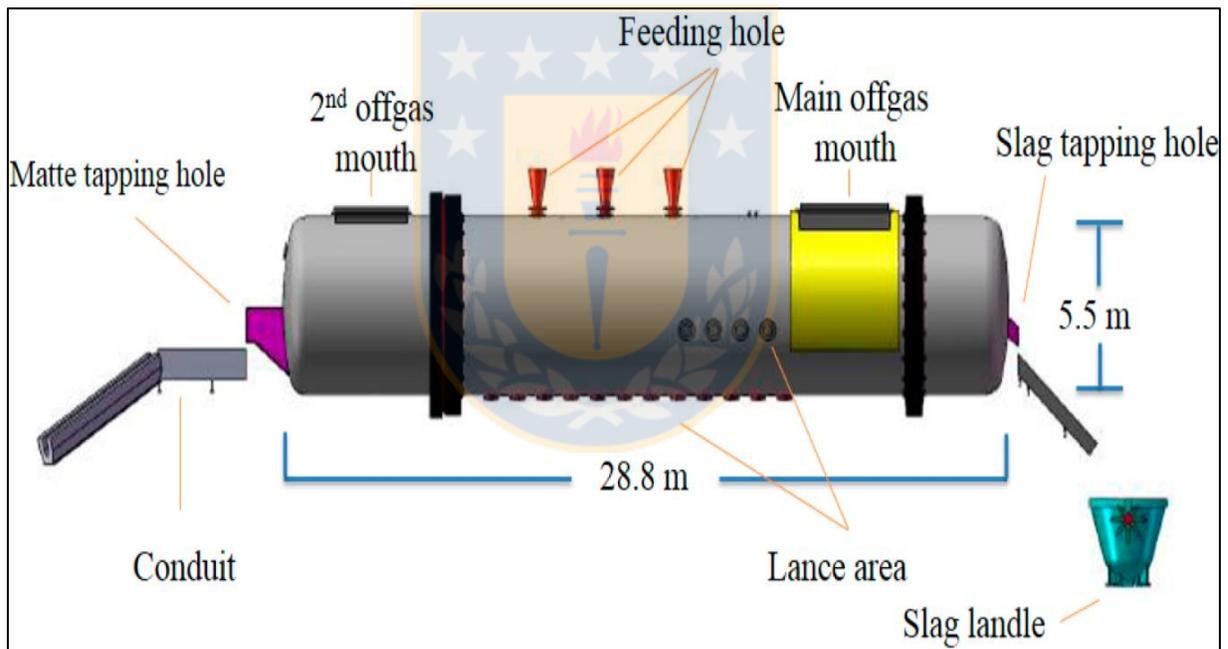


Figura 3.10 Esquema del Horno Bottom-Blowing. [13]

## 4. Mercado de la Industria de Fundición

En este capítulo se describe la producción y consumo mundial de cobre en el mundo asociada a la participación de los principales países. Se detalla la producción de cobre anódico mundial segmentada en grupos de fundiciones, las cuales fueron clasificadas con respecto a su geografía, tecnología de fusión, escala de producción e integración a la mina, con el objetivo de analizar la tendencia histórica en el desarrollo de la industria de fundiciones.

### 4.1 Producción y consumo mundial de cobre

En la figura 4.1 se observa la producción y consumo mundial de cobre en el periodo 2007-2017. La producción de cobre refinado<sup>6</sup> y la producción de cobre mina<sup>7</sup> crecieron a una tasa promedio de 2,6% anual. La fuente principal de cobre refinado la compone el cobre proveniente de la mina. La diferencia es complementada con el cobre derivado del reciclaje. El consumo de cobre refinado presentó un incremento promedio del 2,7% anual, alcanzando los 23.459 millones de toneladas el año 2017, levemente mayor a la producción de cobre refinado. La producción de cobre como concentrado alcanzó un incremento promedio de 2,8% anual. La producción de Cobre vía LIX<sup>8</sup>-SX<sup>9</sup>-EW<sup>10</sup> creció a una tasa promedio de 2,0% anual, siendo la más baja de la figura, esto debido a que desde el año 2015 su producción ha descendido un 7,8% [16]. La antigüedad de los yacimientos junto a la menor cantidad de nuevos proyectos mineros, implica un aumento en la producción de cobre desde concentrados y el agotamiento de los minerales oxidados de Cobre [5].

---

<sup>6</sup> Cobre refinado: Incluye al cobre mina y al cobre que se obtiene a partir del reciclaje de chatarra

<sup>7</sup> Cobre mina: Cobre que se obtiene a partir de todo tipo de mineral, sulfurado como oxidado.

<sup>8</sup> LIX: "Lixiviación": Disolución del metal en fase líquida

<sup>9</sup> SX: "Extracción por solvente": Purificación de soluciones empleando un agente químico para extraer el metal de interés.

<sup>10</sup> EW: "Electroobtención": Precipitación electrolítica de Cobre.

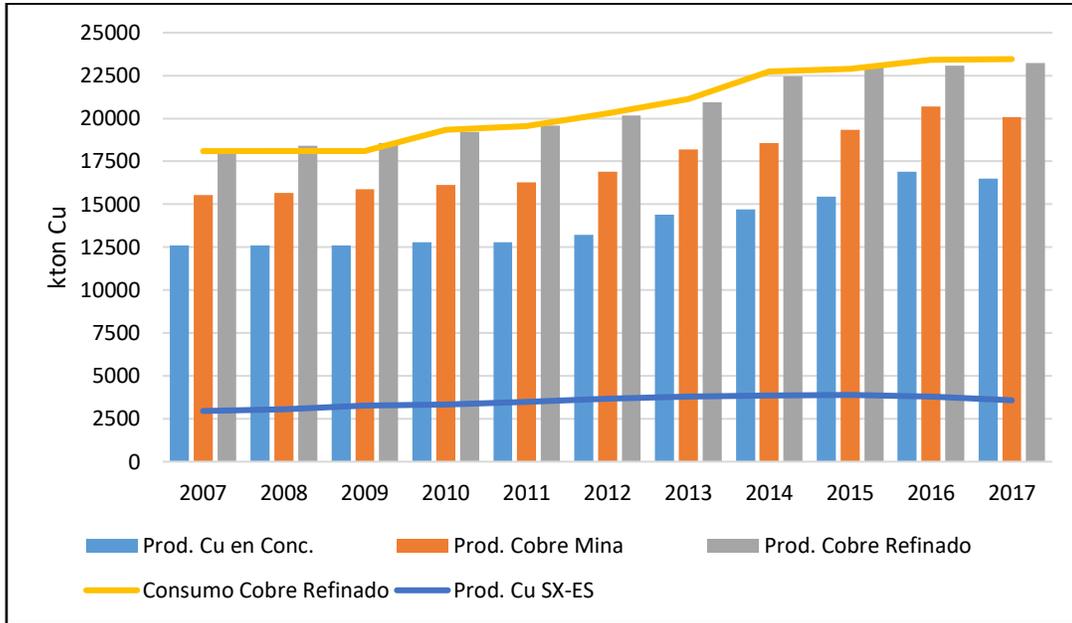


Figura 4.1 Estadísticas de Producción y Consumo Mundial de Cobre

#### 4.1.1 Producción de cobre refinado

La producción de cobre refinado llegó a los 23,221 millones de toneladas el año 2017 y tiene como principal actor a China. En las figuras 4.2 y 4.3 se observa como el país asiático se consolidó como el mayor productor de cobre refinado con 38% de la participación mundial. Lo sigue Chile, Japón y Estados Unidos con 11, 6 y 5%, respectivamente. China ha incrementado su producción en 154% en este periodo, permitiendo aumentar casi el doble su participación mundial. Por otra parte, el resto de los países productores ha visto disminuida o mantenido su producción, implicando una reducción en la participación mundial.

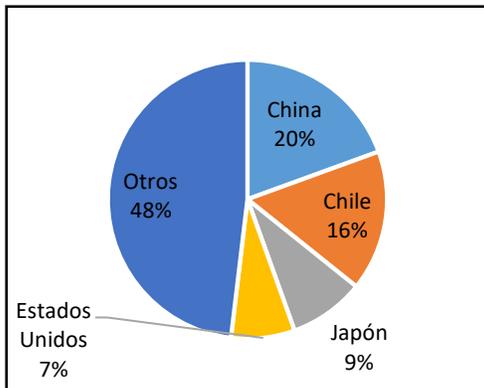


Figura 4.3 Producción de cobre refinado año 2007

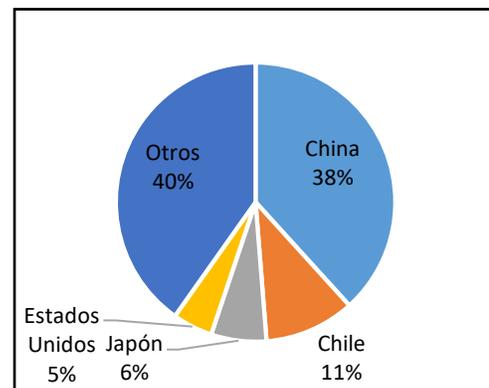


Figura 4.2 Producción de cobre refinado año 2017

#### 4.1.2 Consumo de cobre refinado

Al igual que la producción de cobre refinado, el consumo del metal rojo tiene un actor principal, China. En las figuras 4.4 y 4.5 se observa que en los últimos años China se ha mantenido como el mayor consumidor de cobre refinado alcanzando el año 2017 un total de 11,791 millones de toneladas, equivalentes al 50% del consumo mundial. Lo sigue Estados Unidos, Alemania y Japón con 8, 5 y 4%, respectivamente. El país asiático aumentó en 142% el consumo de cobre refinado en este periodo siendo el único en hacerlo, el resto de los países consumidores vio disminuido su consumo.

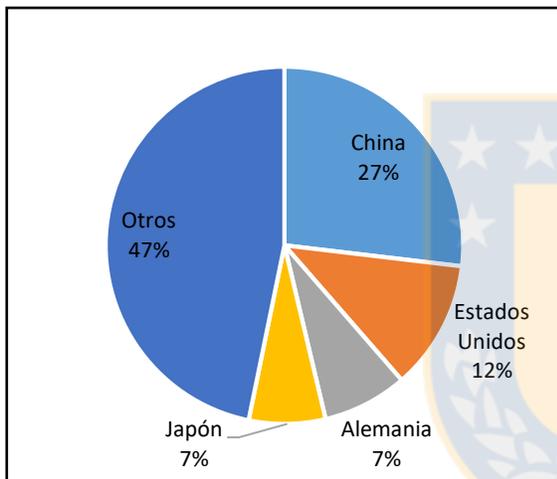


Figura 4.4 Consumo de cobre refinado año 2007

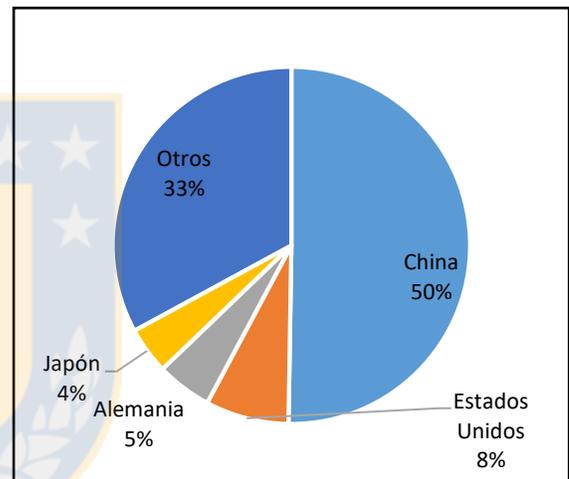


Figura 4.5 Consumo de cobre refinado año 2017

## 4.2 Producción de cobre anódico

En la siguiente figura 4.6 se observa la producción de cobre anódico en el periodo 2005-2017. Se detalla la producción primaria equivalente a la fusión de concentrados y la producción secundaria cuya materia prima es el cobre reciclado. La producción de cobre vía fundición ha tenido un crecimiento promedio de 3,2% anual, alcanzando los 18,510 millones de toneladas de ánodos de cobre. La producción primaria es la principal componente del cobre fundido y ha tenido un aumento promedio del 2,9% anual, menor al total de ánodos. Este fenómeno se explica por la participación del cobre secundario cuyo incremento promedio fue de 5,8% anual.

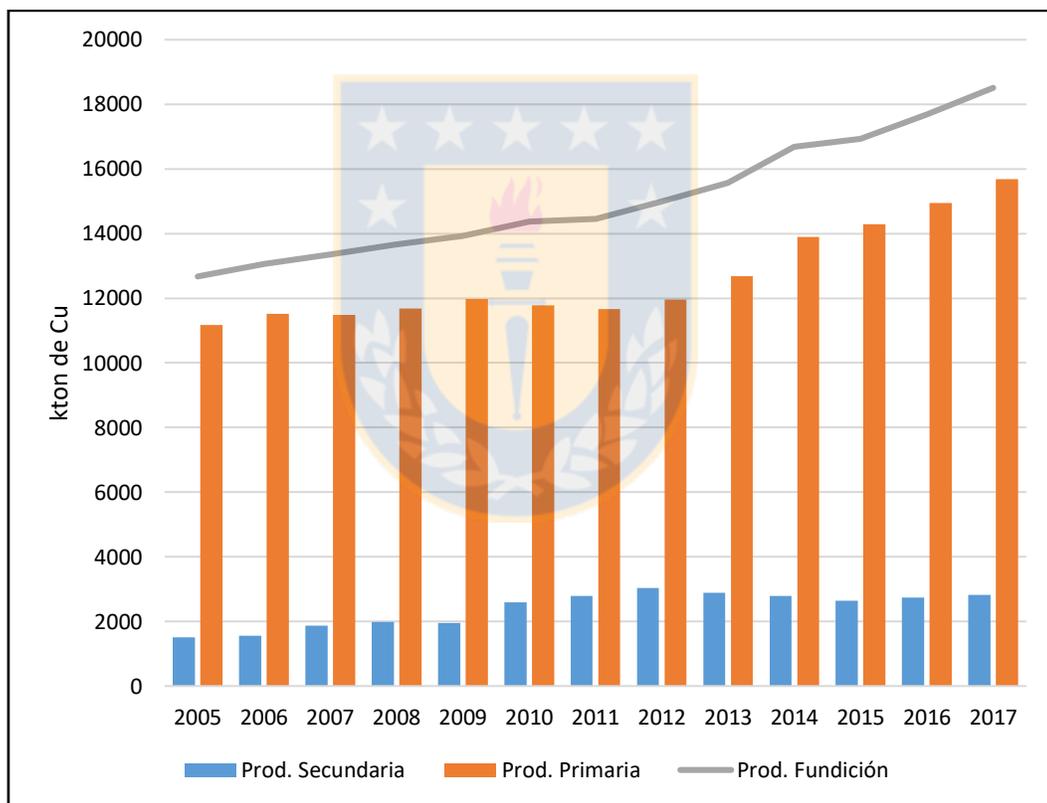


Figura 4.6 Estadística y Producción de Cobre Anódico Mundial

#### 4.2.1 Producción de cobre anódico por geografía

Se seleccionaron las siguientes áreas geográficas más representativas: África y Oceanía, América del norte, América del sur, Europa, Asia sin China y China. La figura 4.7 muestra la evolución histórica de la producción por dichas áreas geográficas. Se observa un nítido crecimiento de la capacidad de producción de Asia y especialmente de China, el que para el año 2017 alcanzó las 7,200 millones de toneladas. Además, se destaca que la producción de todas las zonas geográficas menos China, se han mantenido prácticamente constantes desde el año 2010.

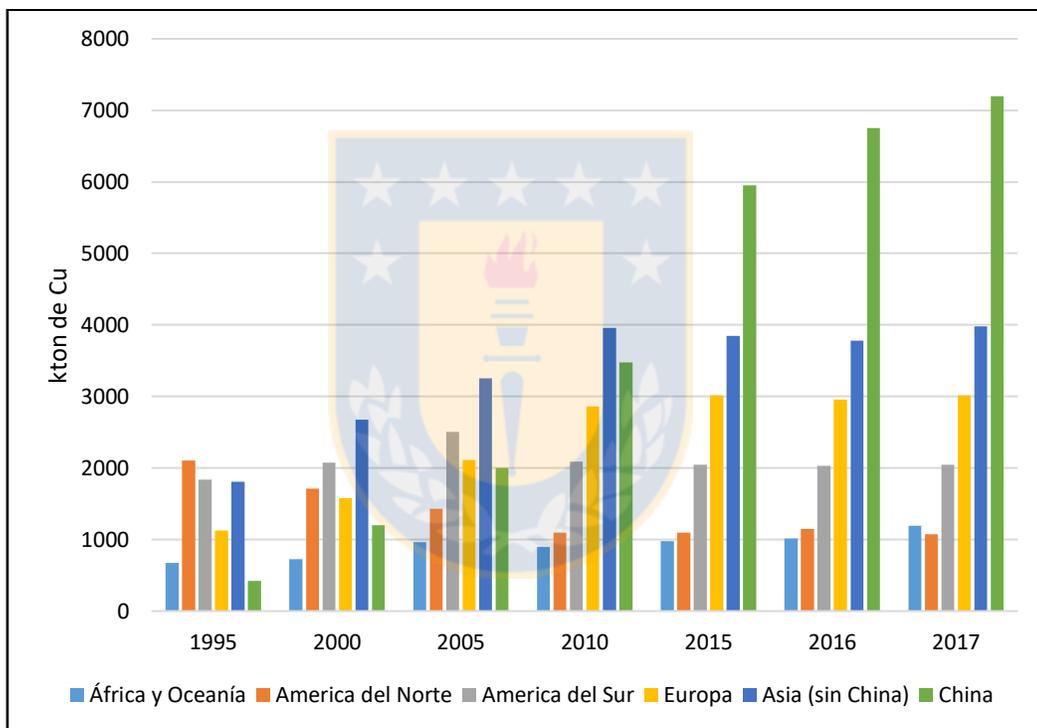


Figura 4.7 Distribución Geográfica de Fundiciones.

La figura 4.8 muestra la participación histórica de la producción por dichas áreas geográficas. Se observa la agresiva intervención de China en la producción de ánodos de cobre. Pasó del 5 al 39% en este periodo, convirtiéndose en el primer productor del mundo. Se destaca el caso de Norte América que en la década de los 90' hacia atrás fue el mayor productor de cobre anódico del mundo, y en el año 2017 solo representa el 6%. Asia (sin China), Europa, África y Oceanía han mantenido prácticamente constante su participación con leves variaciones.

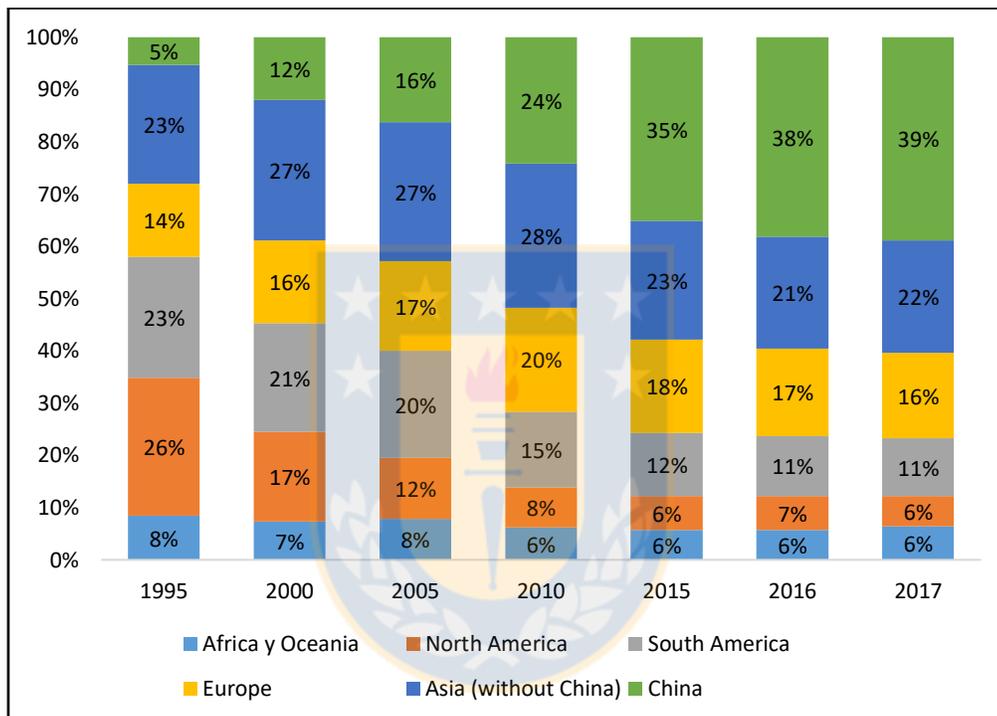


Figura 4.8 Participación Geográfica de Fundiciones

#### 4.2.2 Producción de cobre anódico por tecnología

Se seleccionaron las siguientes tecnologías más representativas: Reverbero, Continuos (Mitsubishi), Reactor Teniente/Noranda, TSL, Flash, Emergentes y Otros (Eléctrico, Shaft,). La figura 4.9 muestra la evolución histórica de la producción mundial por dichas tecnologías. Se observa un claro crecimiento de la capacidad de producción de las tecnologías TSL y especialmente de las tecnologías Flash, el que para el año 2017 alcanzó los 10.124 millones de toneladas de cobre anódico. Por otra parte, se observa que la tecnología Reverbero pasó de ser la segunda tecnología de preferencia en 1995 a ser una tecnología prácticamente obsoleta, siendo utilizada solo por pocas operaciones en el mundo. Se destaca la incorporación de las tecnologías emergentes desarrolladas por China, cuya producción alcanzó los 1,450 millones de toneladas de ánodo el año 2017 [1].

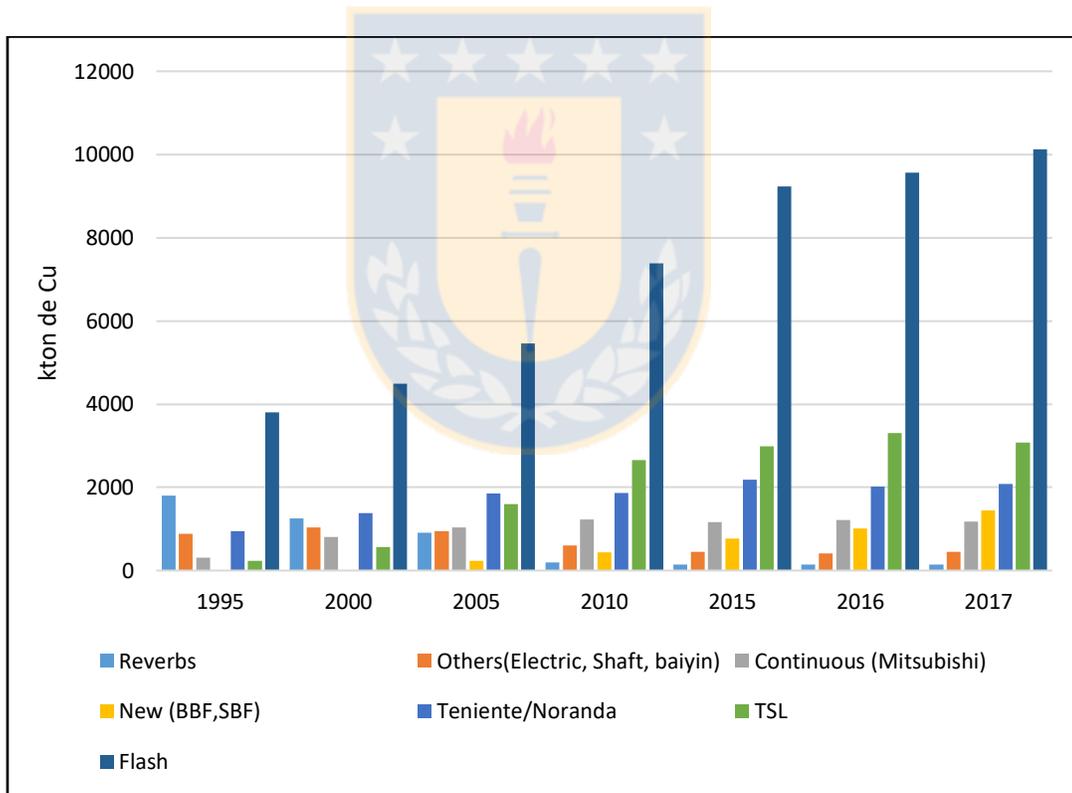


Figura 4.9 Distribución Tecnológica de Fusión

La figura 4.10 muestra la participación histórica de la producción por tecnología Flash y el resto de las tecnologías anteriormente descritas. Desde la aparición de la tecnología Flash, ha sido la preferida por las fundiciones para el procesamiento de concentrados de cobre consolidándose como la principal tecnología en la producción de ánodos alcanzando un 55% de la participación mundial el año 2017. Las tecnologías emergentes y TSL son las que más han aumentado su participación alcanzando 8 y 17%, respectivamente.

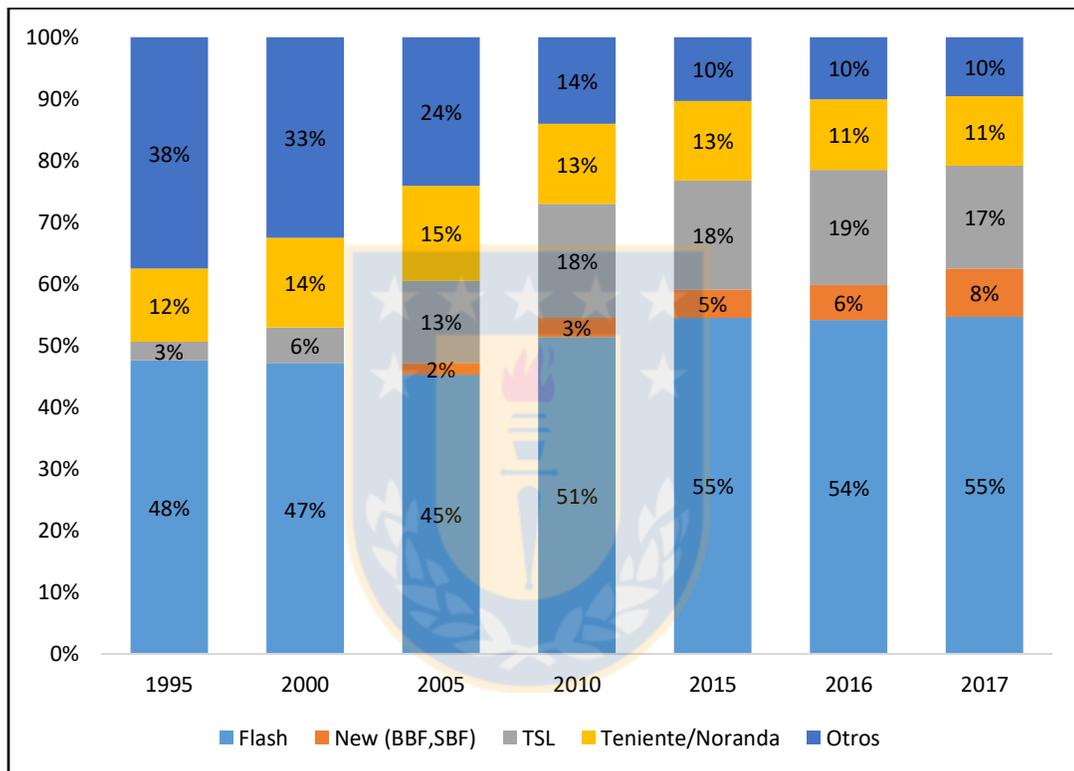


Figura 4.10 Participación de las Tecnologías de Fusión

### 4.2.3 Producción de cobre anódico por escala de capacidad de fusión

Se seleccionaron las siguientes escalas de capacidad de fusión de concentrados de cobre: Bajo las 900 kt; entre 900 y 1500 kt; y sobre las 1500 kt. La figura 4.11 muestra la evolución histórica de la producción mundial segmentada en dichas escalas. Se observa un evidente crecimiento de la capacidad de fusión para una escala mayor a 1500 kt, el que para el año 2017 cuya producción alcanzó los 7.240 millones de toneladas de cobre anódico. La producción para una escala menor a 900 kt es la única que ha visto disminuida su producción alcanzando el año 2017 solo 5.492 millones de toneladas, que representan 30% de la producción total.

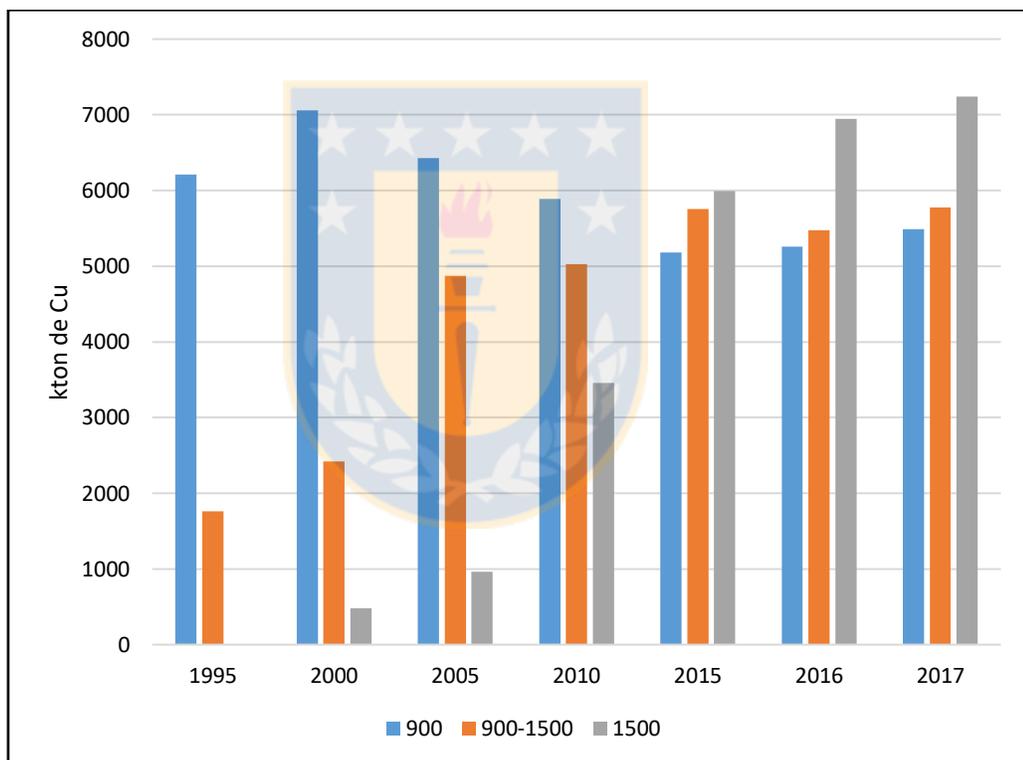


Figura 4.11 Distribución por Escala de Procesamiento de Concentrados.

La figura 4.12 muestra la participación histórica de la producción por escalas de capacidad de fusión de concentrado de cobre. Se observa la clara disminución de la participación para una escala menor a 900kt pasando del 78% el año 1995 a solo 30% el año 2017. Se evidencia una tendencia en el aumento de la capacidad de los hornos de fusión.

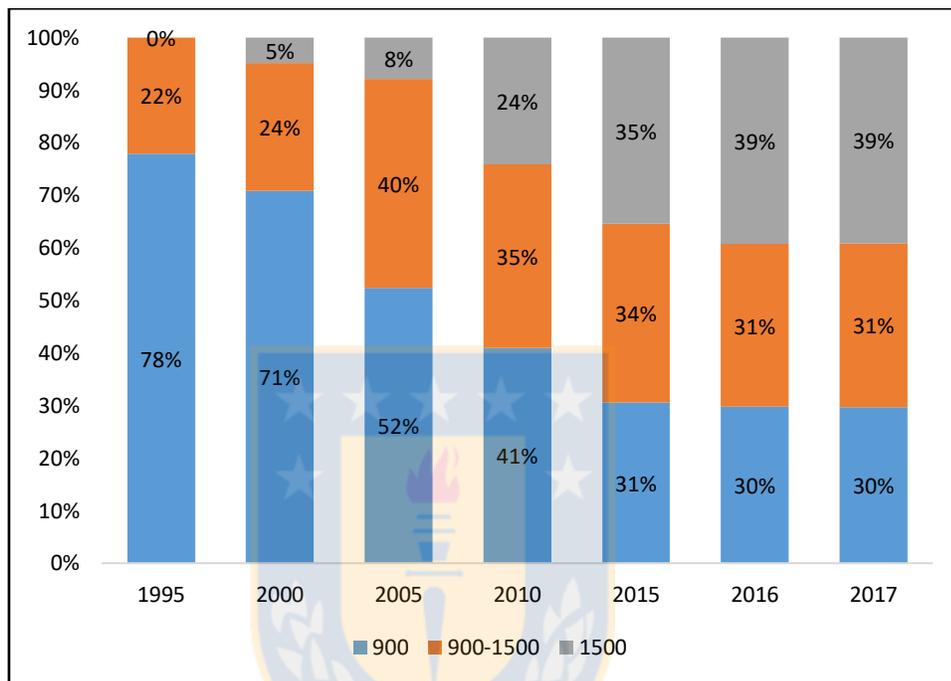


Figura 4.12 Participación por Escala de Procesamiento de Concentrados

#### 4.2.4 Producción de cobre fundido por integración o custom

La figura 4.13 muestra la evolución histórica de la producción mundial segmentada en fundiciones integradas y fundiciones custom<sup>11</sup>. Donde se observa un nítido crecimiento de la producción para las fundiciones no integradas, el que para el año 2017 alcanzó los 11.8467 millones de toneladas de cobre anódico. Por el contrario, la producción para las fundiciones integradas se ha visto estancada desde el año 2010.

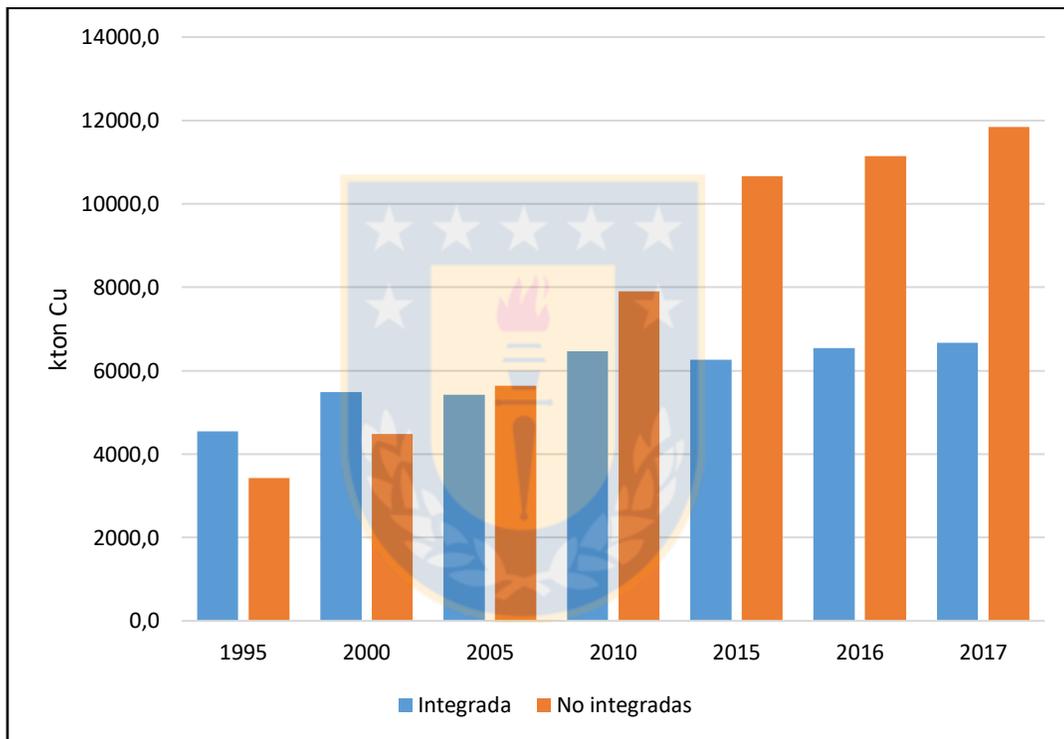


Figura 4.13 Distribución por Integración a la Mina

<sup>11</sup> Fundición custom: Fundiciones “clientes”, que compran los concentrados en el mercado.

La figura 4.14 muestra la participación histórica de la producción de cobre anódico por fundiciones integradas o custom. Se observa la clara disminución de la participación para las fundiciones integradas pasando del 57% el año 1995 a solo 36% el año 2017. Las fundiciones custom han aumentado su participación considerablemente llegando al 64% el año 2017. Esto se debe principalmente al aumento de la producción en China donde sus principales instalaciones no están integradas al complejo minero.

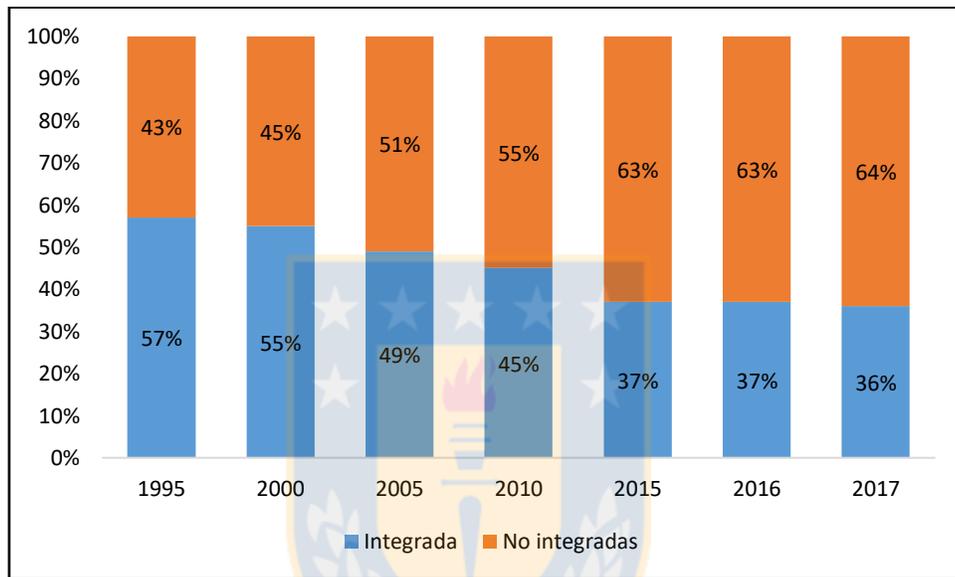


Figura 4.14 Participación por Integración a la Mina

### 4.3 Aspectos relevantes de análisis

La industria de fundición de cobre ha cambiado en varios aspectos durante el tiempo. Se puede determinar a grandes rasgos que la política y economía interna de los países define en gran parte su producción y consumo [4]. Lo vemos claramente en el último tiempo, donde China ha pasado a ser el primer productor y consumidor de cobre fundido en el mundo debido a que debe satisfacer su demanda interna, gracias al explosivo desarrollo económico del país. Lo mismo ocurrió con Estados Unidos y Japón en el siglo XX y anteriormente con Inglaterra durante la revolución industrial [14].

Dentro de la industria de fundición de cobre, existe una amplia gama de tecnologías disponibles para el proceso. Claramente se muestra que las tecnologías Flash han sido las favoritas por las fundiciones para el tratamiento de concentrados, a pesar del ingreso a la industria de nuevas tecnologías de fusión como las TSL y Emergentes chinas. Pero además existe una diversidad en la capacidad de fusión de los hornos, donde la tendencia en el último tiempo ha ido en pos de aumentar cada vez más la capacidad del reactor de fusión. La participación de las fundiciones integradas al complejo minero ha decaído en el tiempo, la estrategia ha ido en desacoplar la fundición de la mina, separando el negocio minero del negocio de la fundición.

Por lo tanto, la tendencia de la industria de fundición de cobre ha sido el uso y desarrollo de tecnologías más eficientes, con un menor impacto ambiental, escalas de procesamiento evolucionando al gigantismo y separación de la fundición a la mina.

Para la variable escala de producción, cabe destacar que se debe analizar esta tendencia en más detalle debido a si corresponde a nuevas instalaciones o aumento en la capacidad de hornos ya instalados.

## 5. Negocio Fundiciones de Cobre

Las Fundiciones de Cobre, al igual que cualquier otra actividad comercial, basan su negocio en el margen entre los ingresos y los costos. Este capítulo describe y analiza consideraciones generales sobre el negocio de la industria de fundición de cobre, con objeto de distinguir las variables clave que dominan en la rentabilidad del sector industrial. Por lo tanto, cualquier factor que ayude a disminuir los costos operacionales y además aporte en mayores utilidades es una variable clave para un análisis de competitividad [2].

### 5.1 Análisis del negocio de la fundición

El precio de venta de los concentrados de cobre se establece por la transacción de la suma de los valores de los elementos de interés que contenga el concentrado, principalmente Cu, Ag y Au. Por lo tanto, para una fundición, el precio de compra se constituye utilizando la referencia de precios de la bolsa de metales para estos elementos, menos unos cargos acordados entre vendedor y comprador, que reflejan los siguientes aspectos:

- Los gastos en que ha de incurrir la fundición para transformar los concentrados a la forma de cobre anódico. Estos cargos son conocido por su sigla TCRC<sup>12</sup> del concentrado.
- Cargos asociados a los contenidos de impurezas en el concentrado que estén fuera de los márgenes permitidos.
- Cargos asociados al transporte del concentrado.

El total de los cargos aplicados por la fundición definen en gran parte el ingreso total de la instalación por transformar el concentrado de cobre en un cobre anódico [6]. Es por esto que la competitividad de las fundiciones se mide principalmente por los costos asociados en los que ha de incurrir la fundición para el tratamiento de los concentrados, además de los créditos obtenidos por venta de subproductos.

---

<sup>12</sup> TCRC: Treatment Charge and Refining Charge

A continuación se describe un esquema de costos y créditos que impactan en la competitividad de la industria.

- Costo operacional: Todos los costos operacionales desde la recepción hasta el despacho.
- Recuperación metalúrgica: Se refiere al total de cobre recuperado durante el proceso de fundición.
- Costo de flete: Considera el flete del concentrado a la fundición y del cobre anódico desde la fundición hasta la refinería.
- Crédito de Subproductos: Ácido sulfúrico y metales preciosos.

### 5.1.1 Costos operacionales

Los costos operacionales consideran todos los gastos asociados a mano de obra, gastos en energía, gastos en mantención, consumibles y otros [1]. A continuación, se describen los principales gastos operacionales.

- Mano de obra: Incluye todo el costo de mano de obra utilizada en todas las operaciones que están presentes en la fundición. Estos gastos dependen fuertemente de sueldos y productividad, como también de otros factores como políticas laborales en el país de origen.
- Energía: Incluye todo el consumo de energía utilizado en todas las operaciones que están presentes en la fundición. Las principales fuentes de energía son: petróleo, gas natural, carbón y electricidad. El uso de las fuentes depende considerablemente de la región donde opera la fundición, los costos asociados a los combustibles y su eficiencia.
- Mantención, Consumibles y Otros: Los gastos en mantención incluyen todos los costos asociados para asegurar la correcta operación de la instalación. Los gastos consumibles consideran los costos de materiales como fundente, agua de refrigeración, elementos de seguridad. Los gastos Otros abarcan servicios básicos que requiere la operación, gastos administrativos, servicio de aseo, servicios de comunicación, entre otros.

### 5.1.2 Recuperación metalúrgica fundición

La fundición de cobre aplica una deducción metalúrgica al concentrado de modo de “no pagar” un material que no es recuperable. Por lo tanto, si la recuperación metalúrgica real es mayor a la deducción metalúrgica aplicada, la fundición obtendrá una mayor utilidad esperada. Lo ideal para el negocio de la fundición es que el margen sea positivo para así aumentar las utilidades mejorando la competitividad de la fundición. La principal pérdida de metal se encuentra en la producción de escorias con contenidos de cobre. Además, existen pérdidas menores en etapas de manejo de concentrado, manejo de circulante y en la producción de polvos metalúrgicos.

### 5.1.3 Costo de flete

Este concepto toma gran relevancia debido a la posición geográfica relativa de una fundición con respecto de la mina y de la refinera. Debido a que generalmente las fundiciones se encuentran alejadas del complejo minero el transporte del concentrado puede generar altos costos para el proveedor, por lo que frecuentemente son compartidos con la fundición. Del mismo modo, el transporte del cobre anódico hasta la refinera electrolítica puede implicar un gasto elevado para la fundición lo que afecta fuertemente en el balance económico. Los costos asociados al transporte son: Transporte Interno (Mina-Puerto, Fundición-Puerto), Almacenamiento en puerto, Análisis químico, Seguros del transporte y Transporte marítimo propiamente tal.

### 5.1.4 Crédito por subproducto

Los créditos por subproducto es un ingreso adicional que recibe la fundición. Este se refiere a dos conceptos: Créditos por valorización de metales preciosos y Crédito por venta de ácido. El crédito por metales preciosos se determina de acuerdo al contenido de estos en el ánodo. El crédito que recibe la fundición por venta de ácido puede ser relevante para el balance final de las utilidades, este depende de la calidad del ácido y de la demanda mundial. La obtención de subproductos está fuertemente relacionada con la tecnología de fusión, las etapas de manejo de gases y del tratamiento de las escorias.

## 5.2 Aspectos relevantes

El negocio de fundiciones de cobre se basa en la compra de concentrados de cobre y en la venta de cobre metálico. Los cargos aplicados a la compra de concentrado determinan en gran parte las utilidades de la industria. Estos cargos están dominados por la oferta de concentrados y la capacidad de fusión. Si la oferta de concentrado supera a la capacidad de fusión, estos cargos son favorecidos para la fundición aplicando cargos altos, pero si la capacidad de fusión supera a la oferta de concentrado los cargos son favorecidos para las minas ya que las fundiciones competirán para satisfacer su demanda interna. Es importante hacer notar el aumento explosivo y excesivo de la capacidad de fusión de China, que podría implicar en el control de los cargos por tratamiento en un corto-mediano plazo. Cabe destacar que las fundiciones Integradas no realizan el proceso de compra de concentrados.

De acuerdo a lo planteado en este capítulo, un correcto manejo de las variables Costos Operacionales, Recuperación Metalúrgica, Producción de Ácido, Recuperación de Metales Preciosos, pero además estar ubicado en una zona geográfica donde se disminuyan en gran parte los costos por flete, fortalecen la competitividad del negocio [10]. Existen otras variables como porcentaje de utilización de la planta, depreciación de la instalación y capacidad de manejo de impurezas, que pueden aportar a fortalecer la competitividad de la fundición. Esta última puede ser de gran relevancia ya que un correcto proceso para el tratamiento de impurezas puede ser una fortaleza, debido al aumento en la producción de concentrados complejos en el mundo.

Debido a que generalmente la competitividad de una industria se analiza en base a los costos operacionales, debido a que es un factor con un alto peso específico para un análisis de este tipo, este estudio se focalizará específicamente en estudiar esta variable.

## 6. Benchmarking Competitivo

En este capítulo se estructura un estudio detallado de Benchmarking con objeto de describir la competitividad de la industria de fundiciones de Cobre a través de los costos operacionales [20].

### 6.1 Benchmarking internacional de fundición

Mediante el análisis detallado en los capítulos “Descripción de la Industria” y “Negocio de la Fundición” se realiza el benchmarking competitivo correlacionando las variables de escala de producción, naturaleza tecnológica e integración del suministro de concentrado con los costos operacionales.

#### 6.1.1 Selección del conjunto de fundiciones

Debido a la baja proporción de información proveniente de fundiciones chinas, se seleccionó un grupo de 57 instalaciones, que basan principalmente su negocio en fundir concentrados de cobre, para las cuales se dispuso de información completa. El conjunto considerado es suficientemente representativo, ya que representa un nivel de producción de 13,6 millones de toneladas de cobre equivalente al 77% de la producción mundial de Cobre de fundición [29]. Además, abarca todo el conjunto de diferentes tecnologías, niveles de producción e integración respecto al conjunto mina-concentrador.

La tabla 6.1, agrupa el total de 57 fundiciones escogida, identificando el nombre de la fundición y localización geográfica por país.

Tabla 6.1 Conjunto de fundiciones seleccionadas para el estudio de benchmarking

N°	Nombre	País	N°	Nombre	País
1	Aurubis-Hamburg East	Alemania	29	Jinlong	China
2	Olympic Dam	Australia	30	Guixi	China
3	Mount Isa	Australia	31	Harjavalta	Finlandia
4	Dias D Avila	Brasil	32	Tuticorin	India
5	Pirdop	Bulgaria	33	Dahej	India
6	Copper Cliff	Canadá	34	Gresik	Indonesia
7	Horne	Canadá	35	Naoshima	Japón
8	Paipote	Chile	36	Onahama	Japón
9	Potrerrillos	Chile	37	Tamano	Japón
10	Chagres	Chile	38	Saganoseki	Japón
11	Ventanas	Chile	39	Toyo	Japón
12	Alto Norte	Chile	40	La Caridad	México
13	Chuquicamata	Chile	41	Tsumeb	Namibia
14	Caletones	Chile	42	Ilo	Perú
15	Yantai	China	43	Pasar	Philippines
16	Huludao	China	44	Legnica	Poland
17	Tongling (Jinchang)	China	45	Glogow I	Poland
18	Dongying	China	46	Glogow II	Poland
19	Chifeng Jinfeng	China	47	Onsan	Republic Of Korea
20	Chifeng Jinjian	China	48	Bor	serbia
21	Baiyin	China	49	Palabora	South Africa
22	Yunnan (Kunming)	China	50	Huelva	Spain
23	Zijin	China	51	Ronnskar	Sweden
24	Jinchuan	China	52	Hayden	USA
25	Jinchuan Guangxi	China	53	Garfield	USA
26	Daye	China	54	Miami	USA
27	Tongling (Jinguan)	China	55	Mufulira	Zambia
28	Shandong Xiangguang	China	56	Nchanga	Zambia
			57	Chambishi (NFC)	Zambia

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

### 6.1.2 Clasificación de fundiciones

Mediante la tendencia en la producción mundial de cobre de fundición se han definido tres criterios de clasificación: Naturaleza tecnológica de fusión; nivel de Procesamiento de concentrados; y su integración o desacople al negocio minero.

Respecto a la naturaleza tecnológica, estas se agrupan según la tecnología empleada en el reactor de fusión:

- Tecnología Flash.
- Tecnologías No-Flash (Noranda, Teniente, Mitsubishi, Ausmelt, Isasmelt, Reverbero, Eléctrico).
- Tecnologías Emergentes (BBF, SBF, Baiyin).

Respecto a la escala de procesamiento de concentrados de cobre, estas se agrupan según la capacidad del horno de fusión, se definen tres niveles:

- Bajo: Menor a 900.000 toneladas de concentrado por año.
- Medio: entre 900.000 y 1.500.000 toneladas de concentrado por año.
- Alto: Sobre las 1.500.000 toneladas de concentrado por año.

Respecto a la integración con el negocio mina-concentradora, se han clasificado en Fundiciones Integradas y Custom.

Tabla 6.2 Variables de clasificación de fundiciones

Tecnología de Fusión	Escala de procesamiento	Integración
<b>Flash:</b> Outokumpu flash / Inco flash	<b>Nivel Bajo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor a 900.000 toneladas anuales de concentrado</li> </ul>	<b>Fundición Integrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayoritariamente funde concentrados propios.</li> </ul>
<b>No-flash</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Noranda / Teniente</li> <li>• Mitsubishi/Ausmelt/Isasmelt</li> <li>• Reverbero/Eléctrico</li> </ul>	<b>Nivel Medio</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre 900.000 y 1.500.000 toneladas anuales de concentrado</li> </ul>	<b>Fundición no Integrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compra concentrados a otras Empresas.</li> </ul>
<b>Emergentes:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BBF / SBF/Baiyin</li> </ul>	<b>Nivel Alto</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor a 1.500.000 toneladas anuales de concentrado</li> </ul>	

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

De acuerdo a la clasificación de la tabla 6.2 señalada anteriormente, las 57 fundiciones seleccionadas, se pueden agrupar de la forma que muestra la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Clasificación de las fundiciones por tecnología

Fundiciones Integrada			
	Flash	No-Flash	Emergentes
Nivel bajo	Hayden Copper Cliff Olympic Dam Chagres Glogow II	Legnica Tsumeb Bor Potrerillos Miami	
Nivel Medio	Garfield La Caridad Pirdop Chuquicamata	Glogow I Ronnskar Ilo Mount Isa Yunnan (Kunming)	
Nivel Alto	Jinchuan Tongling (Jinguan)	Caletones	
Fundiciones Custom (No-Integrada)			
	Flash	No-Flash	Emergentes
Nivel bajo	Tamano Nchanga Días D Ávila Harjavalta	Yantai, Huludao Paipote, Ventanas Palabora Horne, Naoshima Onahama, Mufulira Tongling (Jinchang)	Dongying Chifeng Jinfeng Baiyin
Nivel Medio	Pasar Huelva Jinlong Zijin	Altonorte Gresik Tuticorin	
Nivel Alto	Aurubis - Hamburg East Guixi Jinchuan Guangxi Saganoseki Toyo	Daye Chifeng Jinjian Chambishi (NFC) Dahej Onsan	

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

## 6.2 Costos operacionales

La figura 6.1, muestra los componentes principales del costo operacional del conjunto de fundiciones seleccionadas; energía, mano de obra y otros [29].

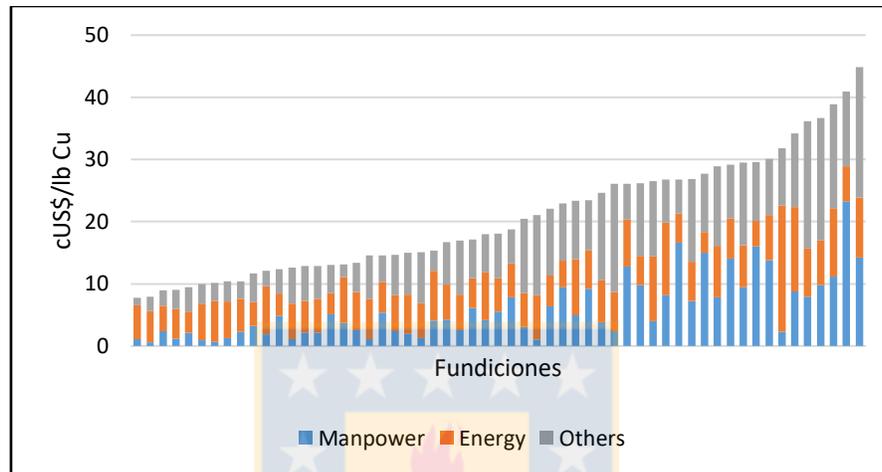


Figura 6.1 Costo Operacional por Fundición

Los costos operacionales de una fundición están constituidos por: costos en mano de obra, costos en energía y otros costos, que a su vez incluye los costos en administración local, mantenimiento, insumos, y servicios y administración [1]. La figura 6.2 es posible apreciar una distribución promedio de los costos de fundición.

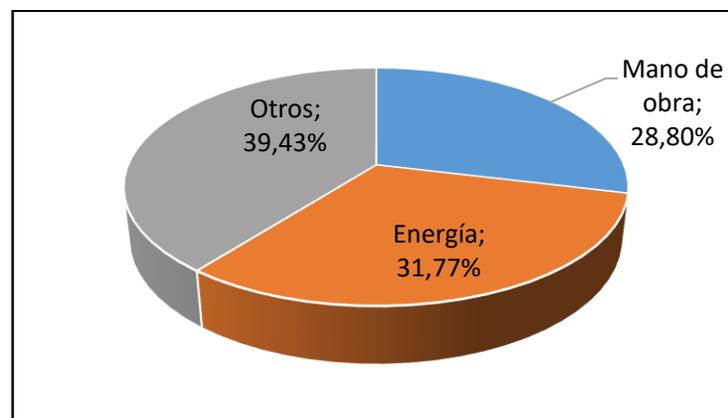


Figura 6.2 Distribución Costos de Operación

### 6.2.1 Costos operacionales por tecnología

Si comparamos los costos operacionales entre fundiciones con distintas tecnologías, figura 6.3, los mayores costos se asocian a la tecnología No-Flash, con un promedio de 22,9 cUS\$/lb Cu. La tecnología flash muestra un costo promedio de 19,3 cUS\$/lb Cu. Las tecnologías emergentes muestran los costos más bajos, con un promedio de 9,3 cUS\$/lb Cu. Sin embargo, hay que hacer notar que este dato está sesgado por una muestra de solo 3 fundiciones localizadas en china.

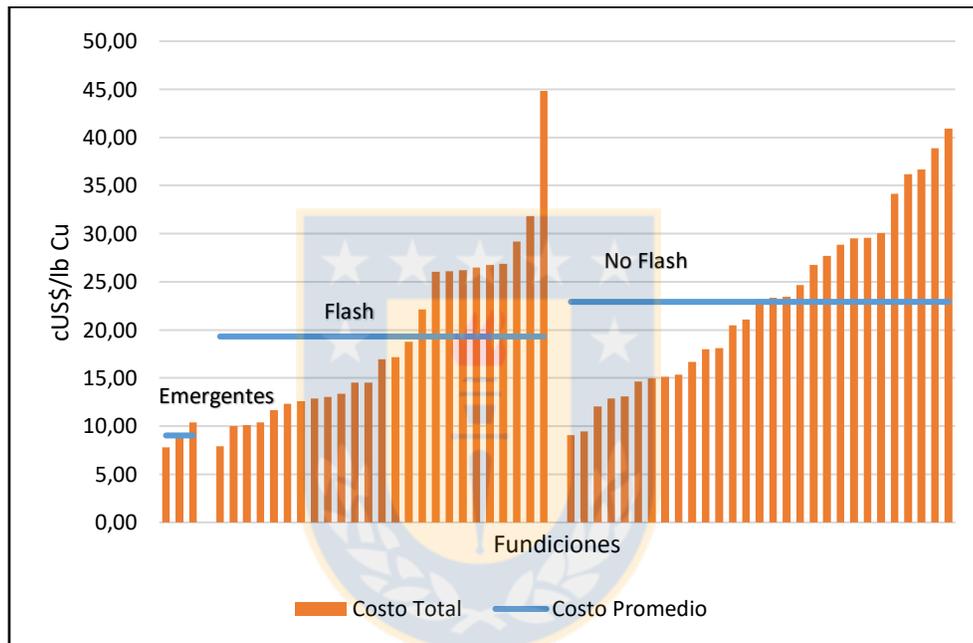


Figura 6.3 Costos Operacionales Comparados por Tecnología

### 6.2.2 Costos operaciones por escala de procesamiento

Al realizar una comparación de costos operacionales por nivel de producción, encontramos que los costos más bajos los tienen las fundiciones de nivel de producción alto, con un promedio de 13,9 cUS\$/lb Cu, seguido por las fundiciones de tamaño bajo, con 22,5 cUS\$/lb Cu promedio. Las fundiciones de media producción presentan un costo promedio mayor comparable a las anteriores de 23,2 cUS\$/lb Cu, figura 6.4.

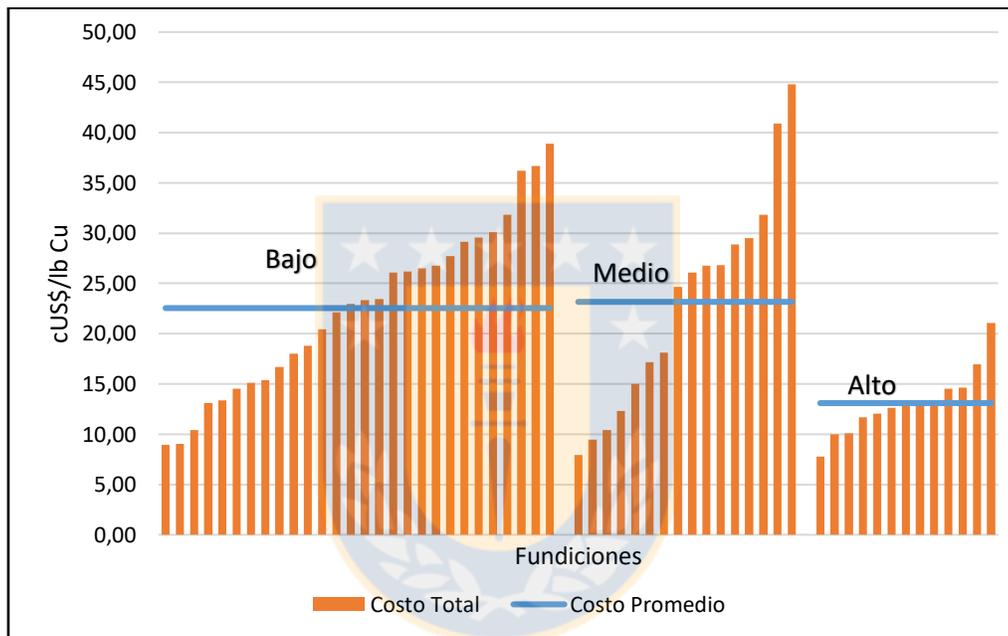


Figura 6.4 Costos Operacionales Comparados por nivel de Procesamiento.

### 6.2.3 Costos operaciones por integración o custom

Finamente, al realizar una comparación de costos operacionales entre fundiciones integradas y no integradas, encontramos costos inferiores en las fundiciones no integradas, con un promedio de 17,6 cUS\$/lb Cu y de fundiciones integradas, con un promedio de 25,4 cUS\$/lb Cu, figura 6.5. En la observación anterior un factor influyente es la naturaleza no integrada de las fundiciones chinas.

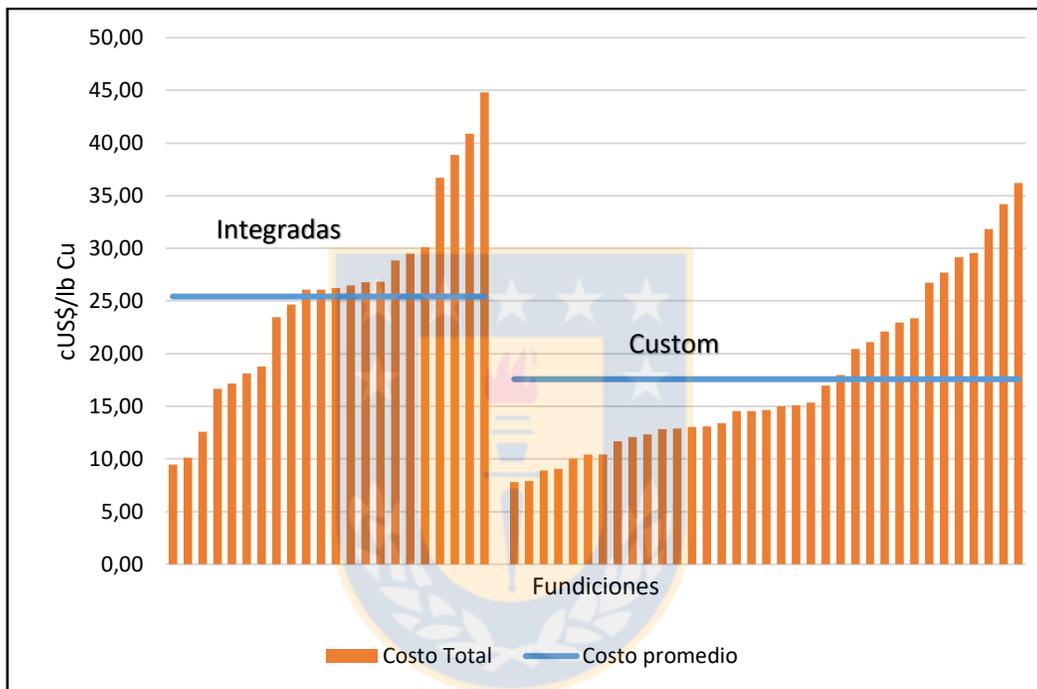


Figura 6.5 Costos Operacionales Comparados por Integración

### 6.3 Tabla resumen benchmarking

La tabla 6.4, resume los promedios matemáticos de los costos operacionales de acuerdo a los tres atributos estudiados: Escala de producción, naturaleza tecnológica e integración del suministro de concentrado.

Tabla 6.4 Resumen información benchmarking

		<b>Costos Operacionales</b> cUS\$/lb Cu
<b>Tecnología</b>	Flash	19,3
	No Flash	22,9
	Emergentes	9,3
<b>Tamaño</b>	Bajo	22,5
	Medio	23,2
	Alto	13,9
<b>Integración</b>	Integrada	25,4
	No integrada	17,6

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

## 7. Resultados y Discusiones

En base a los resultados del benchmarking competitivo y de la tendencia en la producción de cobre anódico se puede inferir que utilizando una tecnología emergente o una tecnología flash, desacoplando el negocio de fundición del negocio mina y una escala de procesamiento de concentrado sobre las 1.500.000 toneladas/año se obtienen bajos costos operacionales mejorando la competitividad de la industria. A través de un análisis de competitividad del costo operacional y de factores de productividad, se discute y confronta la veracidad de estos resultados.

### 7.1 Competitividad del costo operacional

Un primer análisis de competitividad se realiza comparando el costo operacional de la mano de obra y energía, como función del factor tecnológico, nivel de producción e integración del conjunto mina-fundición. El costo de mano de obra y energía, representan 29% y 32% de los costos de operación (figura 6.2), respectivamente, por lo tanto, son los principales insumos de una fundición y sobre los cuales se centra el análisis del costo operacional.

En la figura 7.1, se esquematiza el mapa de competitividad entre los costos de energía y de mano de obra, donde se han trazado las rectas de: costo promedio agregado de mano de obra y energía (12,5 cUS\$/lb Cu); costo promedio de mano de obra (5,9 cUS\$/lb Cu); y costo promedio de energía (6,6 cUS\$/lb Cu). Por medio de dichas rectas se distinguen dos áreas de competitividad: la formada bajo la curva de costo promedio agregado; y la formada por el cuadrante de intersección de menor costo entre las rectas de costo promedio de mano de obra y de energía.

En la misma figura 7.1 se identifican los factores de: naturaleza tecnológica; nivel de producción; e integración del conjunto mina-fundición, a través de una simbología particular al “punto” que identifica la fundición. Esta simbología es:

- Forma geométrica del “punto” para el factor de naturaleza tecnológica.
- Tamaño del “punto” para el factor de nivel de producción.
- Relleno de color del “punto” para identificar el factor de integración del conjunto mina-fundición.

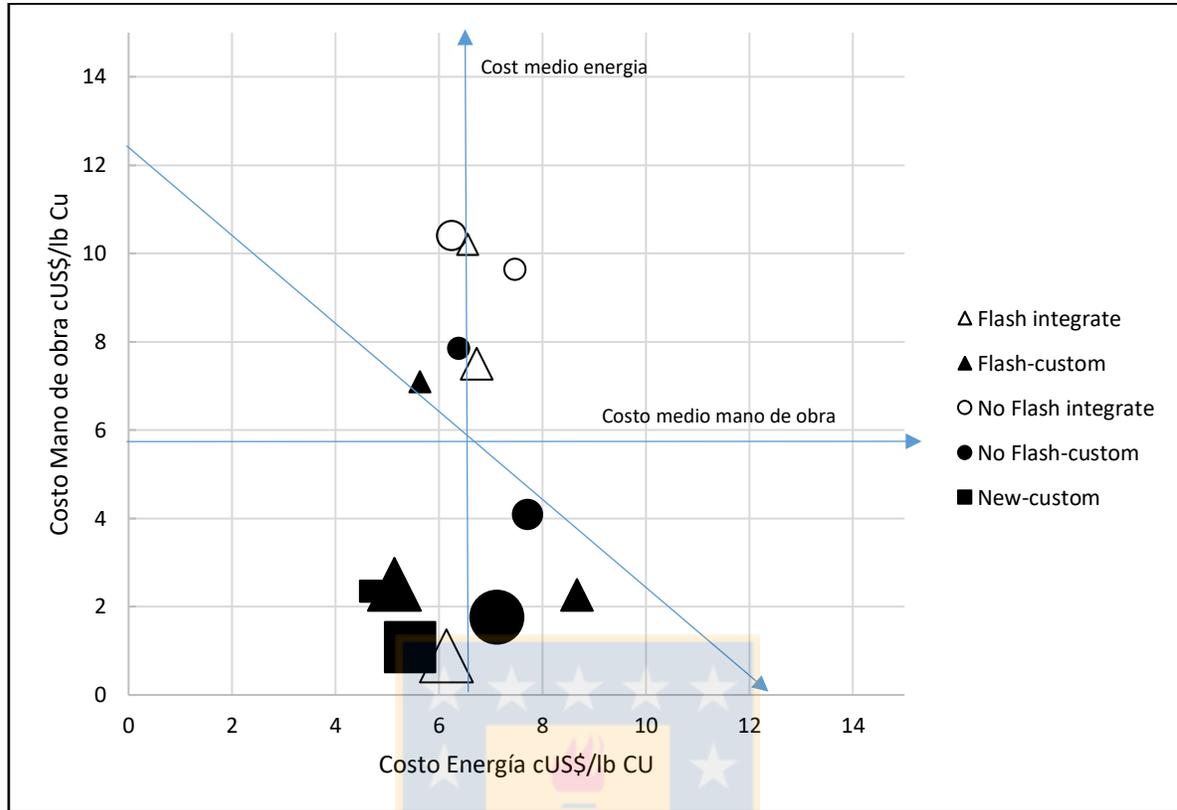


Figura 7.1 Mapa de Competitividad por Costo Energía-Mano de Obra de las 57 fundiciones.

Del análisis de la figura 7.1, se concluye que:

- Bajo la curva de costo promedio agregado se encuentran el 100% de las tecnologías emergentes, 65% de las fundiciones con tecnología flash y el 42% de tecnología no flash.
- Bajo la curva de costo promedio agregado se encuentra el 100% de las fundiciones de gran tamaño, el 40% de tamaño medio y el 14% de las fundiciones pequeñas.
- Bajo la curva de costo promedio agregado se encuentra el 75% de las fundiciones no integradas y el 16% de las fundiciones integradas.
- En el cuadrante de intersección de menor costo entre las rectas de costo promedio de mano de obra y energía se encuentra el 100% de las tecnologías emergentes, el 48% de las tecnologías flash y ninguna de las tecnologías no flash.
- En el cuadrante de intersección de menor costo entre las rectas de costo promedio de mano de obra y energía se encuentra el 49% de las fundiciones de gran tamaño, el 14% de las fundiciones pequeñas y ninguna de tamaño medio.
- En el cuadrante de intersección de menor costo entre las rectas de costo promedio de mano de obra y energía se encuentra el 26% de las fundiciones no integradas y el 16% de las fundiciones integradas.

## 7.2 Factores de competitividad de la productividad

Del análisis de competitividad al costo operacional, la mayor escala de producción junto con las tecnologías emergentes, aparecen como la más competitiva, sin embargo, este primer análisis tiene el sesgo de enmascarar los factores de precios y de productividad, tanto de la mano de obra como de la energía. Distinción que es relevante como consecuencia de la alta variabilidad internacional que tiene el nivel de salarios y el costo de la energía. Así entonces, se hace necesario profundizar este análisis y confrontar la validez de estas primeras conclusiones, con relación a los precios y productividades de los insumos de mano de obra y energía.

La tabla 7.1, clasifica las bandas de nivel de precios: tres clases de precio de mano de obra (clases 1-2-3); y tres clases de precio de energía (clases A-B-C), con el objeto de definir un ordenamiento matricial según estos niveles de precios. El criterio de selección de estas bandas cumple el objetivo de hacer una distribución equitativa del número de fundiciones en los diferentes cuadrantes.

El precio de la energía se expresa en centavos de dólar de energía consumida en Mega Joule (MJ) y la mano de obra en centavos de dólar por hora hombre (HH). Las fuentes de energía consideradas son: energía eléctrica, petróleo, gas natural y carbón. Para establecer un costo de la energía global, se calcula el precio equivalente (promedio) que considera el aporte energético total y su correspondiente valor.

Tabla 7.1 Valores medios precio de energía y mano de obra

<b>Bandas de precio de energía en cUS\$/MJ</b>	<b>Bandas de precio de mano de obra en cUS\$/HH</b>
<b>Clase A: sobre 1,3</b>	<b>Clase 1: sobre 20</b>
<b>Clase B: entre 1,3 y 1,7</b>	<b>Clase 2: entre 5 y 20</b>
<b>Clase C: menor a 1,3</b>	<b>Clase 3: menor a 5</b>

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

Aplicando esta clasificación se origina la figura 7.2, donde se distinguen nueve grupos o clases, que agrupan al subconjunto de fundiciones que operan en una misma banda de precios de la energía y mano de obra.

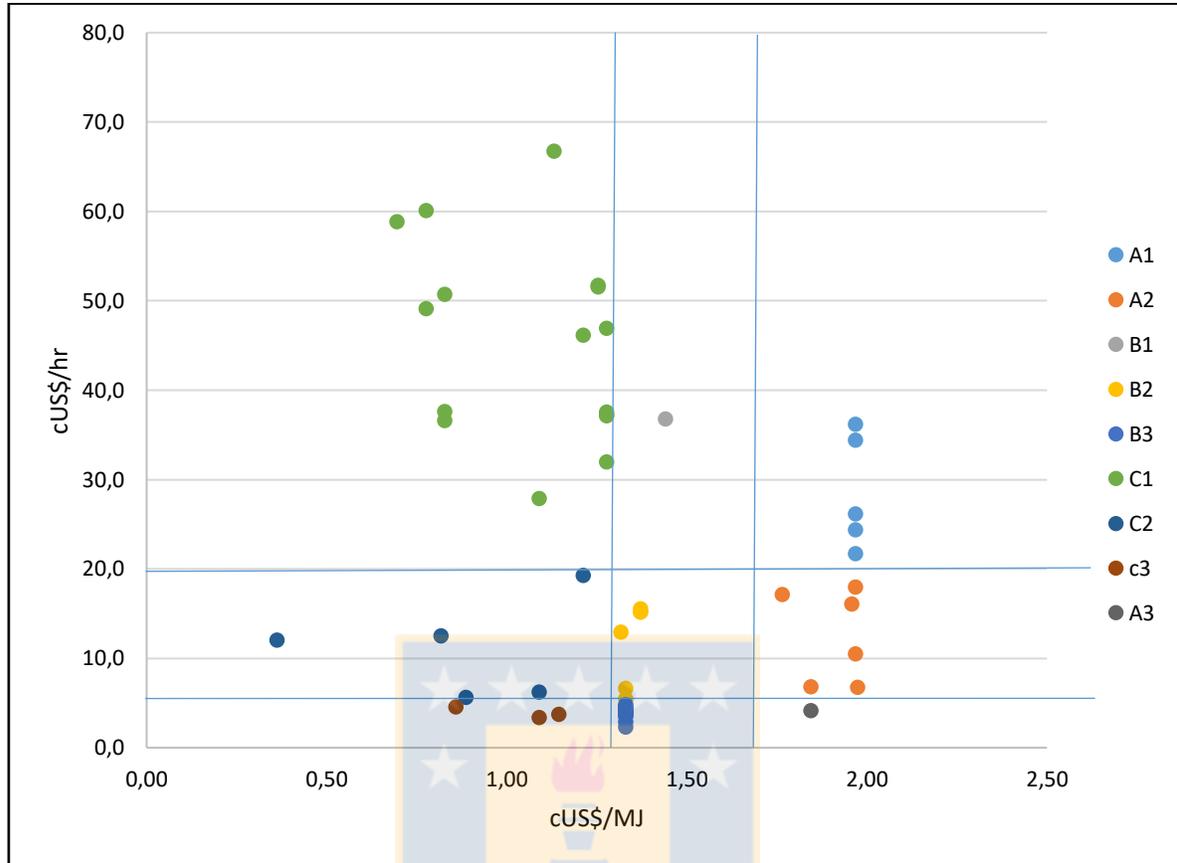


Figura 7.2 Mapa de Precio de Energía y Mano de Obra para las 57 Fundiciones

La matriz de la tabla 7.2. identifica las fundiciones en estudio dentro de los segmentos de competitividad dado por el ordenamiento matricial de precio de energía y mano de obra, respecto a las clases definidas, A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3.

Tabla 7.2 Clasificación de fundiciones por precio de energía y precio de mano de obra

	A	B	C
<b>1</b>	Alto Norte Chuquicamata Chagres Caletones Ventanas	Huelva	Ronnskar, Hayden, Miami Harjavalta, Horne, Garfield Olympic Dam, Mount Isa, Tamano Toyo, Naoshima, Onahama Saganoseki, Mufulira, Aurubis-Hamburg Copper Cliff
<b>2</b>	Ilo Paipote Pasar Tuticorin Potrerillos Onsan	Yantai Yunnan (Kumming) Gresik Glogow II Glogow I Legnica	Tsumeb Nchanga Palabora Dias D Avila Pirdop
<b>3</b>	Dahej	Baiyin, Guixi, Zijin Huludao, Tongling(Jinguan), Tongling (Jincheng), Chifeng Jinfeng, Jinchuan Guanxi, Jinchuan, Jinlong Shandong Xiangguang Dongying, Chifeng Jinjian Daye	Bor Chambishi (NFC) La Caridad

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

A partir de esta clasificación, se construye la figura 7.3, donde cada fundición queda representada por sus valores de productividad de energía y de mano de obra. Con el objeto de definir un ordenamiento matricial según estos niveles productividad. Se trazan líneas verticales y horizontales que representan los promedios de productividad de estos recursos calculado para cada clase de la banda de precios anteriormente definida.

Estos niveles se detallan en la tabla 7.3, en donde la productividad de la energía se mide en unidades de energía consumida (Mega Joule) por tonelada de concentrado fundido, e igualmente la productividad de la mano de obra se mide en horas hombre utilizadas por tonelada de concentrado fundido.

Tabla 7.3 Valores medios productividades de energía y mano de obra

Productividad media de la energía en MJ/ton conc	Productividad mano de obra en HH/ton conc
<b>Clase A: 2689</b>	<b>Clase 1: 1,3</b>
<b>Clase B: 2576</b>	<b>Clase 2: 3,7</b>
<b>Clase C: 3483</b>	<b>Clase 3: 2,6</b>

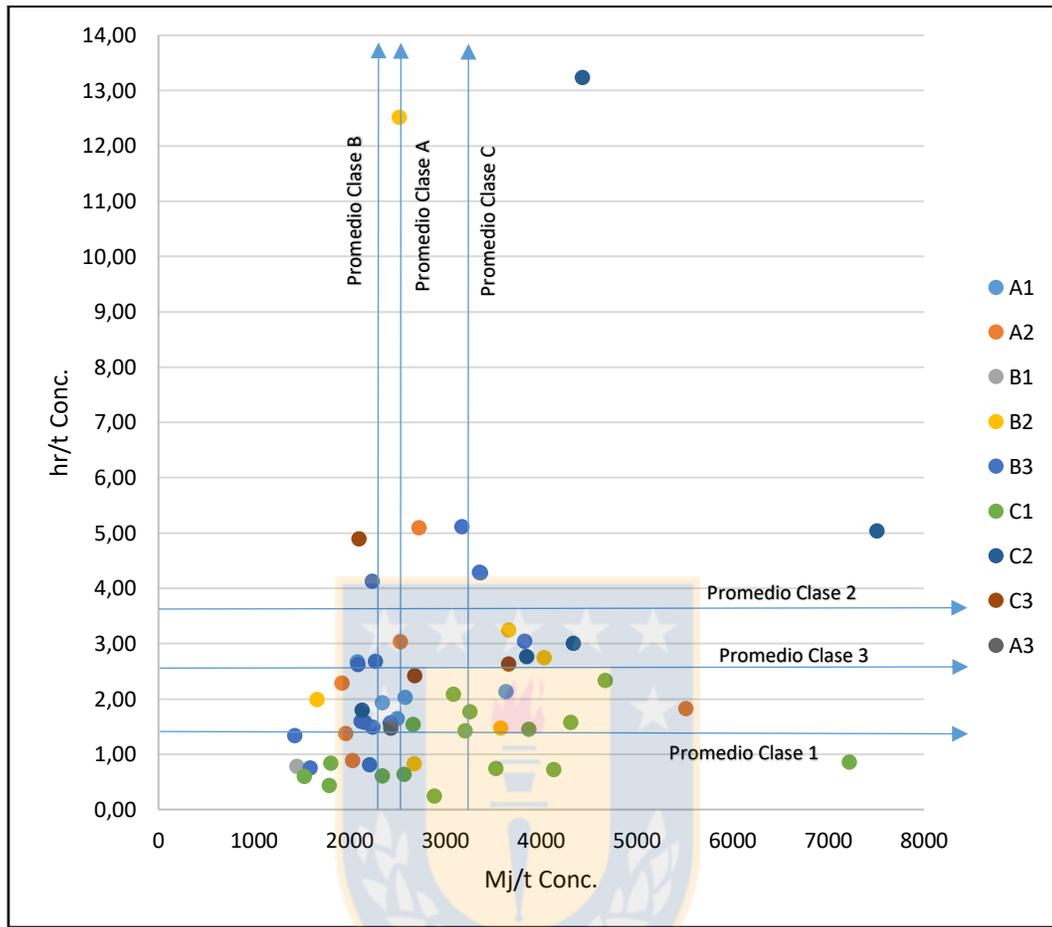


Figura 7.3 Mapa de Productividad de Energía y Mano de obra para las 57 fundiciones

En la figura 7.3 las líneas verticales representan los promedios de utilización de energía para cada clase A-B-C. De la misma forma, las líneas horizontales representan los promedios de utilización de mano de obra para cada clase 1-2-3. De esta forma, las fundiciones que se ubican a la izquierda de una línea vertical están por sobre el promedio de productividad o eficiencia de energía de la clase que presenta la línea. En forma similar, si una fundición se ubica por debajo una línea horizontal, significa que tiene una productividad o eficiencia de mano de obra sobre el promedio que representa dicha línea.

Con el objetivo de facilitar el análisis e interpretación de la información mostrada en la figura 7.3, se construye un nuevo ordenamiento matricial dado en la tabla 7.4, que agrupa los pares de productividad energía-mano, pertenecientes a cada cuadrante que se forma de la intersección entre

las líneas promedio de productividad. Y donde, además, cada fundición está caracterizada en su clase de precios energía-mano de obra.

Tabla 7.4 Clasificación de las fundiciones sobre la base de la utilización de mano de obra y energía por clase

	1	3	2	
<b>B</b>	AURUBIS-HAMBURG EAST (C1) Huelva (B1) Jinlong (B3) Mount Isa (C1) Onsan (A2) Saganoseki (C1) Tamano (C1) Tongling (Jinguan) (B3) Toyo (C1)	Alto Norte (A1) Caletones (A1) Dahej (A3) Dongying (B3) Ilo (A2) Jinchuan (B3) Jinchuan Guangxi (B3) Pirdop (C2) Shandong Xiangguang (B3) Tuticorin (A2) Yunnan (Kunming) (B2) Zijin (B3)	Chagres (A1) Chifeng Jinfeng (B3) Guixi (B3) Potrerillos (A2)	Bor (C3) Huludao (B3) Yantai (B2)
<b>A</b>	Gresik (B2)	Chuquicamata (A1) Harjavalta (C1) Chambishi (NFC) (C3)		
<b>C</b>	Mufulira (C1)	Copper Cliff (C1) Hayden (C1) Horne (C1)		Paipote (A2) BAIYIN (B3) Chifeng Jinjian (C1) Tongling (Jinchang) (B3)
	Garfield (C1) Naoshima (C1) Onahama (C1)	Ventanas (A1) Pasar (A2) Glogow II (B2) Miami (C1) Olympic Dam (C1) Ronnskar (C1)	Daye (B3) Dias D Avila (C2) Glogow I (B2) La Caridad (C3) Legnica (B2) Nchanga (C2)	Palabora (C2) Tsumeb (C2)

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

Para la realización del análisis se plantea el siguiente supuesto: “Cada fundición que utilice sus recursos en forma eficiente, tendrá a lo menos una productividad de la energía y mano de obra, sobre el valor promedio de su clase”. Así, una fundición del grupo B1 que opere en forma eficiente, se ubicará dentro del cuadrante formado por las rectas productividad B y productividad 1 de la tabla 7.4. Esto no se cumple para la mayoría de las fundiciones del grupo de estudio, existen fundiciones que escapan a su grupo, ya sea utilizando sus recursos en forma más eficiente y posicionándose en su clase superior (Toyo pertenece al grupo C1 y se ubica en el cuadrante B1), o utilizando sus recursos de forma menos eficiente que el promedio de su clase, situándose en un grupo inferior

(Chuquicamata pertenece al grupo A1 y se encuentra en el cuadrante A3). La tabla 7.5, asigna un índice de eficiencia de acuerdo al criterio anterior, asignando +1 sobre el promedio de su clase y -1 en caso de estar bajo el promedio de su clase.

Tabla 7.5 Índice de eficiencias para cada fundición

Name	Factor Energía	Factor Mano obra	Name	Factor Energía	Factor Mano obra
Altonorte	2	-1	Jinlong	1	2
Aurubis - Hamburg East	3	1	La Caridad	-1	-1
Baiyin	-2	-2	Legnica	-3	1
Bor	3	-2	Miami	-1	-1
Caletones	2	-1	Mount Isa	3	1
Chagres	2	-2	Mufulira	1	1
Chambishi (NFC)	2	1	Naoshima	-1	1
Chifeng Jinfeng	1	-1	Nchanga	-1	1
Chifeng Jinjian	1	-3	Olympic Dam	-1	-1
Chuquicamata	1	-1	Onahama	-1	1
Copper Cliff	1	-1	Onsan	2	3
Dahej	2	1	Paipote	-1	-1
Daye	-3	-1	Palabora	-1	-1
Dias D Avila	-1	1	Pasar	-2	2
Dongying	1	1	Pirdop	3	2
Garfield	-1	1	Potrerillos	2	1
Glogow I	-3	1	Ronnskar	-1	-1
Glogow II	-3	2	Saganoseki	3	1
Gresik	-1	3	Shandong Xiangguang	1	1
Guixi	1	-1	Tamano	3	1
Harjavalta	2	-1	Tongling (Jinchang)	-2	-2
Hayden	1	-1	Tongling (Jinguan)	1	2
Horne	1	-1	Toyo	3	1
Huelva	1	1	Tsumeb	-1	-1
Huludao	1	-2	Tuticorin	2	2
Ilo	2	1	Ventanas	-2	-1
Jinchuan	1	1	Yantai	1	-1
Jinchuan Guangxi	1	2	Yunnan (Kunming)	1	2
			Zijin	1	1

A partir de la tabla 7.5 se construye el mapa de competitividad, tabla 7.6, que entrega el ranking de productividad de la energía y mano de obra, asociado a los factores de: naturaleza tecnológica; y nivel de producción, por cada fundición.

Tabla 7.6 Mapa de competitividad productividad de la mano de obra y energía, de acuerdo a la naturaleza tecnológica y nivel de producción

Factor Mano de obra							
Tecnología	-3	-2	-1	1	2	3	
Flash	0	1	7	12	5	0	25
No Flash	1	2	10	10	4	2	29
New	0	1	1	1	0	0	3
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>57</b>
Factor Energía							
Tecnología	-3	-2	-1	1	2	3	
Flash	1	1	5	11	2	5	25
No Flash	3	1	8	7	8	2	29
New	0	1	0	2	0	0	3
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>57</b>
Factor Mano de obra							
Escala	-3	-2	-1	1	2	3	
1	1	4	12	10	2	0	29
2	0	0	4	5	6	1	16
3	0	0	3	7	1	1	12
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>57</b>
Factor Energía							
Escala	-3	-2	-1	1	2	3	
1	2	2	9	10	4	2	29
2	1	1	4	5	3	2	16
3	1	0	0	5	3	3	12
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>57</b>
Factor eficiencia							
-3	Bajo la clase más inferior						
-2	Bajo la clase inferior						
-1	Bajo su clase						
1	Sobre su clase						
2	Sobre la clase superior						
3	Sobre la clase más superior						
Escala							
1	0-900 kt						
2	900-1500 kt						
3	Sobre 1500 kt						

### 7.2.1 Factor naturaleza tecnológica

Del total de fundiciones, el 59% se encuentra utilizando el recurso de mano de obra sobre el promedio de su clase, además el 19% de las fundiciones alcanza una productividad sobre el promedio de otra clase superior.

Para el uso de la energía, 65% de las fundiciones supera el promedio de eficiencia de su clase, además 30% de las fundiciones alcanza una productividad sobre el promedio de otra clase superior.

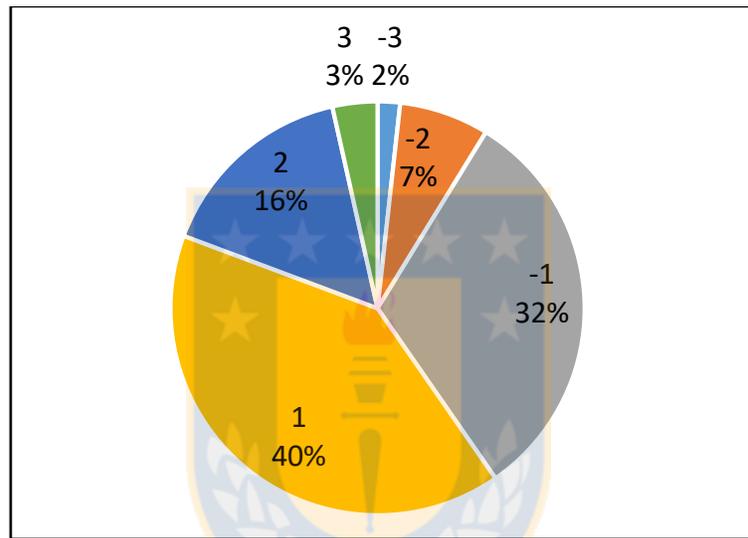


Figura 7.4 Gráfico de Utilización Mano de Obra Total Fundiciones

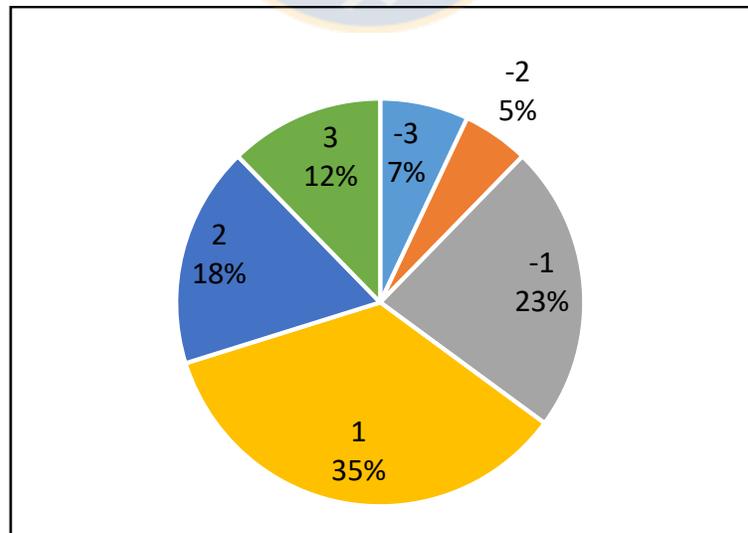


Figura 7.5 Gráfico Utilización Energía Total Fundiciones

Realizando una comparación entre la tecnología flash, no flash y emergentes, las fundiciones con tecnología flash superan en eficiencia de mano de obra a las fundiciones con tecnología emergentes y no flash, figuras 7.7, 7,6 y 7,8. El 68% de las fundiciones flash, se encuentran sobre el promedio de eficiencia de su clase. El 55% de las fundiciones no flash están sobre el promedio de eficiencia de su clase y tan solo el 33% las fundiciones emergentes esta sobre el promedio de eficiencia de su clase.

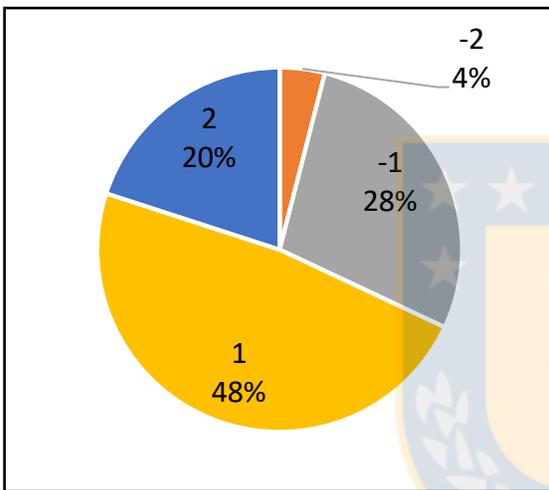


Figura 7.6 Utilización mano de obra tecnología flash

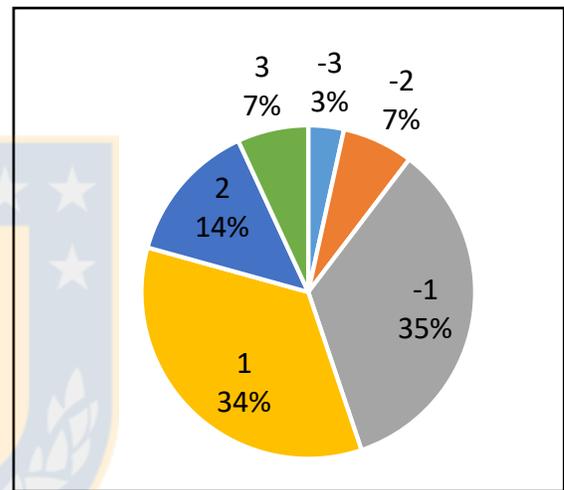


Figura 7.7 Utilización mano de obra tecnología no flash

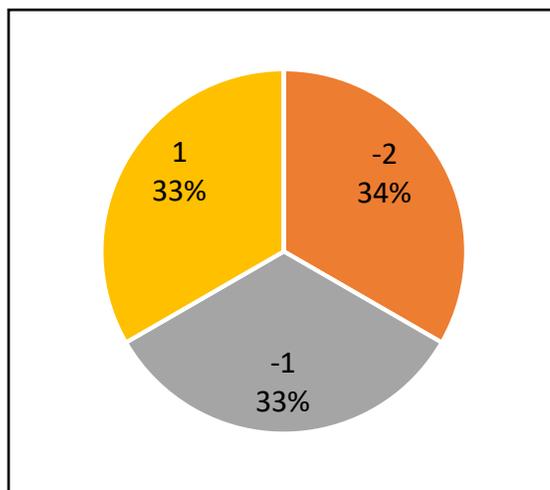


Figura 7.8 Utilización mano de obra tecnología emergente

Para el uso de la energía, figuras 7.9, 7.10 y 7.11. Un 72% de las fundiciones flash supera la media de eficiencia de energía de su clase, mostrándose superior a las demás tecnologías. El 67% de las fundiciones emergentes se encuentran sobre el promedio de su clase. Para las fundiciones no flash, apenas el 59% se encuentra sobre el promedio de eficiencia de su clase.

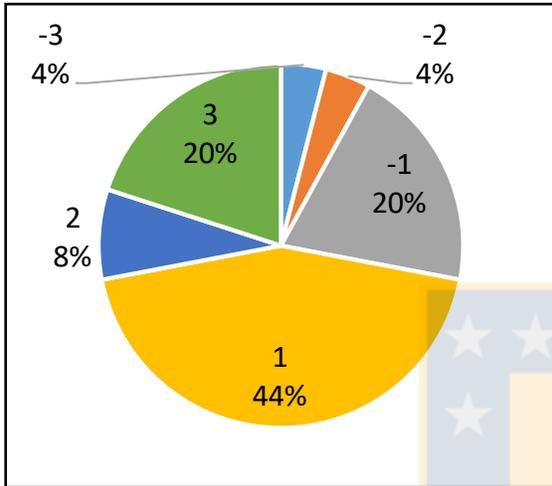


Figura 7.10 Utilización Energía tecnología flash

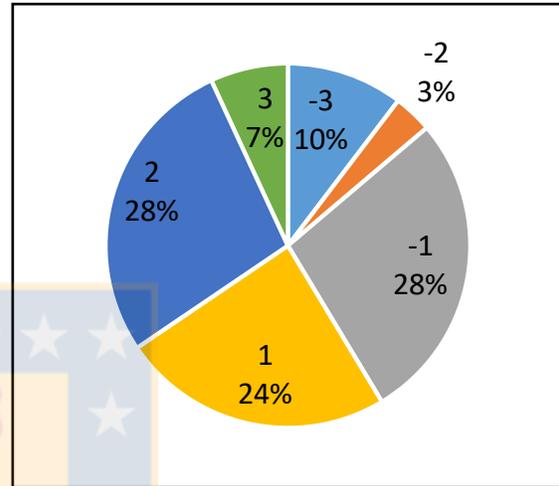


Figura 7.9 Utilización Energía tecnología no flash

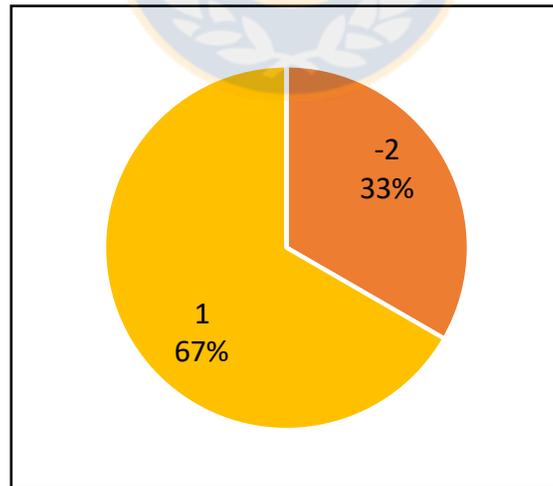


Figura 7.11 Utilización Energía tecnología emergentes

### 7.2.2 Factor nivel de producción

Sólo 42% de las fundiciones de baja producción supera la media de eficiencia de mano de obra de la clase a la cual corresponde. El 81% de las de tamaño medio se ubican sobre el promedio de eficiencia de su clase. El 75% de las fundiciones de tamaño grande están sobre la media de productividad de la mano de obra.

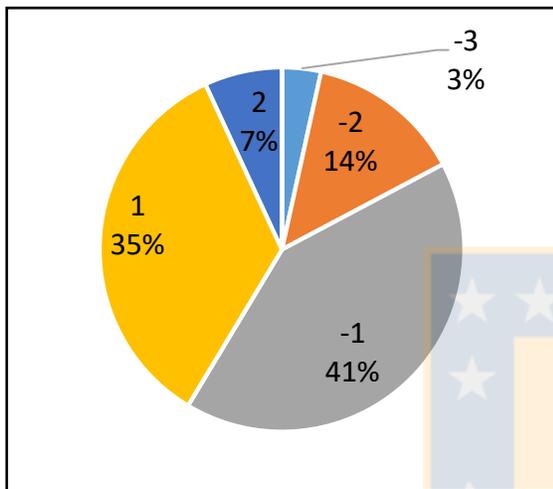


Figura 7.12 Utilización mano de obra producción baja

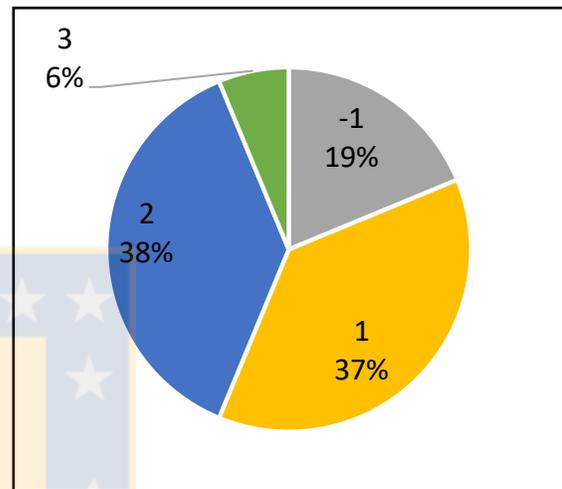


Figura 7.14 Utilización mano de obra producción media

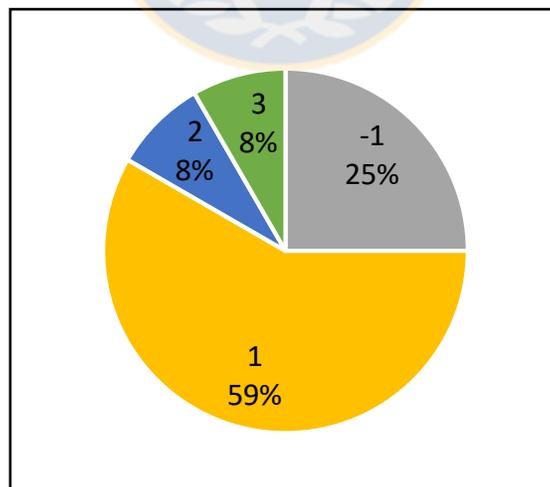


Figura 7.13 Utilización mano de obra producción alta

Para el uso de la energía, un 55% de las fundiciones de baja producción supera la media de eficiencia de energía de su clase. Para las fundiciones de media producción el 63% se encuentra sobre la eficiencia de energía de su clase. Por otro lado, para las fundiciones de gran producción el 92% de estas se ubica sobre el promedio de eficiencia de su clase.

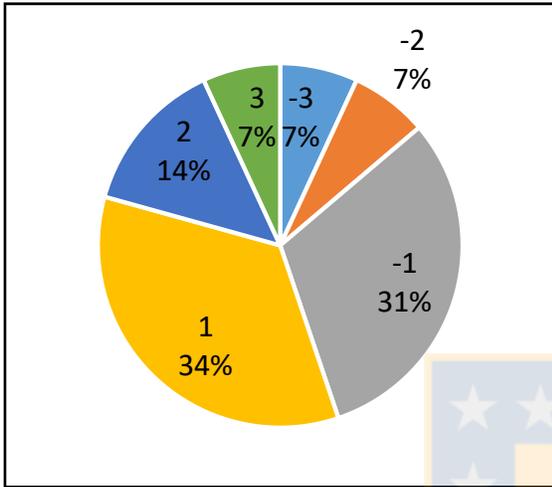


Figura 7.16 Utilización energía producción baja

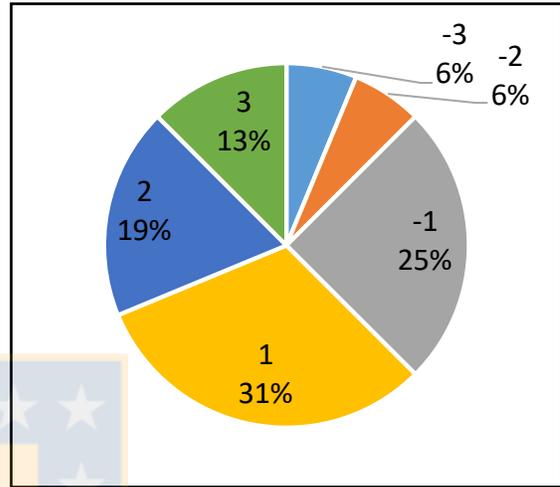


Figura 7.15 Utilización energía producción media

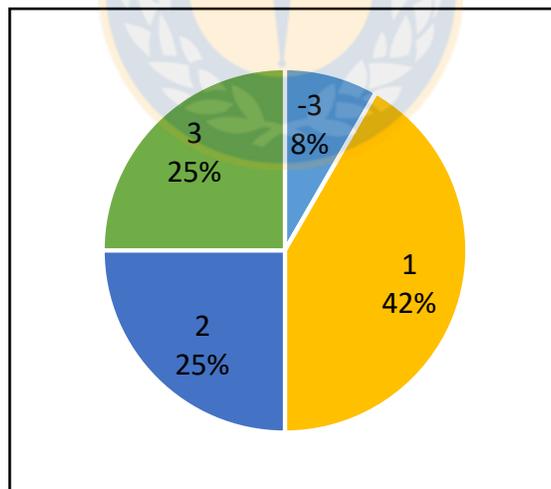


Figura 7.17 Utilización energía producción alta

### 7.3 Discusiones

Del análisis realizado en relación con las productividades de mano de obra y energía, la escala de producción de gran tamaño y el uso de la tecnología flash obtienen en promedio los porcentajes de eficiencia más altos. Comparando estos resultados de productividad con el análisis de costos operacionales, se sostiene que la escala de producción de gran tamaño y la tecnología flash son factores claves de competitividad. La tecnología flash supera en eficiencia a las tecnologías emergentes, pero no representan los costos operacionales más bajos. Cabe destacar que el análisis de las fundiciones emergentes está sesgado por solo tres instalaciones las cuales se encuentran en China. Este es un factor relevante por el cual obtienen los costos operacionales más bajos. Además, casi la mitad de las fundiciones flash se encuentran en el cuadrante de costos operacionales más baratos posicionándose como un factor relevante.

Por lo tanto, se puede concluir que la tecnología flash y la escala de producción alta son factores claves de competitividad en relación a la disminución de costos operacionales. Sin embargo, antes de validar este juicio, es necesario hacer un último análisis, respecto a si estos dos factores son independientes entre ellos, uno es consecuencia del otro, o bien actúan en simultáneo.

Para que se afirme que existe una relación directa entre nivel de producción, la tecnología de fusión y los costos operacionales, se debe verificar a lo menos, correlaciones de proporcionalidad directa entre los factores de productividad y precios de los insumos de mano de obra y energía, con el nivel de producción y las tecnologías de fusión.

La figura 7.18 muestra que no existe una clara correlación entre el nivel de producción y la productividad o eficiencia de mano de obra para las tecnologías flash. Hasta las 1.250 kton concentrado/año se observa una leve linealidad, pero por sobre esta escala de procesamiento la correlación no es clara.

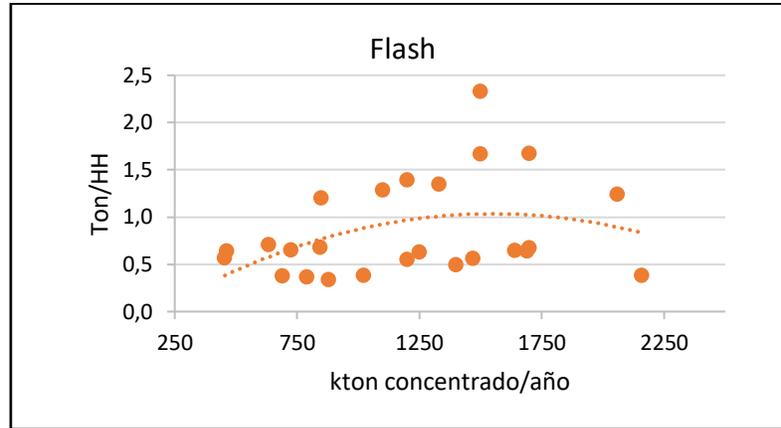


Figura 7.18 Relación escala producción-Eficiencia mano de obra. Tecnología Flash

La figura 7.19 muestra que no existe una clara relación entre la señal del precio de la mano de obra (salario) y su productividad o eficiencia con que se utiliza para las tecnologías flash. Más bien, la eficiencia de mano de obra se ve indiferente al costo de la mano de obra.

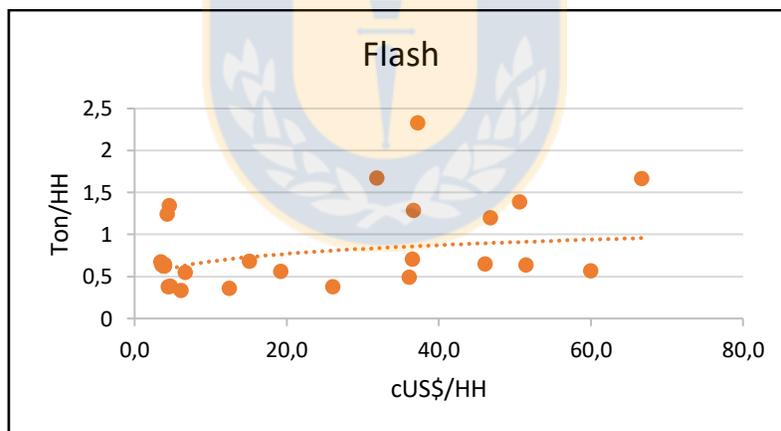


Figura 7.19 Relación precio mano de obra-Eficiencia mano de obra. Tecnología Flash

En relación a la eficiencia energética, en la figura 7.20 se observa una leve correlación entre el nivel de producción y la productividad de energía para las tecnologías flash. Cabe destacar que todas las fundiciones sobre las 1.250 kton concentrado/año de procesamiento se encuentran bordeando el promedio de eficiencia energética ( $4^{-4}$  ton/MJ) o por sobre esta.

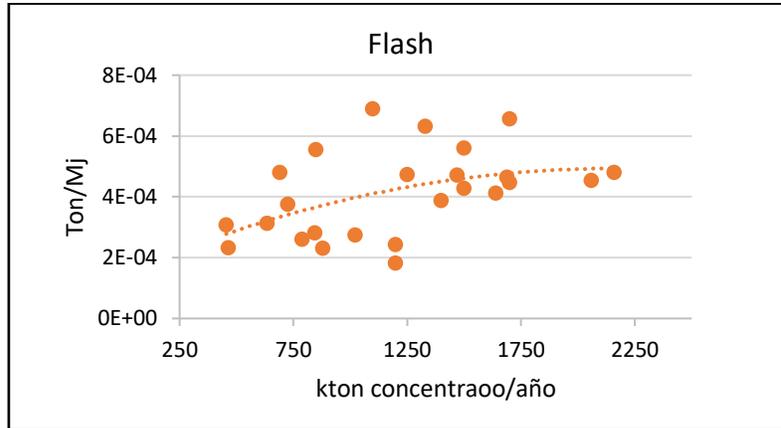


Figura 7.20 Relación escala producción-Eficiencia energética. Tecnología Flash

En relación a la eficiencia energética, no se observa una correlación entre la eficiencia energética y el precio de la energía para la tecnología flash. Hasta 1,5 cUS\$/MJ se puede inferir que existe una relación directa entre precio y eficiencia, pero las 3 instalaciones sobre este precio derriban todo indicio.

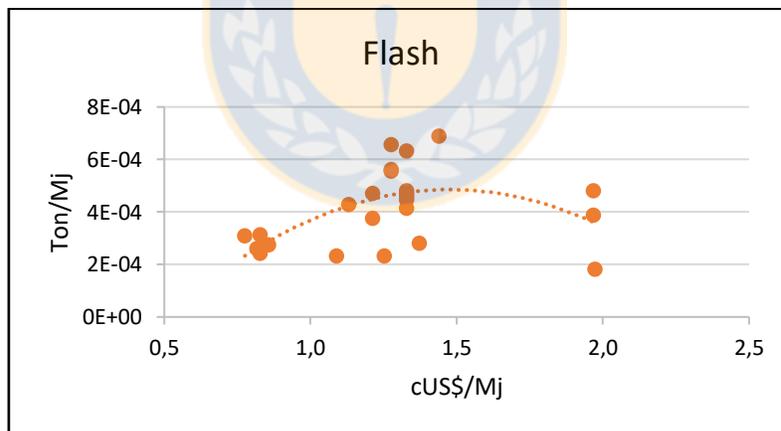


Figura 7.21 Relación precio energía-Eficiencia energética. Tecnología no Flash

A partir de los antecedentes discutidos anteriormente, se concluye que la escala de producción y el precio de la mano de obra no tienen una clara incidencia sobre la eficiencia de mano de obra. Para la eficiencia de energía, el caso no es muy distinto. El precio de la energía no indica alguna relación directa con la eficiencia, al contrario de la escala de producción que se observa una leve linealidad.

Adicionalmente las instalaciones que pertenecen al grupo de mayor escala de producción tienen una alta correlación con el uso de la tecnología flash, ya que 8 de las 13 fundiciones operan con esta tecnología. Además 7 instalaciones se encuentran en China, donde los insumos de mano de obra son más bajos.

Tabla 7.7 Clasificación de pertenencia según grupos de fundiciones

		<b>Costos Operacionales cUS\$/lb Cu</b>	<b>Segmento más barato mano de obra (%)</b>	<b>Segmento más barato energía (%)</b>
<b>Tecnología</b>	Flash	19,3	32	52
	No Flash	22,9	24	38
	Emergentes	9,3	100	0
<b>Tamaño</b>	Bajo	22,5	25	57
	Medio	23,2	20	38
	Alto	13,9	62	23
<b>Integración</b>	Integrada	25,4	18	45
	No integrada	17,6	40	40

Fuente: Elaboración propia mediante base de datos

En su contexto general, utilizar el factor nivel de producción para bajar el costo operacional no representa claramente una variable de peso. Y sólo se observa una leve tendencia de economía de escalas desde los niveles de procesamiento bajo las 1.250 kton de concentrado/año.

Con respecto a la tecnología, existe una clara diferenciación competitiva en relación con la productividad entre las tecnologías de fusión flash versus el resto de las tecnologías. Las tecnologías flash dotan a la fundición de una ventaja en eficiencia tecnológica y estándares ambientales superiores, fortaleciendo su competitividad. Adicionalmente, al analizar el contexto global de las fundiciones, se observa que la estrategia de disminución de costos operacionales, esta potencialmente favorecida a fundiciones que se encuentran operando en regiones de bajo precio de energía y mano de obra. Es por esto que las fundiciones emergentes desarrolladas por China tienen los costos operacionales más bajos.

## 8. Conclusiones y Recomendaciones

### 8.1 Conclusiones

Se concluye, como hallazgo principal de este estudio, que los factores tecnología de fusión y nivel de producción no constituyen en sí mismo elementos contundentes de reducción del costo operacional. Por lo tanto, no se puede identificar una estrategia competitiva clara del negocio de la fundición con el fin de reducir los costos operacionales basados en tecnologías de fusión y escala de procesamiento. El factor primario para obtener una ventaja competitiva en el costo operacional está fuertemente asociado a la ubicación geográfica donde operen los precios de energía y mano de obra más barata. El gobierno de China tiene gran responsabilidad de que esto ocurra, gracias a su política país de revitalizar industrias estratégicas basadas en materias primas, proporcione incentivos fiscales (subvenciones) y no fiscales (I+D) a las compañías estatales nacionales, nacionales y extranjeras, con el fin de promover el desarrollo del país. Es por esto que las fundiciones chinas que operan con bajos costos de mano de obra y energía se ven favorecidas competitivamente con el resto de las fundiciones del mundo. A grandes rasgos, el uso de una tecnología con mayor eficiencia energética y mano de obra, como los reactores Flash y una escala de procesamiento sobre los 1,5 millones de toneladas de concentrados, tienen algún grado de influencia en disminuir costos operacionales, pero debe estar acompañado de una gestión y política país que permita fortalecer estas variables.

## 8.2 Recomendaciones

En primer lugar, se debe recopilar una mayor información sobre las fundiciones chinas debido al escaso conocimiento sobre las tecnologías de fusión emergentes, ya que, con solo 3 fundiciones en este estudio no se puede generar una completa y detallada percepción acerca de esta tecnología. Cabe destacar que este tipo de reactores ha tomado protagonismo en el último tiempo debido su gran desarrollo en eficiencia energética, lo que permitiría un mayor control del proceso.

Competir con los precios de mano de obra y energía chinos resulta casi imposible viendo el contexto global, parece más sensato a simple vista aumentar la creación de valor en la instalación con el fin de focalizar una estrategia de negocio que permita generar mayores créditos a la fundición producto de venta de subproductos. Una variable clave en este sentido es la recuperación metalúrgica y recuperación de metales preciosos. Hoy en día existen fundiciones chinas que recuperan hasta 16 metales desde los concentrados, en contraste a la mayoría de las fundiciones chilenas que solo se basan en el negocio del cobre. Al mismo tiempo se plantea que el 20% de la utilidad de una fundición de cobre china proviene de la recuperación de otros metales.

Además, se recomienda hacer un análisis detallado con respecto de la integración de la fundición al complejo minero. Como se describió en este estudio, la tendencia ha sido separar ambos negocios obteniendo una disminución de costos operacionales. Pero se debe ratificar esta señal ya que la mayoría de las fundiciones que entraron en operación en el último tiempo corresponden a instalaciones chinas, y la mayoría se encuentra desacoplada a la mina.

El autor plantea ampliar la gama de factores clave a estudiar, y profundizar en estas realizando un análisis multivariable con el propósito de identificar las variables con mayor peso específico y definir una estrategia de negocio contundente y verídica basada en estos resultados.

### 9. Anexos

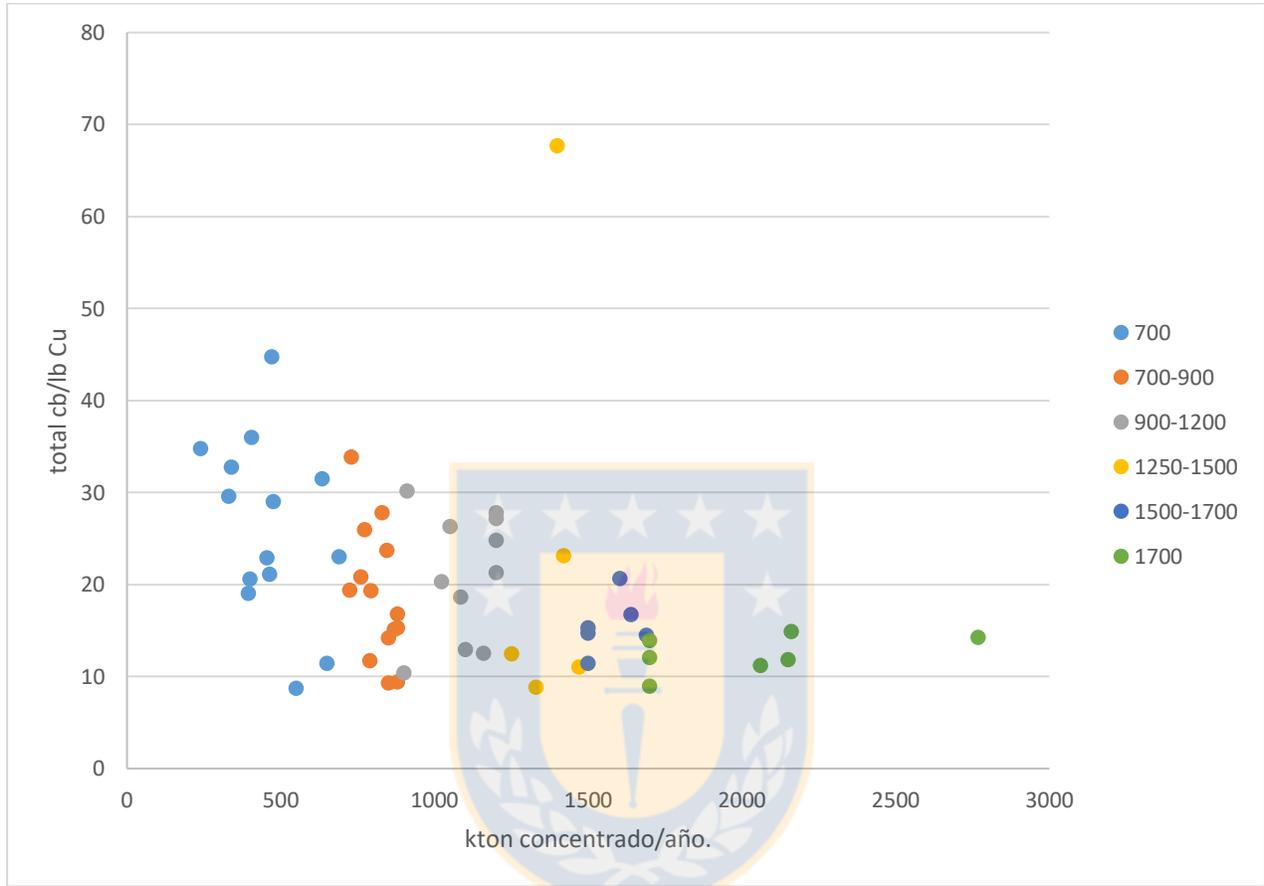


Figura 9.1 Relación escala de procesamiento-costo operacional

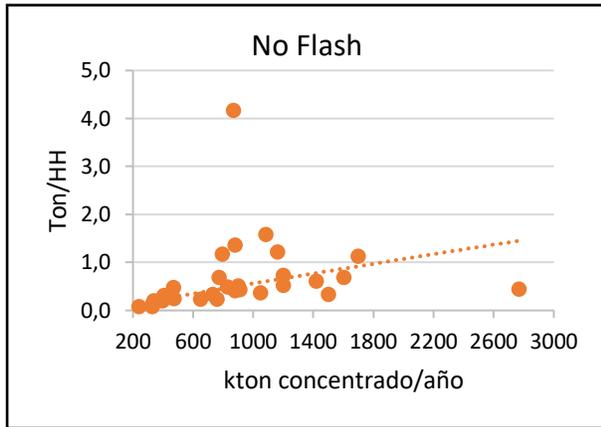


Figura 9.2 Relación escala procesamiento-eficiencia mano de obra. Tecnología no flash

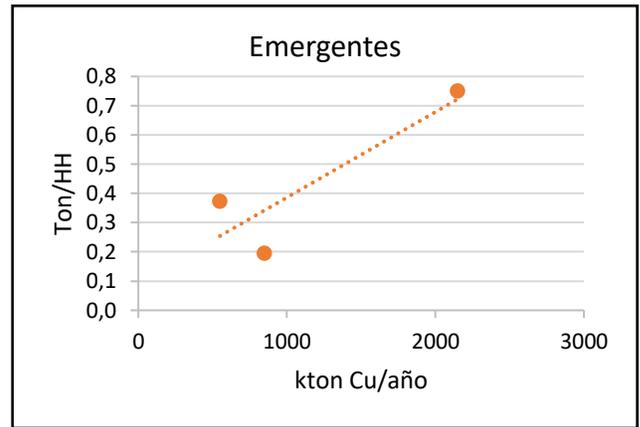


Figura 9.3 Relación escala procesamiento-eficiencia mano de obra. Tecnología emergente

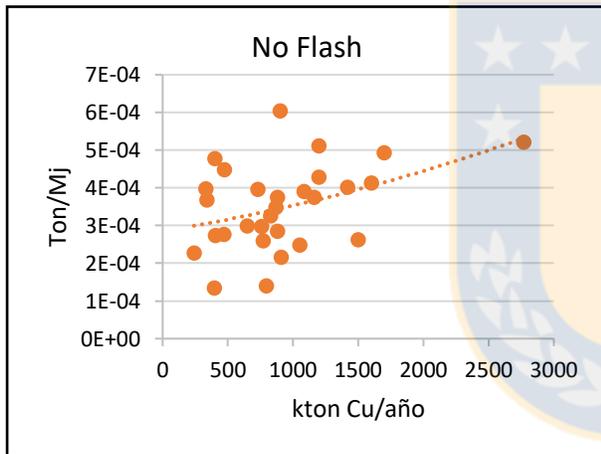


Figura 9.5 Relación escala procesamiento-eficiencia energética. Tecnología no flash

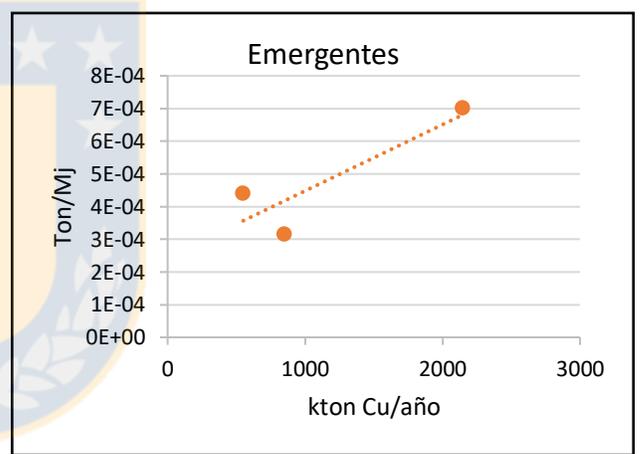


Figura 9.4 Relación escala procesamiento-eficiencia energética. Tecnología emergentes

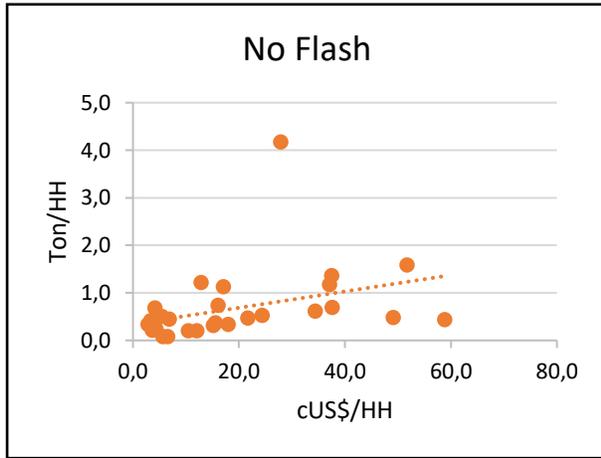


Figura 9.8 Relación precio mano de obra-eficiencia mano de obra. Tecnología no flash

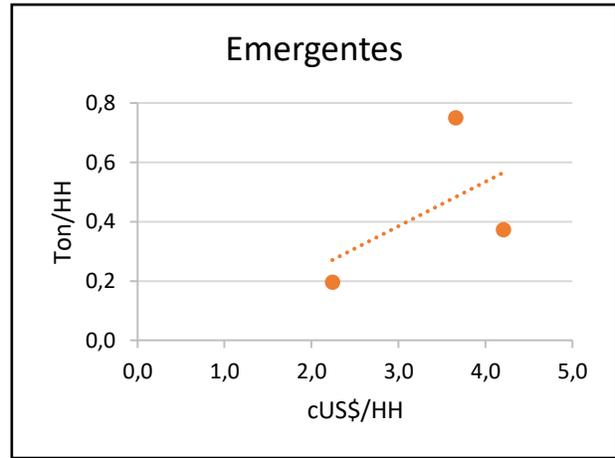


Figura 9.7 Relación precio mano de obra-eficiencia mano de obra. Tecnología emergentes

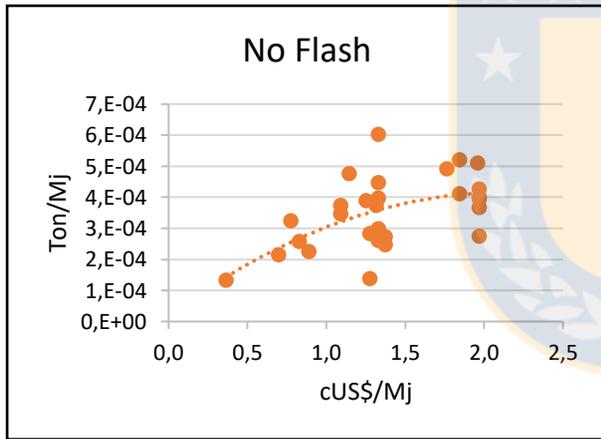


Figura 9.9 Relación precio energía-eficiencia energética. Tecnología no flash

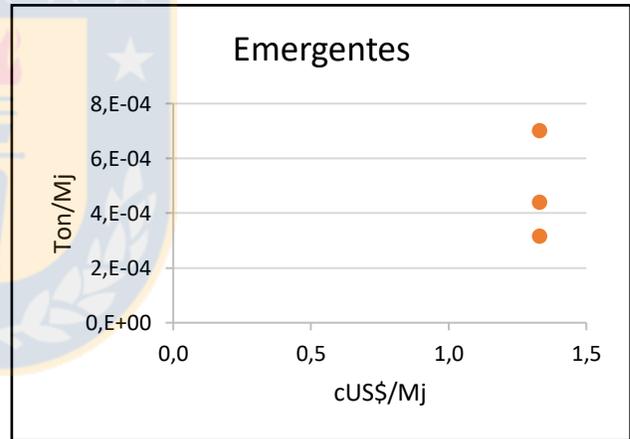


Figura 9.6 Relación precio energía-eficiencia energética. Tecnología emergentes

## 10. Bibliografía

- [1]. Aikaterini Boulamanti, Jose Antonio Moya. April 2016. Production costs of the non-ferrous metals in the EU and other countries: Copper and zinc. Resources Policy
- [2]. Wojciech Kędzia. Sustainability and profitability in the smelting and refining sector. 24th International Copper Conference Istanbul, March 10th, 2011
- [3]. (1) A. Burrows, (1) G.R.F. Alvear Flores, (2) P.J. Mackey, (3) Biplop Das, (4) E. Herrera, 2016. ISASMELT – Fundir más con menos. (1) Glencore Technology, (2) P.J. Mackey Technology Inc. (2) Montreal, QC, Canadá. (3) Sesa Sterlite Ltd., Tuticorin Smelter, Madurai Bypass Road, Tuticorin, Tamil Nadu, India. (4) Southern Copper Corporation Fundición Ilo, Punta Tablonas S/N, Pacocha, Ilo, Moquegua, Perú.
- [4]. Soledad Cabrera. Ph.D. Rodrigo Navia, 2012. Informe actualidad económica. Pontificia Universidad Católica de Valparaiso.
- [5]. Manuel J. Donoso Muñoz. El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 21 N° 2, 2013, pp. 248-261
- [6]. Negocio Fundición – Refinería. 2015. Angloamerican
- [7]. News Release. Mount Isa, 27 April 2018. Mount Isa Mines Copper Smelter rebrick completed.
- [8]. News Release. 2017. OPERATIONAL REVIEW FOR THE YEAR ENDED 30 JUNE 2017. BHP.
- [9]. R.N. Khare. 1960. The Copper Smelter At Ghatsila. Indian Copper Corporation Ltd. Ghatsila.
- [10]. Benjamin Martinich B. Una mirada al negocio de fundiciones en Chile. 2016. Fundición Chagres. Angloamerican.
- [11]. The Development & Selection of Copper Smelting Technology in China. Nerin. Tang Bin Apr.2018
- [12]. Li Yusheng. The Status Quo and Forecast for China Copper Industry. China Nonferrous Metals Forum 13th Oct. 2015.
- [13]. China Copper Monthly. Dec. 22, 2016| Issue Nov.|No.68| Published by SMM.
- [14]. Erich Schnake Walker. Mercado del cobre. 28 Sept 2017. Ministerio de Minería.

- [15]. Decreto N°28 El dilema de las Fundiciones. N° 1293 / SEPTIEMBRE 2015 / Isnn 0378-0961. Boletín minero.
- [16]. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1998-2017. COCHILCO.
- [17]. China, desarrollo económico y consumo de cobre. Diciembre 2008. COCHILCO.
- [18]. Cifras actualizadas de la minería. Marzo 2018. Consejo Minero.
- [19]. Francisco Costabal M. Fundiciones de Cobre en Chile. SONAMI, Santiago, 10 de junio de 2015.
- [20]. Estudio Benchmarking Gestión Minera Internacional. Septiembre 2015. ENCARE.
- [21]. Tecnologías en fundiciones de cobre 8/2015. Ministerio de Minería
- [22]. Statistical Yearbook (2007-2016). ICSG 2017.
- [23]. Directory of Copper Mines and Plants up to 2020. ICSG, July 2017.
- [24]. Directory of Copper Mines and Plants up to 2021. ICSG, Mar 2018.
- [25]. Cristian Cifuentes G. Mercado de concentrados: Situación mundial y mirada nacional. 3° Seminario FUNDICIÓN –REFINERÍA –EXPOMIN 2018. COCHILCO.
- [26]. David Coombs. Growth Opportunities and Challenges for the Chilean Copper Mining Industry. COCHILCO Seminar – Mining in the Bicentennial: The Road Ahead Bicentennial Mining Week, Antofagasta 29th September 2010
- [27]. Wood Mackenzie Smelters 2010, 2015.
- [28]. Brook Hunt Smelters 2006, 2007.
- [29]. Global copper smelter supply summary. Wood Mackenzie 2016.
- [30]. A.K. Biswas W.G. Davenport. 1994. Extractive Metallurgy of Copper. Pergamon.
- [31]. Mario Sánchez. Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre. 1<sup>er</sup> Workshop Internacional. Abril 2010. Santiago. Chile.
- [32]. Gabriel Riveros. 26 de Agosto de 2010 FUNDAMENTOS DE METALURGIA EXTRACTIVA. MI4100-Pirometalurgia. Universidad de Chile. Departamento Ingeniería de Minas.
- [33]. Gabriel Riveros. Otoño 2009. Curso MI51A Pirometalurgia. Universidad de Chile. Departamento Ingeniería de Minas