



# Tecnologías en fundiciones de cobre

---

DE 8/2015

## Resumen

La industria metalúrgica del cobre en Chile ha alcanzado una relevancia internacional al poseer 7 fundiciones y cerca del 9% de la capacidad de producción de cobre al año 2014. Sin embargo, esta posición se ha visto contantemente deteriorada por el crecimiento que han experimentado las fundiciones en China, que han sido desarrolladas debido al mayor énfasis tecnológico y de eficiencia que se le ha dado al negocio de procesamiento de concentrados de cobre en el país asiático.

En términos de desarrollo tecnológico, los hornos de fusión en baño mediante tecnología de soplado inferior y lateral se han convertido en los elementos más destacables de los últimos años. Junto a éstos, las nuevas tecnologías de conversión se han enfocado en lograr procesos continuos, como lo muestran los hornos chinos y de lecho empacado.

A nivel de capacidades y costos, la tabla muestra las principales referencias según las distintas tecnologías existentes:

**Tabla 1 Principales estadísticas de tecnologías de fusión de concentrados de cobre. Fuente: elaboración propia en base a Wood Mackenzie**

| Tecnología | Costo promedio [US\$/TMS] | Participación en producción mundial (%) | Cantidad de operaciones catastradas |
|------------|---------------------------|---|-------------------------------------|
| Flash      | 72                        | 43%                                     | 22                                  |
| Baño       | 74                        | 34%                                     | 23                                  |
| Mixto      | 113                       | 20%                                     | 7                                   |
| Otros      | 151                       | 3%                                      | 3                                   |

Si bien en términos promedios las tecnologías flash y de baño poseen costos similares, las operaciones en baño presentan una mayor dispersión, explicada por las variantes existentes, en donde las tecnologías tipo Teniente – Noranda se ubican en las posiciones menos privilegiadas.

La distinción de costos por cuartiles permite distinguir los elementos comunes para las fundiciones menos competitivas, donde se destaca el hecho de que aquellas fundiciones integradas al proceso de extracción mantienen una posición menos favorables que las que operan de manera independiente.

La situación anterior marca un desafío para la industria metalúrgica chilena, para invertir en mejorar sus procesos para alcanzar niveles competitivos en términos tecnológicos, pero también para innovar en la gestión de estos activos y alcanzar rentabilidades para sus propietarios.



## Abstract

Chilean copper metallurgical industry has reach an international relevance having seven smelters and almost 9% of anode production in 2014. However, this position has been constantly damaged by the rising of chinese smelter, justified by their focus on technological innovation and efficiency on bussiness of copper concentrates treatment.

In terms of technological development, bottom and side blowing bath smelting furnaces have become most noteworthy elements of last years. Also, new technologies in conversion have been emphasizing in continuous process, as shown by chinese continuous converting and packed bed converting in Chile.

Costs and capacities are listed in next table, referring to major existing smelting technologies:

**Table 1 Main statistics of smelting technologies in copper concentrates. Source: own elaboration based on Wood Mackenzie data.**

| Technology | Average cash cost [US\$/TMS] | World production participation (%) | Number of operations in cadastre |
|------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Flash      | 72                           | 43%                                | 22                               |
| Bath       | 74                           | 34%                                | 23                               |
| Mixed      | 113                          | 20%                                | 7                                |
| Other      | 151                          | 3%                                 | 3                                |

Even that avarage costs of flash and bath technologies are similar, bath smelting operations show greater variability than flash smelters. This could be explained by the major number of bath technologies and the case of Teniente – Noranda process reaching last levels of cost curve.

Cost distinction on quartiles allows to distinguish common elements for less competitive smelters, highlighting integrated smelting units, which has constantly greater costs than those that are not part of mineral extraction.

Previous situation must be taking into account by copper metallurgical industry in Chile, to invest in optimize their smelters to reach competitive levels, not onyl in terms of technology, but also to innovate in management to get profitable actives to their owners.



## Contenido

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducción.....   | 1  |
| 2     | Procesos en una fundición de concentrados de cobre .....              | 1  |
| 2.1   | Descripción general del proceso.....                                  | 1  |
| 2.2   | Tecnologías de fusión – conversión .....                              | 4  |
| 2.2.1 | <i>Fusión</i> .....   | 5  |
| 2.2.2 | <i>Conversión discontinua</i> .....                                   | 5  |
| 2.2.3 | <i>Conversión continua</i> .....                                      | 6  |
| 2.3   | Desarrollos tecnológicos.....   | 6  |
| 2.3.1 | <i>Tecnologías de fusión - conversión</i> .....                       | 6  |
| 2.3.2 | <i>Fusión de concentrados complejos</i> .....                         | 9  |
| 3     | Tecnología de fundiciones en Chile y el mundo .....                   | 12 |
| 3.1   | Análisis geográfico y temporal.....                                   | 12 |
| 3.2   | Análisis de costos .....  | 16 |
| 4     | Comentarios y discusiones .....                                       | 20 |
| 5     | Referencias .....   | 21 |
| 6     | Anexos.....   | 22 |
| 6.1   | Cargos referenciales por contenido de impurezas en concentrados ..... | 22 |



## 1 Introducción

En la industria del cobre convergen distintos procesos productivos que permiten la concentración y separación del metal contenido en el mineral. Bajo este concepto se destaca el proceso de beneficio para los minerales sulfurados de cobre, que representan más de dos tercios de la producción chilena y casi un 80% de la producción mundial de cobre de mina<sup>1</sup>. Los minerales extraídos desde la mina pasan por procesos de conminución y flotación para generar el concentrado de cobre, cuyo destino se encuentra en las fundiciones de cobre, que permite la obtención del metal a través de procesos pirometalúrgicos.

En lo que respecta a producción de cobre vía fundición, Chile alcanza cerca del 9% de la producción mundial, lo cual muestra las oportunidades de desarrollo considerando la disponibilidad de concentrado que se produce en el país. Dado lo anterior, el presente estudio consistirá en una revisión del estado de la pirometalurgia del cobre, sobre las distintas técnicas existentes para la fusión y conversión de concentrados de cobre, los nuevos desarrollos tecnológicos propuestos, las características de las fundiciones presentes en Chile y un análisis comparativo entre las distintas tecnologías de fusión presentes a nivel mundial.

## 2 Procesos en una fundición de concentrados de cobre

La fundición de concentrados de cobre se basa en lograr una mayor concentración de cobre a través de transformaciones químicas de los minerales sulfurados de cobre. Un hecho fundamental del proceso es la capacidad de autogeneración de energía por medio de las reacciones exotérmicas que ocurren en las etapas del proceso y la mayor o menor posibilidad de generar un proceso continuo, es decir, sin interrupciones de las operaciones unitarias.

Para describir el proceso que ocurre en las fundiciones de concentrados de cobre, se distinguirá en primer lugar las distintas operaciones unitarias que se realizan y luego las distintas tecnologías que se adecúan en cada uno.

### 2.1 Descripción general del proceso

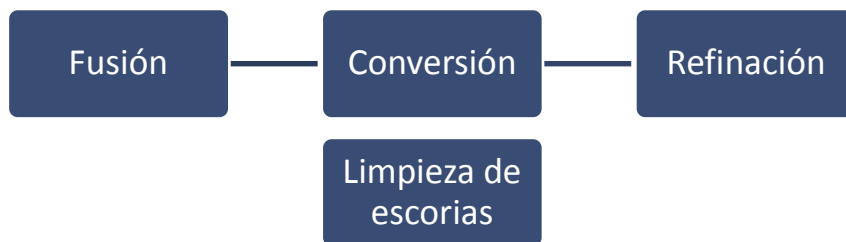
En una fundición de cobre es posible distinguir cuatro procesos principales. Éstos corresponden a: el secado, la fusión, la conversión, la refinación y la limpieza de escorias. Cada una de estas etapas cuenta con objetivos, tecnologías y reacciones diferentes, que

---

<sup>1</sup> Fuente: COCHILCO y WoodMac (2013).



aportan al proceso de beneficio del cobre sulfurado. Entre otras actividades relevantes del proceso se destacan el secado de concentrados húmedos, la captación de gases y la planta de ácido, el proceso de moldeo de ánodos y en algunos casos la tostación y generación de calcina.



**Figura 1 Esquema de procesos principales en fundiciones de concentrados de cobre. Fuente: elaboración propia.**

La etapa de fusión corresponde a la primera que involucra una concentración en el contenido de cobre en los productos. En este caso, el concentrado (con entre 25 – 30% de cobre) ingresa a los hornos de fusión a cerca de 1.200°C, lo que permite la descomposición inicial en gases, escoria de óxidos de hierro y mata, eje o metal blanco con un contenido superior de cobre (entre 50% y 75%):



**Figura 2 Esquema de insumos y productos del proceso de fusión de concentrados de cobre. Fuente: elaboración propia.**

La separación entre la escoria y la mata se realiza aprovechando la diferencia de densidades entre éstos productos, siendo la escoria más ligera mientras no se genere una mayor proporción de magnetita ( $Fe_3O_4$ ), la cual aumenta la densidad de la escoria y aumenta la pérdida de cobre por arrastre.

Con el objetivo de eliminar los residuos de hierro, azufre y otras impurezas de la mata de cobre, el proceso de conversión se realiza a través de dos etapas: soplado de escoria y soplado a cobre.



Durante el soplado de escoria, se oxidan los sulfuros de hierro (FeS), generando escoria ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4 - \text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). El proceso se mantiene hasta alcanzar menos de un 1% de FeS contenido en la mata.

El soplado a cobre libera el cobre contenido en el sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) mediante la reacción con oxígeno, formando dióxido de azufre y cobre metálico:



**Figura 3 Esquema de insumos y productos del proceso de conversión de mata de cobre.**  
 Fuente: elaboración propia.

Considerando que el cobre blíster aun contiene fracciones de oxígeno y azufre que deben eliminarse para evitar la generación de ampollas de  $\text{SO}_2$  en el ánodo, el proceso de refinación busca generar un producto según estándares de calidad química, física y mecánica. La primera parte de la refinación comienza con un proceso de oxidación, la cual elimina azufre, hierro y otras impurezas metálicas por medio de la reacción del oxígeno y posterior gasificación del azufre ( $\text{SO}_2$ ) o escorificación en el caso de otras impurezas metálicas.

Dado el intensivo uso de oxígeno del proceso anterior, aumenta el oxígeno disuelto en el cobre, por lo cual se realiza una fase de reducción de oxígeno. Los agentes reductores corresponden a hidrocarburos sólidos, líquidos o gaseosos, que aportan carbono o hidrógeno para reducir al oxígeno, mediante la formación de dióxido de carbono o vapor de agua:





**Figura 4 Esquema de insumos y productos del proceso de refinación de cobre blíster. Fuente: elaboración propia.**

Como se aprecia de los procesos de fusión y conversión, cada etapa genera entre sus productos distintos tipos de escoria, la cual al estar en contacto con los productos de cobre produce un cierto porcentaje de pérdidas por inclusión o cobre disuelto en la escoria. Para maximizar la recuperación de las especies valiosas se realiza un tratamiento de estas escorias a través de un procedimiento de limpieza.

La limpieza de escorias se puede realizar a través de distintas alternativas, destacando la vía metalúrgica (chancado, moliendo y flotación de escorias), hidrometalúrgico (conminución y lixiviación) y pirometalúrgico mediante hornos de reducción.

En el caso del proceso pirometalúrgico, la reducción se realiza generalmente utilizando carbón el cual reacciona con el oxígeno de la escoria, reduciendo la proporción de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), liberando al cobre oxidado y permitiendo separar el cobre contenido por las diferencias de densidad:



**Figura 5 Esquema de insumos y productos del proceso de limpieza de escorias. Fuente: elaboración propia.**

## 2.2 Tecnologías de fusión – conversión

Dentro de las etapas de la pirometalurgia del cobre, la fusión y conversión son aquellas que han mostrado mayor actividad en el desarrollo tecnológico. La tendencia en las tecnologías es a permitir procesos continuos, mayores tasas de reacción, menores pérdidas de cobre y un adecuado control de los gases producidos.





### 2.2.1 Fusión

Para el caso de la fusión, las distintas tecnologías se clasificaron según la ocurrencia del proceso, que puede ser por: 1. Calentamiento directo; 2. Suspensión en torre de reacción (Flash); o 3. Inyección en baño líquido.

#### Fusión por calentamiento directo

El representante de los hornos de fusión por calentamiento directo corresponde al horno de reverbero, el cual tenía como principal justificación en su uso el bajo costo del petróleo en la primera mitad del siglo veinte (Riveros 2009). Aquí, el calor necesario para el proceso de fusión se da por la combustión de hidrocarburos. Esta tecnología presenta deficiencias por su ineficiencia térmica y el bajo contenido de dióxido de azufre en los gases, por lo cual su uso se da en muy pocos casos a nivel mundial.

#### Fusión en baño

En segundo lugar se encuentran las tecnologías basadas en el principio de fusión en baño, que aprovechan la energía producto de las reacciones de oxidación que ocurren dentro del reactor. El origen de este tipo de procesos se da en la década de los 60 por la empresa Noranda en Canadá.

Los reactores de fusión en baño de mayor relevancia por su uso a nivel mundial corresponden a la tecnología Teniente, Noranda, Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi.

#### Fusión por inyección en baño líquido (Flash)

El último caso de procesos de fusión de concentrados de cobre corresponde a la tecnología Flash. 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. Las principales tecnologías se dan en las versiones de Outotec (ex – Outokumpu) e INCO.

### 2.2.2 Conversión discontinua

La conversión discontinua se basa en el hecho de que la conversión de la mata de cobre debe realizarse en distintas cargas, las cuáles deben esperar el término de una para seguir con la otra. En este caso se destaca principalmente el convertidor Peirce – Smith (CPS) y en menor magnitud la tecnologías Hoboken. Otra tecnología denominada *Top Blown rotatory converter* (TBRC), que se basa en la inyección de aire y gases por medio de una lanza refrigerada se encuentra limitada en su uso en la operación de Ronsskar (Suecia), para la fusión de concentrado de plomo y chatarra de cobre.

El convertir Peirce – Smith se basa en la rotación del horno y una boca central que permite descargar la escoria y el cobre blíster producido. Por otro lado, el convertidor Hoboken



corresponde a una variación del Peirce – Smith (Moskalyk y Alfantazi 2003), el cual minimiza las emisiones fugitivas por su estructura de sifón, no obstante, se ve limitado en su capacidad de incorporar carga fría.

### 2.2.3 Conversión continua

La conversión continua se basa en el ingreso constante de mata de cobre y un sangrado continuo del cobre blíster, sin necesidad de realizar interrupciones en la operación además de las labores de mantenimiento. En este aspecto, se destacan las tecnologías de conversión flash y Mitsubishi, junto a los nuevos desarrollos de tecnología de conversión continua china (desarrollos en la fundición Jinfeng), los hornos Ausmelt C3 y de lecho empacado.

## 2.3 Desarrollos tecnológicos

En el presente estudio se revisarán dos tipos de tecnologías del procesamiento pirometalúrgico del cobre, actualmente en etapas de desarrollo, estas corresponden a las tecnologías chinas de fusión denominadas *bottom blown smelter* (BBS), *side blown smelter* (SBS) y de conversión continua. Cabe destacar que los mayores desarrollos tecnológicos han tenido un origen en los mismos operadores de una fundición, como se aprecia que ocurre con las tecnologías de fusión chinas. Casos análogos se dieron en la fusión en baño Noranda, Teniente e Isasmelt, mientras que la fusión flash se origina gracias a los procesos INCO en Canadá y Outokumpu en Finlandia.

### 2.3.1 Tecnologías de fusión - conversión

En los últimos años ha llamado la atención los desarrollos que han realizado las fundiciones chinas en búsqueda de mayor eficiencia y disminución de costos. En términos generales, las tecnologías de baño son posibles de clasificar en tres tipos, las de soplado superior (*top-blowing*), lateral (*side-blowing*) e inferior (*bottom-blowing*), las que se diferencian según la posición del ingreso de aire.

En el caso de la tecnología de soplado inferior, la literatura (Jie 2013) indica las siguientes características, basadas en las operaciones de Shandong Humon y Shandong Dongying:

- **Mayor energía de burbujeo y menor tiempo de mezcla:** la expansión y ascenso de las burbujas de aire aumenta la energía para favorecer la fusión, lo que reduce también el tiempo de mezcla a 10-20 s, en relación al soplado superior (90-120 s) y lateral (40-50 s)
- **Mayor enriquecimiento de oxígeno y mayor grado de fusión autógena:** el diseño de horno minimiza las infiltraciones de aire, permitiendo un mayor



enriquecimiento de oxígeno (sobre el 70%), disminuyendo los gases fugitivos y favoreciendo una operación autógena.

- **Mayor vida útil de horno y lanzas de oxígeno:** el aire en el baño líquido permite disminuir el efecto del impacto culata de las burbujas que ocurre en el soplado superior, gracias a la mayor presión en que se encuentra. Lo anterior ha permitido que las operaciones en funcionamiento mantengan un consumo mínimo de refractarios, con un grosor de ladrillo del orden 40 – 60 mm después de 6 meses de operación. La inyección de aire provoca un efecto “hongo” en las lanzas, lo cual logra, de manera controlada, protegerla del contacto con la mata.
- **Menor ruido:** la mayor parte: dado que la mayor parte de la energía dinámica del aire se consume en el baño.
- **Bajo contenido de magnetita en escoria:** el aire se inyecta directamente en la zona de mata, reaccionando primero con los sulfuros de cobre y hierro, evitando el contacto con la zona de escoria y minimizando la formación de magnetita, en contraste del soplado superior y lateral, donde el aire enriquecido está en contacto con la zona de escoria.
- **Adaptabilidad en la alimentación:** el horno no es estricto sobre la humedad del concentrado, por lo cual puede tratar concentrados con humedad entre 8%-10%, evitando el proceso de secado. Las operaciones en funcionamiento tratan concentrados de diversos orígenes con leyes de cobre hasta 16%.
- **Bajo costo de inversión:** según las operaciones consideradas, para una capacidad de producción de 60.000 t/a se logran ahorrar entre 20 a 30 millones de USD comparado a la tecnología de soplado vertical.

Uno de los principales problemas que trae la utilización de la tecnología de soplado inferior se da por la formación del “hongo” en la salida de las lanzas (provocada por el enfriamiento del material a su alrededor), el cual puede crecer de una manera más alargada. Si bien esta formación protege la lanza, también genera que el flujo de aire sea entregado fuera del apoyo, generando salpicaduras en la superficie. Otro elemento que afecta a esta tecnología es el mayor contenido de cobre en la escoria, la cual se encuentra en niveles en torno al 3,5%-4,5%.

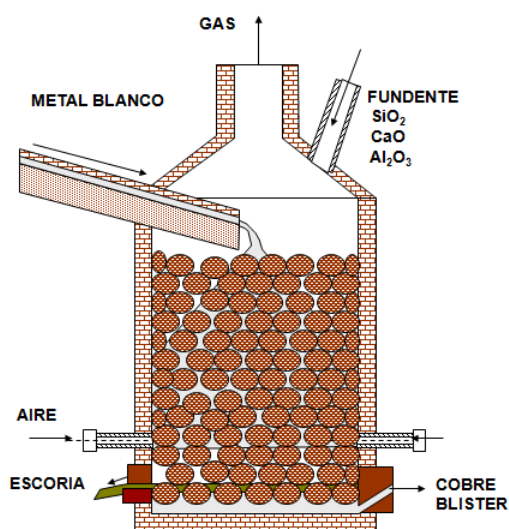
En lo referente a las tecnologías de soplado lateral, utilizado en las fundiciones de Chifeng Jinfeng y Yantai, los operadores (Jinfeng Copper Smelting Technology 2015) resaltan que logran una menor generación de polvo, cercano al 1,5% que contrasta con los niveles entre 2%-3% de la tecnología de soplado inferior y entre 3%-4% del soplado superior. Otra ventaja de la tecnología radica en el menor contenido de cobre en las escorias, que para la fundición de Chifeng llega a valores cercanos al 1%.



Los convertidores de Chinfeng destacan por generar una escoria de conversión con un contenido de cobre significativamente menor que los casos continuos de flash y mitsubishi, llegando a valores de un 2,5% (los otros presentan valores cercanos a 20% y 14%, respectivamente).

Para el caso de conversión continua en base a reactores de soplado inferior, las pruebas realizadas durante los años 2012 entregaron resultados beneficiosos para la fundición de Dongying, por lo cual se ha iniciado la construcción de un nuevo horno de conversión con esta tecnología que se espera esté operativo durante el 2015.

En lo que respecta a las tecnologías de desarrollo nacional, la conversión de lecho empacado (Conversión Continua Enami, CCE), desarrollada por ENAMI y la Universidad de Chile, presenta nuevos avances con la instalación de una planta piloto a escala industrial el 2015. El proceso anterior se basa en utilizar material refractario en un reactor vertical, que aumenta la superficie de contacto permitiendo una mayor capacidad de tratamiento en un menor espacio junto contra un flujo de aire en contracorriente, tal como indica la Figura 6 .



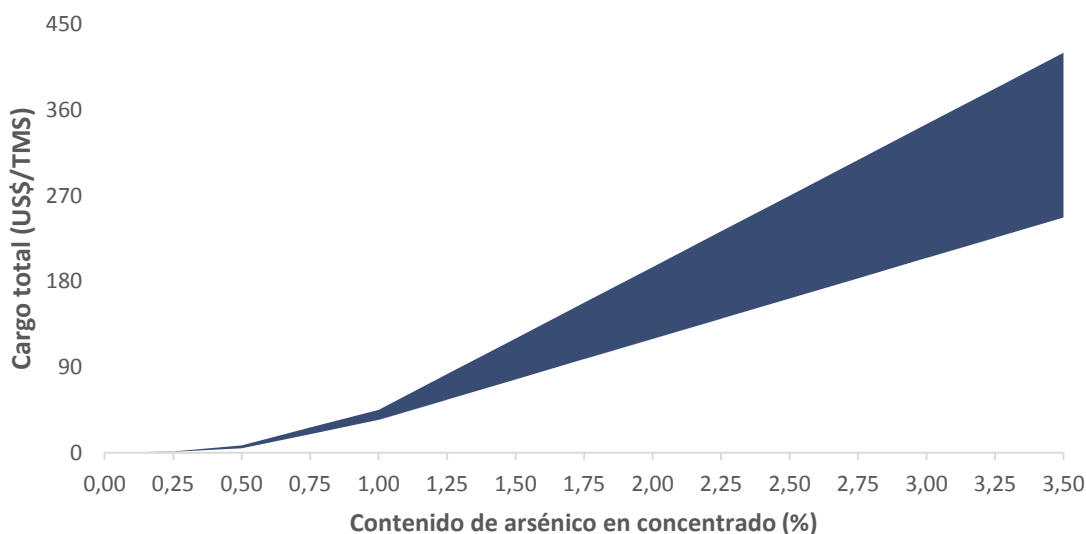
**Figura 6 Esquema de horno de conversión continua de lecho empacado. Fuente: Díaz, 2012.**

Las ventajas de este tipo de tecnología corresponden a una simplicidad en su operación y construcción (con una reducción del costo de inversión respecto a la tecnología CPS) y a una mayor flexibilidad que le permite incorporar mata líquida, mata sólida chancada, scrap y otras cargas frías. El sistema también permite menores riesgos operacionales, por su estructura vertical de flujo gravitacional, y menores gases fugitivos (Díaz 2012).

### 2.3.2 Fusión de concentrados complejos

En el mercado de concentrados corresponde diferenciar los casos de aquellos denominados complejos o “sucios”, debido a que su composición química o mineralógica tiene consecuencias negativas en la fundición, lo que les impide acceder a los valores referenciales de mercado de cargos de tratamiento y refinación.

Otra restricción para este tipo de concentrados corresponde a la limitante del mercado chino para tratarlos, pues desde el año 2014 se ha restringido la importación de concentrados de cobre, permitiendo solo aquellos con contenidos de arsénico menor a 0,5%. Lo anterior marca un cambio en la situación previa en la cual el castigo se daba a través de cobros según el contenido, rango indicado en la Figura 7<sup>2</sup>.



**Figura 7 Rango de cargo total de penalización por contenido de arsénico en concentrados.**  
**Fuente: elaboración propia según datos de exportación de COCHILCO.**

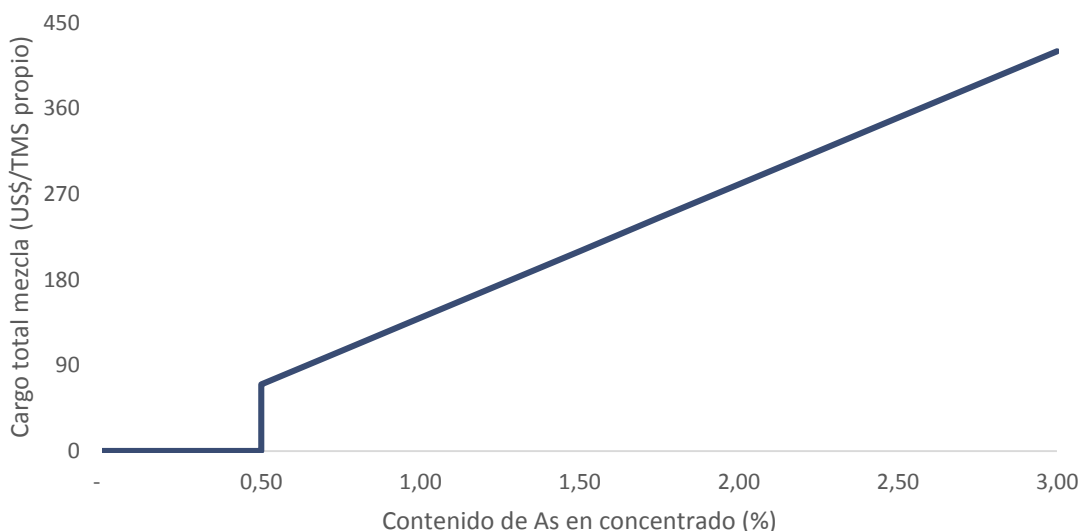
Lo anterior muestra que para concentrados con leyes de arsénico de alrededor de 1,5% la penalización que se debe pagar es similar al mismo cargo de fusión (alrededor de 90 US\$/TMS), lo cual podría corresponder a un ingreso relevante en la estructura financiera de una fundición.

Dada la importancia financiera y estratégica en relación al contenido de arsénico, los productores de concentrado han desarrollado distintas soluciones. En primer lugar, la una manera de resolver los temas en el corto plazo se da por la realización de mezclas con concentrados “limpios”, lo que permite disminuir su contenido promedio. Lo anterior no es necesariamente una medida ideal, pues considerando un 1.000 TMS de concentrado

<sup>2</sup> Otras penalidades se indican en el anexo 6.1.



con un 3% de arsénico, se requieren a lo menos 5.000 TMS de concentrado limpio para realizar la mezcla solo para llegar al umbral de 0,5% que permite la exportación hacia China. En este caso, considerando un costo de mezcla de 70 US\$/TMS<sup>3</sup>, el gasto total para mezclar un concentrado complejo y habilitarlo para el umbral mínimo de exportación se indica en la Figura 8:



**Figura 8 Cargo total por mezcla de concentrados según nivel de arsénico. Fuente: elaboración propia.**

Otra manera de enfrentar la problemática corresponde a la elaboración de un producto intermedio denominado calcina, la cual se obtiene después del proceso de tostación parcial del concentrado de cobre, que permite abatir el arsénico logrando un contenido final del orden de 0,3%.

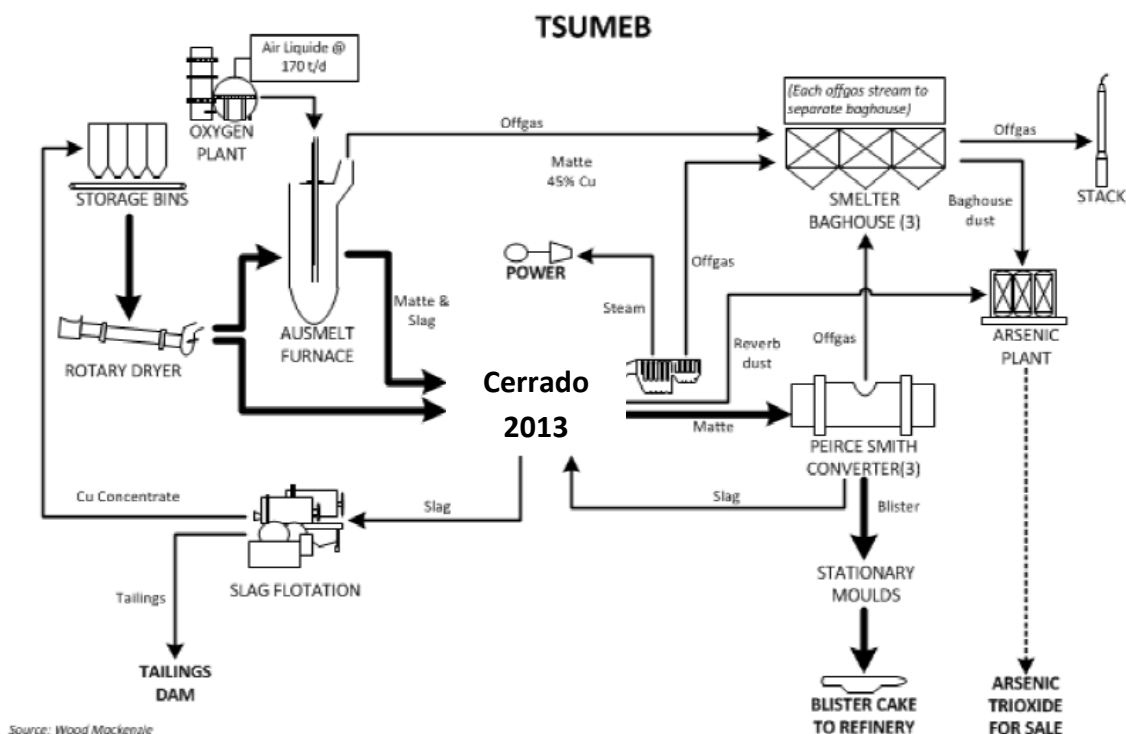
Una tercera alternativa se manifiesta en adaptar la fundición para tratamiento de estos minerales, maximizando la recuperación y evitando las fugas de elementos nocivos. Dentro de estos casos se encuentra la fundición Tsumeb en Namibia, la cual se encuentra adaptada en su proceso metalúrgico para el tratamiento de minerales complejos, proveniente principalmente de la mina búlgaras Chelopech y en menor medida de la peruana Marcapunta, ambas con altos contenidos de arsénico (5% y 8%, respectivamente<sup>4</sup>).

<sup>3</sup> Considera los gastos de puerto asociados al manejo de los minerales y al transporte terrestre hasta instalaciones de mezcla. Fuente: datos de comercialización COCHILCO.

<sup>4</sup> Fuente: Copper concentrates assays Q1 2015, Wood Mackenzie.



El proceso de tratamiento de estos concentrados se muestra en la Figura 9, que indica el uso de un horno de fusión en baño (lanza sumergida), un convertidor Peirce-Smith y la limpieza de escorias mediante flotación. El horno de reverbero indicado en el flowsheet fue cerrado oficialmente el año 2013.



**Figura 9 Diagrama de proceso de fundición Tsumeb. Fuente: Wood Mackenzie.**

La incorporación en el proceso de una planta de arsénico le permite a la fundición tratar los concentrados complejos que recibe y producir trióxido de arsénico ( $As_2O_3$ ). En este caso, los polvos de fundición capturados son pasados a través de 4 tostadores para obtener  $As_2O_3$ , utilizado en la manufactura de pesticidas y tratamiento de madera.

El proceso anteriormente descrito es complejo y se realiza a una escala relativamente pequeña, tratando del orden de 240.000 toneladas de concentrado y produciendo entre 40 y 45 kTMF de cobre al año. Las consideraciones anteriores explican la ubicación de la fundición en el último cuartil de costos, sin embargo, el tratamiento de minerales complejos significa una importante fuente de ingresos tal como se indicó en la Figura 7, lo que le permite una capacidad de diferenciación frente al resto de las operaciones.



### 3 Tecnología de fundiciones en Chile y el mundo

Para el análisis comparativo se ha considerado la información de 62 fundiciones a nivel mundial, de las cuáles 7 realizaron su cierre entre el 2008 y el 2010. Para clasificar las distintas fundiciones en función de la tecnología utilizada, se ha considerado agruparlas según su tecnología de fusión en 4 tipos: fusión en baño, fusión flash, mixto y otros. Las tecnologías están asociadas a la definición entregada en el capítulo anterior. Las fundiciones consideradas como mixtas corresponden a fundiciones que presentan distintos tipos de tecnología hornos de fusión, principalmente hornos de fusión en baño y flash. En la categoría Otros, se encuentran aquellas fundiciones con hornos de reverbero y tipo *shaft*.

El análisis de la información se basa en datos públicos individuales de las fundiciones y de la consultora Wood Mackenzie.

#### 3.1 Análisis geográfico y temporal

En términos geográficos, se han clasificado las fundiciones en 5 zonas de interés: Chile, otros de Latinoamérica, China, otros de Asia y resto del Mundo. La Tabla 2 muestra la distribución de las fundiciones operativas y aquellas que han cesado sus funciones después del año 2008:

**Tabla 2 Fundiciones operativas al año 2014 y cerradas en zonas definidas. Elaboración propia en base a información de WoodMac.**

| Número de fundiciones       | En operación | Participación en capacidad ánodos 2014 [kton] |
|-----------------------------|--------------|---|
| <b>Chile</b>                | 7            | 2.008   |
| <b>Otros Latino América</b> | 3            | 995   |
| <b>China</b>                | 14           | 4.515   |
| <b>Otros Asia</b>           | 10           | 4.166   |
| <b>Resto del Mundo</b>      | 21           | 5.193   |
| <b>Total</b>                | <b>55</b>    | <b>16.877<sup>5</sup></b>                     |

De manera esquemática, la Figura 10 indica la ubicación de las fundiciones operando previamente indicadas:

<sup>5</sup> Se estima que la capacidad de las fundiciones catastrada corresponde a un 88% de la capacidad de fusión a nivel mundial.







**Figura 10 Ubicación esquemática de fundiciones operativas a nivel mundial. Fuente: elaboración propia.**

En términos de tecnología utilizada en cada zona, no se aprecia una tendencia a ocupar un tipo determinado en los países, tal como muestra la Figura 11:



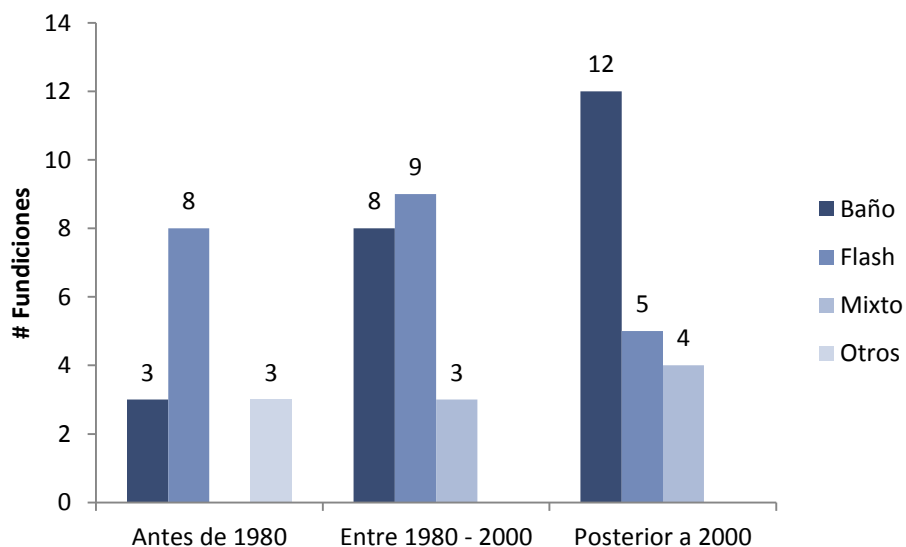
**Figura 11 Tecnología de fusión utilizada en las distintas fundiciones de cobre a nivel mundial. Fuente: elaboración propia.**

No obstante lo anterior, se destaca que a nivel mundial las tecnologías de fusión en baño se encuentran dominadas por las tecnologías Ausmelt e Isasmelt (12 de 23 operaciones) siendo el resto influenciadas por tecnologías de desarrollo particular de cada empresa,



como lo son los hornos Teniente, Noranda, Mitsubishi y las tecnologías de desarrollo chino (*Bottom Blown y Side Blown*). Por el lado de la tecnología Flash, la mayoría utilizan los hornos tipo Outokumpu (18 de 22).

Otra manera de visualizar la información corresponde a la tecnología que han elegido las distintas fundiciones que están operando a lo largo del tiempo, ya sea con la que comenzaron a operar o el año que decidieron operar con la tecnología actual<sup>6</sup>. Para este caso, la Figura 12 muestra la evolución de la clasificación considerada:



**Figura 12 Evolución de tecnología utilizada en fundiciones. Fuente: elaboración propia en base a información de WoodMac.**

Del gráfico anterior se extrae el crecimiento que ha tenido en los últimos años el uso de la tecnología de fusión en baño por sobre la tecnología flash, a diferencia de lo que ocurrió en el período entre 1980 – 2000. Analizando en mayor detalle el tipo de hornos de fusión en baño para aquellos modificados o iniciados posterior al año 2000, se tiene que 8 corresponden a tecnologías Ausmelt o Isasmelt, mientras que 3 están asociadas a las tecnologías chinas de soplado lateral o inferior.

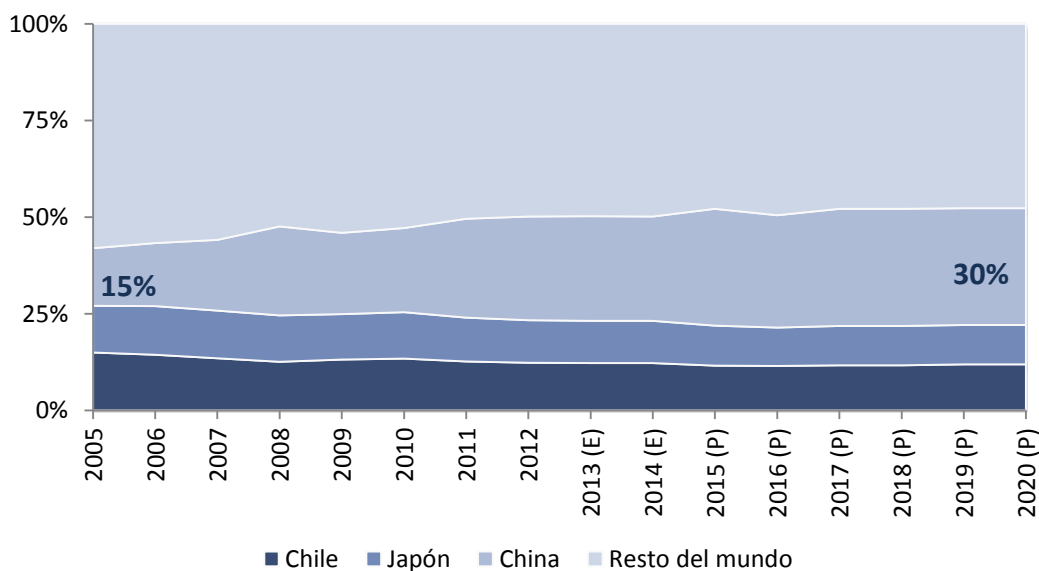
<sup>6</sup> No se incluyen aquellas modificaciones que sólo significaron aumento de capacidad de tratamiento o producción.





**Figura 13 Ubicación de tecnologías utilizadas en fundiciones modificadas o nuevas, posteriores al año 2000. Fuente: elaboración propia.**

Los antecedentes muestran la clara tendencia de las nuevas fundiciones en el continente asiático, dominando la capacidad de fusión a nivel mundial asociada a los centros de consumo por sobre la ubicación de los productores. La situación anterior queda de manifiesto en la Figura 14, que indica el crecimiento de la posición asiática en el mercado de fundición de concentrados de cobre.

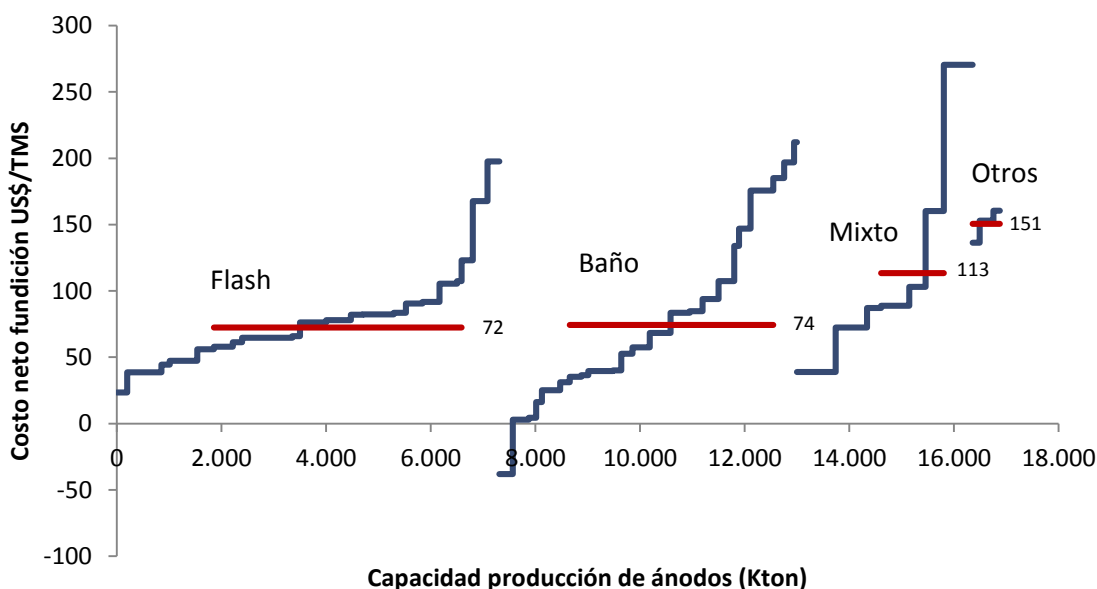


**Figura 14 Participación porcentual de capacidad de fundición en zonas seleccionadas. Fuente: Wood Mackenzie.**



### 3.2 Análisis de costos

Una visión complementaria al punto anterior corresponde a la información de costos y capacidades de producción de ánodo. Los datos de costos corresponden a los gastos netos de la fundición por tonelada de concentrado, descontando subproductos en los casos que corresponda. Se han agrupado las 55 fundiciones operativas en función de su tecnología de fusión, ya sea flash, baño, mixto u otros.

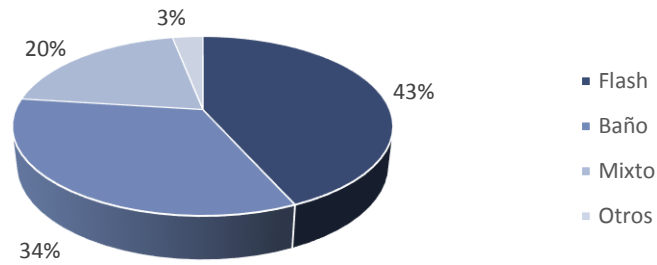


**Figura 15 Costos de fundición por tipo de tecnología al año 2014. Fuente: Elaboración propia en base información de Wood Mackenzie.**

El gráfico anterior destaca la similitud promedio entre las operaciones con tecnología de fusión en flash y baño, sin embargo, se diferencian en la mayor desviación en los costos de la segunda, lo que permite inferir a la tecnología flash como más previsible en el quehacer de su operación.

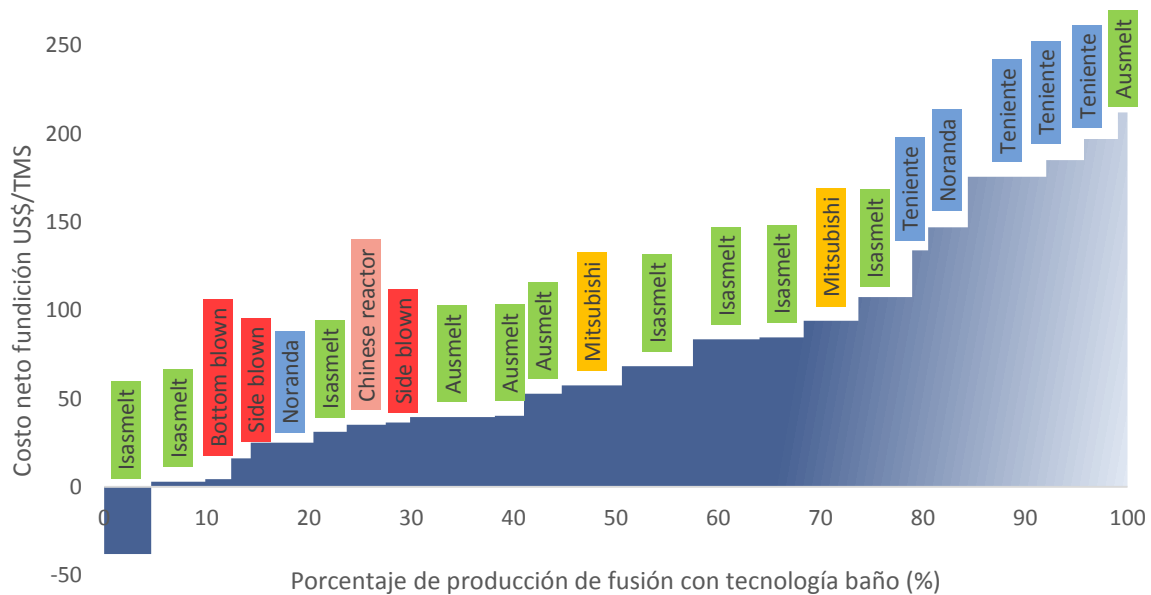
En términos de participación en capacidad, la fusión de tipo flash lidera el mercado actual con un 43%, seguida por la fusión en baño con un 34%. Las operaciones que utilizan mezclas de distintas tecnologías alcanzan un 20%, principalmente con horno de fusión en baño y flash, mientras que otras tecnologías ocupan solo un 3% de la capacidad mundial de fusión.





**Figura 16 Participación porcentual de las tecnologías de fusión según capacidad instalada al 2014. Fuente: elaboración propia en baso a Wood Mackenzie**

Dada la mayor variabilidad de alternativas y en sus costos de las tecnologías de fusión en baño, la Figura 17 presenta el detalle de la misma de las fundiciones que utilizan ese tipo de tecnología.

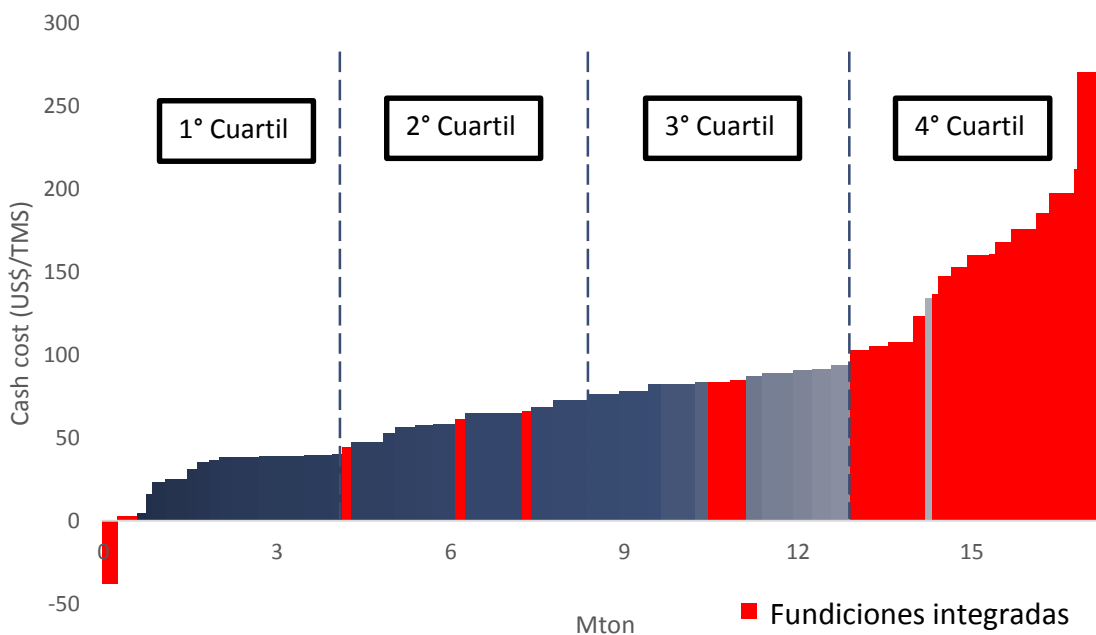


**Figura 17 Costo neto fusión para fundiciones con tecnologías de fusión en baño. Fuente: elaboración propia en base a información de Wood Mackenzie.**

En la figura anterior se han agrupado las tecnologías de fusión Teniente – Noranda (azul), Ausmelt – Isasmelt (verde). Mitsubishi (naranja) y las tecnologías Chinas (rojo). Del gráfico se desprende el alcance de los hornos de fusión en baño mediante lanza (en color verde) han logrado posicionarse como una de las primeras tecnologías del mercado. A su vez, los mayores costos de las tecnologías en baño se asocian a aquellas fundiciones que utilicen hornos tipo Teniente – Noranda, mientras que las tecnologías chinas han tenido la capacidad de ubicarse en los niveles más competitivos a nivel mundial



Al ordenar las fundiciones en una típica curva de costos agregada por cuartiles se destacan claramente las fundiciones integradas con mina en las posiciones menos competitivas a nivel mundial:



**Figura 18 Costos de fundición al año 2014, en rojo fundiciones integradas directamente a mina. Fuente: Elaboración propia en base información de Wood Mackenzie.**

De la muestra de 55 fundiciones, 24 se encuentran integradas a mina alcanzando un 35% de la capacidad mundial y con un 96% de concentrados procesado por vía terrestre. En el caso de las fundiciones no integradas, que poseen un 65% de la capacidad mundial, la cantidad de concentrado procesado vía terrestre llega a un 25% siendo mayoritariamente recibidos vía marítima<sup>7</sup>.

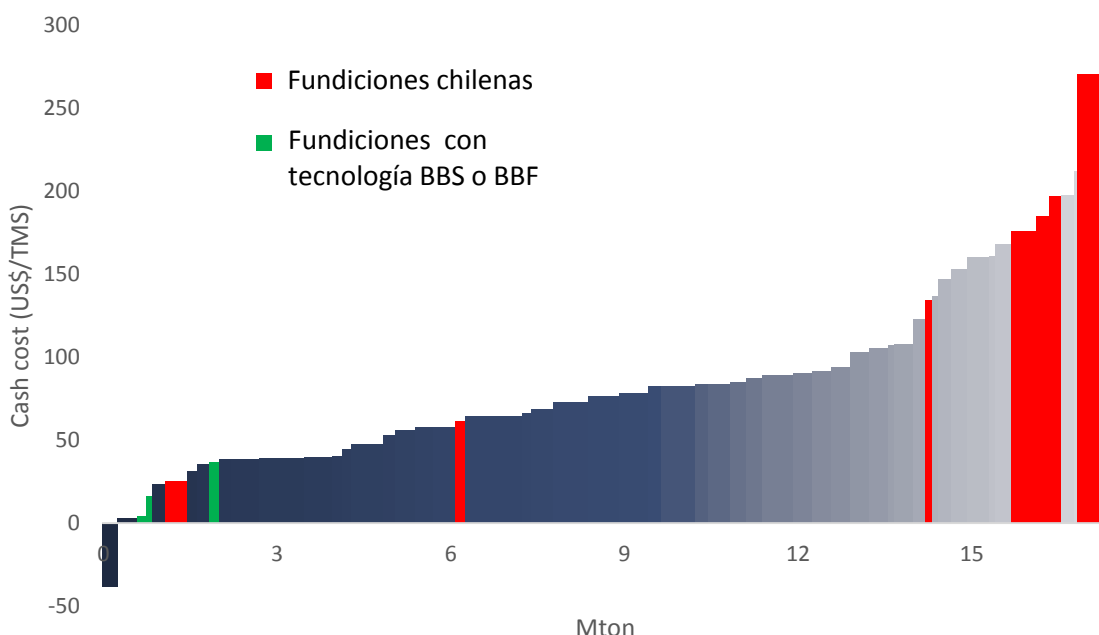
La Figura 18 marca una tendencia en el hecho de que cuando las operaciones de fusión de concentrados de cobre son realizadas por los mismos propietarios de la faena minera que produce el concentrado, los costos son mayores que aquellas que operan como negocios diferenciados. Lo anterior podría ser explicado en cómo se alinean los incentivos al no diferenciar las fundiciones como unidades de negocios independientes, pues en el caso de las fundiciones integradas podría darse un comportamiento subsidiario al compartir las rentas generadas por la etapa de minería y procesamiento del mineral.

<sup>7</sup> Según información al año 2014. Fuente: Wood Mackenzie.



Considerando lo expuesto en las Figura 15, Figura 17 y Figura 18, es válido interpretar que la diferenciación por costos de la industria ocurre mayoritariamente por un efecto de gestión, pues las distintas tecnologías se ubican a lo largo de toda la curva de costos sin una tendencia específica, lo cual contrasta con el caso de la ubicación de las fundiciones integradas. Sin embargo, es posible encontrar tendencias en el ámbito tecnológico en el caso particular de las fundiciones en baño, donde las tecnologías tipo Teniente – Noranda se ubican en los sectores menos competitivos.

Al comparar la posición de las fundiciones chilenas en los costos de operación se aprecia una situación compleja en términos de competitividad, lo cual contrasta con el lugar en que se encuentran las fundiciones que utilizan nuevos desarrollos tecnológicos discutidos en la sección 2.3, tal como indica Figura 19.



**Figura 19 Costos de fundición 2014 de fundiciones chilenas (rojo) y tecnologías emergentes de fusión (verde). Fuente: elaboración propia en base a información de Wood Mackenzie.**

Los resultados previamente mencionados permiten definir que la inversión en un cambio tecnológico en las fundiciones chilenas puede permitir alcanzar lugares más competitivos a nivel internacional, sin embargo, esta situación debe ir acompañada con modificaciones en el trato y gestión de estos activos para que se les compare como negocio metalúrgico y no de manera integrada con las labores de extracción y beneficio del mineral.



## 4 Comentarios y discusiones

Chile ha sido un país con una relevancia histórica en el desarrollo del proceso pirometalúrgico del cobre, basado principalmente en la necesidad de contar con mercados para la producción local de cobre. Junto a lo anterior, los cambios tecnológicos en esta etapa del procesamiento del cobre se han manifestado de diferentes maneras a lo largo del tiempo.

Actualmente, dentro de los procesos de procesamiento del concentrado, los cambios relevantes se han dado en los procesos de fusión de concentrado y conversión de mata de cobre. En primer lugar se destaca el hecho de buscar procesos continuos, que permitan aumentar la capacidad de tratamiento y logren alcanzar una mayor eficiencia de las reacciones químicas involucradas. En este caso se destacan los avances que se han generado en China con los reactores de fusión en baño de soplado inferior y lateral, junto a la conversión continua del mismo país y aquella en base a lecho empacado desarrollada localmente.

La existencia de concentrados de alto contenido de arsénico ha influenciado en las decisiones que toman los distintos agentes, pues las restricciones de importación en China los han llevado a tomar medidas menos atractivas como lo son la mezcla con concentrados e mayor calidad o pago por el tratamiento en fundiciones habilitadas para ello, con una importante carga financiera. Lo anterior también significa una oportunidad para las fundiciones que logren adaptar sus procesos a este tipo de material, logrando relevantes flujos de caja por este concepto.

El avance tecnológico en las fundiciones de cobre pasó por una etapa en dónde la tecnología flash dominaba los cambios en las instalaciones. Sin embargo, la fusión en baño ha demostrado ser la tecnología de mayor alcance en el presente siglo.

En términos de costos, el análisis destaca que la tecnología logra ser un factor diferenciador en menor escala que el hecho de mantener una integración vertical al proceso de extracción y procesamiento del mineral. Esto se aprecia en el hecho de que las fundiciones en los últimos cuartiles de costos son aquellas que se encuentran integradas a sus distintas faenas, lo que inhibe en su capacidad competitiva para alcanzar menores costos. No obstante, para el caso de operaciones con tecnología de fusión en baño (como las existentes mayoritariamente en Chile) se da un amplio rango de variabilidad de sus costos, por lo cual optar por modificaciones tecnológicas como han demostrado las fundiciones de China, es una alternativa de mejora de competitividad.





## 5 Referencias

- Díaz, Julio. *Cinética de conversión de mata de cobre y distribución de impurezas en lecho empacado*. Tesos de Magíster, Santiago: Universidad de Chile, 2012.
- Jie, Yan. «Latest development of oxygen bottom - blowing copper smelting technology.» *Copper 2013*, 2013: 873-886.
- Li, Bing, Jimu Jiang, Kejian Wei, Feng Li, Xiaohong Hao, y Chuanfu Zhang. «Development of the continuous bottom-blowing matte converting process.» *Copper 2013*, 2013: 889 - 895.
- Moskalyk, R., y A. Alfantazi. «Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow.» *Minerals Engineering*, 2003: 893-919.
- Riveros, Gabriel. *Apuntes Pirometalurgia*. Santiago: Universidad de Chile, 2009.
- Voisin, Leandro, y Exequiel Marambio. «Thermo-fluid-dynamics modeling for continuous converting process of copper matte in packed bed reactor: first approach.» *Copper 2013*, 2013: 1181-1196.
- Wood Mackenzie. *Bottom blown technology, a new direction in copper smelting?* Research paper, WoodMac, 2014.
- Wood Mackenzie. *Copper smelters statistics*. Mayo de 2015.
- Wood, Jacob, Robert Matuszewicz, y Markus A. Reuter. «Ausmelt C3 converting.» *International Peirce-Smith converting Centennial*, 2009: 297-406.
- Yunnan Copper Chifeng Nonferrous Metals Smelting Co., Ltd. «Jinfeng Copper Smelting Technology.» *Copper Conference*. Santiago: CESCO, 2015.



## 6 Anexos

### 6.1 Cargos referenciales por contenido de impurezas en concentrados

A continuación se presentan los cargos típicos para distintos elementos en los concentrados.

**Tabla 3 Valores referenciales de penalizaciones por impurezas en concentrados. Fuente: Base de datos COCHILCO y Wood Mackenzie.**

| Tolerancia <sup>8</sup>            |        |       | Penalización     |             |
|------------------------------------|--------|-------|------------------|-------------|
| Elemento                           | Unidad | Valor | Unidad           | Rango Cargo |
| As                                 | %      | 0,2   | US\$/TMS-0,1%    | 1,5 - 2,5   |
| As                                 | %      | 0,5   | US\$/TMS-0,1%    | 6-7,5       |
| As                                 | %      | 1     | US\$/TMS-0,1%    | 8,5 - 15    |
| Sb                                 | %      | 0,05  | US\$/TMS-0,01%   | 1 - 2       |
| Zn                                 | %      | 3     | US\$/TMS-0,1%    | 0,1 - 0,5   |
| Pb                                 | %      | 1     | US\$/TMS-0,1%    | 0,1 - 0,5   |
| Hg                                 | ppm    | 5     | US\$/TMS-10 ppm  | 1 - 5       |
| Cd                                 | ppm    | 50    | US\$/TMS-10 ppm  | 1 - 5       |
| MgO                                | %      | 0,8   | US\$/TMS-0,1%    | 0,5         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | %      | 0,1   | US\$/TMS-0,1%    | 1           |
| Cl                                 | %      | 0,5   | US\$/TMS-0,1%    | 4           |
| Bi                                 | ppm    | 200   | US\$/TMS-100 ppm | 1,5 - 3     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | %      | 3     | US\$/TMS-1%      | 2           |
| F                                  | ppm    | 300   | US\$/TMS-100 ppm | 1 - 2       |
| Ni+Co                              | %      | 0,5   | US\$/TMS-0,1%    | 1           |
| Se                                 | ppm    | 300   | US\$/TMS-100 ppm | 1,5         |
| SiO <sub>2</sub>                   | %      | 10    | US\$/TMS-1%      | 1           |
| Humedad                            | %      | 10    | US\$/TMS-1%      | 2 - 3       |
| MgO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %      | 4     | US\$/TMS-1%      | 4,5         |
| Zn+Pb                              | %      | 4     | US\$/TMS-1%      | 3           |

<sup>8</sup> Tolerancia se refiere al valor del contenido sobre el cual se penaliza

Este trabajo fue elaborado en la  
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

**Emilio Castillo Dintrans**

Analista de Estrategias y Políticas Públicas

**Jorge Cantallopts Araya**

Director de Estudios y Políticas Públicas

Agosto/ 2015

