

Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países

de América Latina

Gustavo Lagos

David Peters

Juan Carlos Salas

Roberto Parra

Víctor Pérez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países de América Latina

Gustavo Lagos
David Peters
Juan Carlos Salas
Roberto Parra
Víctor Pérez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Gustavo Lagos (Pontificia Universidad Católica de Chile), Consultor de la Unidad de Recursos Naturales No Renovables de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), David Peters (DICTUC-UC), Juan Carlos Salas (Pontificia Universidad Católica de Chile), Roberto Parra (Universidad de Concepción) y Víctor Pérez (Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO)), en el marco de las actividades de la División y del programa Cooperación Regional para una Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos, ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Los autores agradecen al CESCO y a varios de sus miembros que hicieron valiosos comentarios al trabajo, especialmente Osvaldo Urzúa e Iván Valenzuela. Asimismo, agradecen los comentarios de Pablo Chauvet, Mauricio León, José Luis Lewinsohn y Orlando Reyes, de la CEPAL, Víctor Andrés Garzón y Nicolas Maennling, del programa de cooperación regional mencionado, y Jorge Cantallop, de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2021/149
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2021
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.21-00583

Esta publicación debe citarse como: G. Lagos y otros, "Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países de América Latina", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2021/149), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumen | 7 |
| Introducción | 9 |
| I. Tecnologías de procesamiento de concentrados | 15 |
| A. Procesos en una fundición | 15 |
| 1. Procesos continuos en una fundición | 17 |
| 2. Concentrados de cobre en una fundición | 18 |
| B. Emisiones y residuos de las fundiciones | 21 |
| 1. El anhídrido sulfuroso, SO ₂ | 21 |
| 2. Otros elementos contaminantes | 22 |
| 3. Escoria | 23 |
| C. Procesos en una refinería electrolítica | 23 |
| D. Tratamientos hidrometalúrgicos para concentrados | 25 |
| 1. Fundamentos de la lixiviación de concentrados de sulfuros de cobre | 25 |
| 2. Tecnologías para el procesamiento de concentrados de cobre | 26 |
| 3. Análisis comparativo con las tecnologías pirometalúrgicas | 27 |
| 4. Conclusiones tratamientos hidrometalúrgicos para concentrados | 27 |
| II. Análisis del mercado de concentrados y materiales secundarios | 29 |
| A. Mercados de concentrados | 29 |
| 1. Introducción | 29 |
| 2. Ingresos y costos de la producción de concentrados | 30 |
| 3. Ingresos y costos de fundiciones y refinerías | 30 |
| 4. Contratos de concentrados | 33 |
| 5. Determinación del peso y composición del concentrado | 35 |
| 6. Alteración de los términos de intercambio de los concentrados | 36 |
| B. Tendencias en mercados de concentrados | 37 |
| 1. El corto plazo | 37 |

| | | |
|----------------|--|----|
| 2. | Mediano y largo plazo..... | 37 |
| 3. | La potencial elevación del TCRC más allá de su valor de mercado..... | 38 |
| C. | Mercado del ácido sulfúrico..... | 38 |
| D. | Mercado de la chatarra..... | 39 |
| 1. | Introducción..... | 39 |
| 2. | Procesos de tratamiento de la chatarra..... | 40 |
| 3. | Tendencias en mercados de chatarra..... | 41 |
| III. | Evaluación económica de una nueva fundición refinería en Chile | 43 |
| A. | Tratamiento del arsénico en una fundición..... | 45 |
| IV. | La cadena de valor del cobre desde la mina a la manufactura | 47 |
| V. | Sustentabilidad de fundiciones y refinerías | 51 |
| A. | Análisis de emisiones de anhídrido sulfuroso..... | 51 |
| B. | Impactos sociales..... | 54 |
| C. | Regulaciones para el transporte de concentrados..... | 57 |
| D. | La huella de carbono de fundiciones y refinerías..... | 60 |
| 1. | Introducción..... | 60 |
| 2. | Metodología..... | 62 |
| 3. | Emisiones GEI de alternativas de matriz eléctrica y uso de hidrógeno verde..... | 66 |
| 4. | Emisiones GEI de fundición refinería en Chile y en China..... | 67 |
| 5. | Benchmark de emisiones GEI de fundiciones refinerías de cobre..... | 68 |
| 6. | Alcances de las emisiones de fundiciones y refinerías de cobre..... | 68 |
| 7. | Discusión de la huella de carbono..... | 70 |
| VI. | Modelo de negocios para fundiciones y refinerías | 71 |
| A. | Introducción..... | 71 |
| B. | Condiciones para desarrollar el negocio..... | 72 |
| C. | El caso de la Planta Recuperadora de Metales (PRM) en Mejillones, Chile..... | 73 |
| D. | Habilitadores y restricciones del negocio..... | 74 |
| E. | Contrato de suministro como garantía del negocio..... | 75 |
| F. | Chile experto en tratamiento y disposición de arsénico..... | 76 |
| G. | Ácido sulfúrico..... | 77 |
| H. | Volatilidad del cargo de tratamiento y refinación..... | 77 |
| I. | Energía renovable e hidrógeno verde..... | 78 |
| J. | Ubicación del complejo fundición refinería..... | 78 |
| K. | El rol del Estado..... | 79 |
| VII. | Conclusiones | 81 |
| | Bibliografía | 83 |
| Cuadros | | |
| Cuadro 1 | Comparación de consumo de energía para la producción de cobre (concentrado a ánodo), para tecnologías seleccionadas de fundición de cobre..... | 18 |
| Cuadro 2 | Concentración de Cu,Fe y S en concentrados..... | 18 |
| Cuadro 3 | Castigo por impurezas en concentrados..... | 22 |
| Cuadro 4 | Competitividad de fundiciones de referencia y de América Latina en 2017..... | 32 |
| Cuadro 5 | Supuestos de la evaluación económica de la fundición refinería..... | 45 |
| Cuadro 6 | Penalidades por Arsénico en Concentrados..... | 46 |
| Cuadro 7 | Normas primarias de SO ₂ (µg/Nm ³)..... | 53 |

| | | |
|----------|--|----|
| Cuadro 8 | Resumen de clasificaciones GHS para cobre metálico..... | 58 |
| Cuadro 9 | Insumos alcance tres de GEI para dos operaciones de fundición refinera | 69 |

Gráficos

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 1 | Exportaciones de cobre contenido en concentrados | 12 |
| Gráfico 2 | Variación del contenido promedio de Cu en concentrados | 19 |
| Gráfico 3 | Promedio ponderado global de costos directos de fundición, año 2017 | 32 |
| Gráfico 4 | Producción de chatarra refinada y de fundición directa | 42 |
| Gráfico 5 | Cociente Ebitda/Ventas para una muestra de compañías de diversas industrias, información de años 2019 y 2020 | 48 |
| Gráfico 6 | Cociente Ebit/Ingresos para una muestra de compañías de diversas industrias, información de años 2019 y 2020 | 49 |
| Gráfico 7 | Porcentaje de captura y fijación de azufre en fundiciones de cobre chilenas 1990-2019..... | 52 |
| Gráfico 8 | Distribución del valor agregado de las 40 mayores mineras globales transadas en bolsa, 2007 y 2018..... | 56 |
| Gráfico 9 | Distribución del valor agregado de las grandes mineras globales transadas en bolsa, y de otras actividades económicas. Promedio 5 años (2014-2018) | 56 |
| Gráfico 10 | Rangos de emisiones de ciclo de vida de gases de efecto invernadero reportadas para la generación de 1 MWh, de electricidad a partir de diversas tecnologías renovables..... | 63 |
| Gráfico 11 | Emisiones de gases de efecto invernadero para la generación de 1 MJ de energía térmica, para diversos combustibles de acuerdo con la realidad de Estados Unidos, y nuestra estimación a partir de la fabricación de hidrógeno verde | 64 |
| Gráfico 12 | Emisiones de gases de efecto invernadero por 1 km de transporte de una tonelada de cobre en cátodos o contenida en concentrados | 65 |
| Gráfico 13 | Emisiones de gases de efecto invernadero de fundición y refinación para la producción de una tonelada de cobre en cátodos antes de créditos, para una operación chilena, bajo tres casos | 66 |
| Gráfico 14 | GEI de una fundición refinera ubicada en Mejillones y otra, idéntica en tecnología y capacidad de tratamiento, ubicada en las proximidades de Shanghai en China | 67 |
| Gráfico 15 | GEI procesos fundición y refinera para la producción de una tonelada de cobre en cátodos, para dos operaciones | 68 |
| Gráfico 16 | GEI procesos fundición y refinera para la producción de una tonelada de cobre en cátodos, por alcance, para dos operaciones..... | 69 |

Diagramas

| | | |
|------------|---|----|
| Diagrama 1 | Procesos de tratamiento del cobre de mina. | 10 |
| Diagrama 2 | Ciclo de vida del cobre refinado. | 14 |
| Diagrama 3 | Diagrama de procesos de una fundición de cobre. | 15 |
| Diagrama 4 | Procesos para el tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre..... | 26 |
| Diagrama 5 | Madurez de las tecnologías de lixiviación de concentrados..... | 26 |
| Diagrama 6 | Ciclo de vida del cobre refinado y de fundición directa..... | 40 |
| Diagrama 7 | Procesos de recuperación de arsénico en fundición refinera, a partir del arsénico contenido en los concentrados procesados (base 100%)..... | 46 |
| Diagrama 8 | Alcances en emisiones de GEI, fundiciones y refineras de cobre | 61 |

Comité revisor

| | |
|----------------------|---|
| Víctor Andrés Garzón | Asesor Técnico Programa MINSUS GIZ |
| Nicolas Maennling | Asesor Principal Programa MINSUS GIZ |
| Jorge Cantallopts | Director de la Dirección de Estudios y Políticas Públicas de COCHILCO |
| Pablo Chauvet | Funcionario de la División de Recursos Naturales, CEPAL |
| Mauricio León | Jefe de Unidad de la División de Recursos Naturales, CEPAL |
| José Luis Lewinsohn | Funcionario de la División de Recursos Naturales, CEPAL |
| Orlando Reyes | Funcionario de la División de Recursos Naturales, CEPAL |
| Oswaldo Urzúa | Director de CESCO |
| Iván Valenzuela | Director de CESCO |

Resumen

El objetivo general del estudio “Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países Latinoamericanos” es evaluar económicamente las vulnerabilidades y oportunidades de la cadena global de valor del cobre refinado, la que se ha erosionado fuertemente en los países Latinoamericanos debido al crecimiento persistente de la capacidad de fundición y refinación en Asia, amenazando la integridad de dicha cadena y la supervivencia de los beneficios económicos, ambientales, tecnológicos y sociales que conlleva su desarrollo.

Este trabajo proporciona evidencia que la cadena de suministro del cobre refinado se encuentra amenazada en América Latina y que los países que actualmente tienen capacidad de fundición, especialmente Perú y Chile, se verían beneficiados por la instalación de una nueva fundición. También presenta evidencia sobre costos y beneficios de establecer una nueva fundición refinería.

Se concluyó que Chile era el país más adecuado en América Latina para instalar una nueva fundición refinería y que ello no constituiría un aumento de capacidad de fundición ni en Chile ni en América Latina, debido al potencial cierre de varias fundiciones existentes en Chile durante esta década.

Una primera vulnerabilidad identificada, que es la pérdida creciente de capacidad negociadora de las tarifas de tratamiento y refinación de la industria minera del cobre en América Latina, sería abordada solo en forma marginal en la práctica, debido al hecho que la capacidad de fusión no aumentaría. El efecto demostrativo de establecer una nueva fundición en América en décadas, sin embargo, constituiría una prueba que ello es posible, y que podría repetirse.

La instalación de una nueva fundición refinería en Chile representa una oportunidad para demostrar que el manejo integral de la cadena de valor del cobre refinado puede traer beneficios para reducir sustancialmente la huella de carbono del cobre de mina y para lograr carbono-neutralidad.

También es una oportunidad para elevar la reputación de la industria de fundiciones y refinerías en el país, mediante el manejo, reciclaje, y reuso de los residuos, y mediante la integración efectiva del sector académico tecnológico para desarrollar tecnologías que puedan procesar sustentablemente los cada vez más complejos minerales y concentrados de cobre, utilizando menos energía, agua y territorio.

Finalmente, el rol del Estado en esta empresa es crucial como habilitador e incentivador de esta inversión, en el entendido que se trata de una inversión estratégica para el desarrollo del país, y qué, por tal motivo, no puede esperarse que el mercado por sí solo resuelva este desafío.

Introducción

El objetivo general del estudio “Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre en países Latinoamericanos” es analizar económicamente las vulnerabilidades y oportunidades de la cadena global de valor del cobre refinado, la que se ha erosionado fuertemente en los países Latinoamericanos debido al crecimiento persistente de la capacidad de fundición y refinación en Asia, amenazando la integridad de dicha cadena y la supervivencia de los beneficios económicos, ambientales, tecnológicos y sociales que conlleva su desarrollo. En la cadena de valor del cobre refinado, el producto intermedio principal son los concentrados de cobre.

La demanda mundial de cobre se divide en dos segmentos. El cobre refinado, que debe satisfacer altas condiciones de pureza ya que el 63% estaba destinado a la conducción eléctrica en 2019 (ICSG, 2020), y el cobre de fundición directa el que se usa fundamentalmente en semimanufactura, y que se recupera de la manufactura y es fundido, sin necesidad de refinarlo nuevamente. El cobre refinado es el que determina la formación del precio del metal. Este trabajo analiza el mercado global de la chatarra, ya que esta representa una fracción del cobre que termina refinándose. La inmensa mayoría del mercado de la chatarra de cobre existe fundamentalmente en las regiones que usan más cobre en el mundo y que están en el hemisferio norte.

El uso del cobre refinado en 2019 se distribuyó en equipos (31%), construcción (28%), usos industriales (12%), transporte (13%), infraestructura 16% en 2019 (ICSG, 2020).

En 2019 (ICSG, 2020) el 71% del cobre refinado se utilizó en Asia, un 16% en Europa, un 10% en Norte América. El hemisferio sur, incluyendo África, Latino América, aunque una parte de esta última está ubicada en el hemisferio norte, y Oceanía, usaron solamente el 3% del cobre refinado mundial. En 2019 sólo el 16,8% de la producción global de cobre refinado provino de la chatarra (ICSG, 2021).

A diferencia de lo que ocurre con el uso del cobre refinado, América Latina es clave en la producción de cobre de mina. En 2020, Chile produjo 27,9% de este, Perú un 10,3%, México un 3,7%, Brasil un 1,7% y Ecuador un 0,2%. Es decir, América Latina produjo el 43,8% del cobre de mina mundial en 2020 (9,21 millones de toneladas), mientras que en 1990 esta cifra era 24,1% (2,24 millones

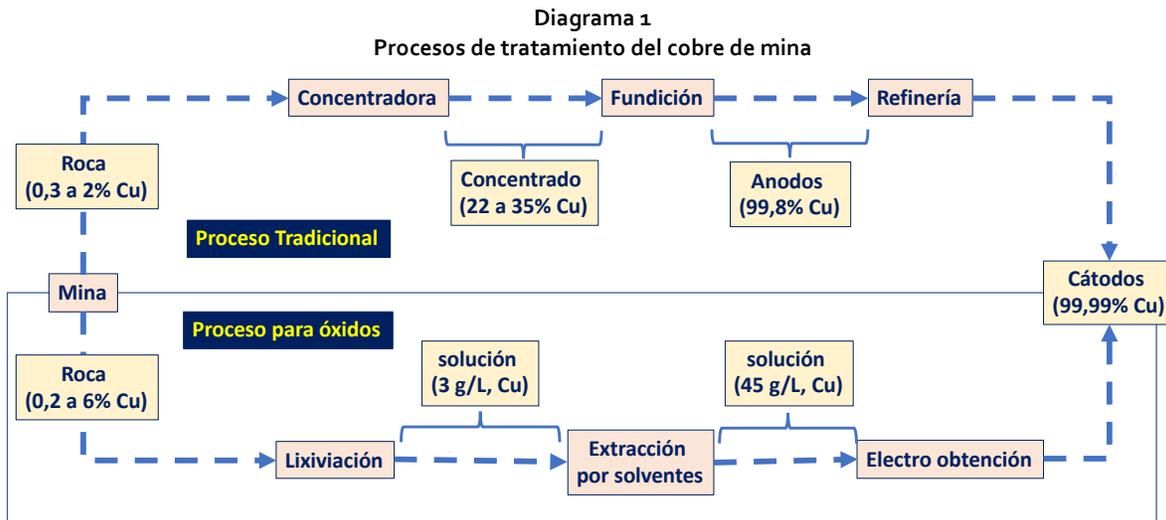
de toneladas) (WBMS, 1994). Entretanto la capacidad de fusión de América Latina decreció desde constituir el 21,9% del mundo en 1990 a ser el 11,2% en 2020 (WBMS, 1994; Incomare, 2021).

Estas cifras significan que mientras la primera parte de la cadena de valor del cobre refinado creció al doble en América Latina desde 1990, el segmento final de ella decreció a cerca de la mitad. Ello enfatiza la necesidad de examinar la cadena de valor del cobre refinado, insumo clave de la industria semimanufacturera y de la industria manufacturera que utiliza el cobre.

El 84,5% del cobre refinado que se usaba en el mundo en 2020, de un total de 23,05 millones de toneladas (Incomare, 2021), se extraía de yacimientos, que son zonas con una concentración de metales muy por sobre el promedio que contiene la corteza terrestre (0,3% a 6%), la que tiene, estimativamente, 67 ppm, es decir 0,0067% de cobre (Greenwood and Earnshaw, 1984). El cobre restante provenía de la chatarra, la que se analiza más adelante.

El cobre está presente en estos yacimientos en la forma de minerales, los que son compuestos químicos, tales como sulfuros, carbonatos, silicatos, óxidos, cloruros, nitratos, sulfatos, y otras sales.

Los minerales de cobre son tratados principalmente por dos vías en el mundo (diagrama 1), dependiendo de su composición. Los sulfuros de cobre se tratan principalmente por el método tradicional, mediante flotación, lo que da origen a concentrados. Estos tienen unas 30 veces la concentración de cobre que tiene el mineral. Los concentrados deben ser fundidos y posteriormente electrorefinados para obtener cátodos. Los minerales oxidados, en cambio, son tratados mediante un proceso hidrometalúrgico, consistente en lixiviación, seguido de extracción por solventes, y por electro obtención, dando lugar a cátodos. En 2020, el método tradicional representaba el 82,9% del cobre de mina refinado a nivel global, mientras que el método hidrometalúrgico representaba el 17,1% restante (Incomare, 2021).



Fuente: Elaboración propia.

Los procesos hidrometalúrgicos han estado reduciendo su importancia en el mercado de cobre refinado a una tasa algo menor que 1% anual desde 2015, debido al agotamiento de los grandes yacimientos de óxidos. Ello es entendible porque estos yacimientos están cerca de la superficie, y por ello fueron descubiertos tempranamente, pero pudieron ser explotados en toda su magnitud desde que se desarrolló la tecnología de extracción por solventes y electro obtención, la que se implementó en la industria del cobre en los años 70 del siglo pasado.

Las plantas concentradoras deben estar ubicadas en las cercanías de las minas, o bien a distancias en que el mineral es transportado por gravedad. En cambio, las fundiciones reciben cerca del 3% de la masa que recibe la concentradora, y pueden, por ello, estar ubicadas en cualquier parte del mundo ya que el transporte de concentrado es económicamente viable. Las fundiciones no requieren estar en el mismo lugar de las refinerías, aunque estar ubicadas contiguamente a las primeras tiene ventajas económicas.

La excepción a esta regla son las operaciones de pequeñas minas cuyos minerales son comprados por agencias que los transportan por camión hasta plantas concentradoras que pueden estar ubicadas a mayores distancias de las minas. Es el caso de muchas pequeñas minas en Chile, Perú, Brasil, México y de otros países de América Latina y del mundo. Estas agencias son privadas en todos los países de América Latina, excepto en Chile, en donde existe una agencia estatal, la Empresa Estatal Enami. El cobre producido en minas medianas y grandes es tratado casi en su totalidad en plantas concentradoras que están ubicadas en las inmediaciones de las minas. Este trabajo analiza estas últimas.

Las fundiciones y refinerías de cobre son instalaciones industriales y, por ello, tienen rentabilidades menores que la minería, ya que dependen principalmente de su competitividad tecnológica y de gestión, a diferencia de las minas de cobre, las que además tienen la calidad del yacimiento como fuente de la renta que perciben.

Por ello, desde hace varias décadas la mayor parte de las compañías mineras más competitivas del mundo impulsaron una estrategia de desintegración vertical, en que se privilegió la inversión en yacimientos e instalaciones adyacentes. Ello también ocurrió en Chile, que tenía en 1990 la mayor capacidad de fundición y refinación de cobre del mundo. Japón disputó con Chile el primer lugar de producción de fundiciones durante la década de los 90.

El auge de la economía china a fines de la década de los 90, sin embargo, fue acompañada de un crecimiento exponencial de su capacidad de fundición, la que sobrepasó la de Chile y la de Japón en 2005, y ha seguido creciendo desde entonces. Otros países asiáticos, fundamentalmente la República de Corea, pero también India, se hicieron parte de la estrategia, que apuntaba a poseer la parte final de la cadena de valor del cobre refinado, asegurando abastecimiento de este metal para sus actividades industriales.

La producción de las fundiciones integradas en la propiedad de compañías mineras comenzó a reducirse respecto de las fundiciones y refinerías independientes desde al menos 1990. En 2000 las fundiciones integradas tenían el 53% de la capacidad de fundición del mundo, mientras que, en 2020, esta participación había bajado a 39% (Wood Mackenzie, 2020a).

Ello causó el aumento del peso de las fundiciones independientes con respecto a las fundiciones integradas.

Ello significa que crecientemente estos países en Asia tienen la capacidad de fijar las tarifas que deben pagar los productores de concentrados de cobre por fundir y refinar, y también tienen cada vez mayor capacidad para fijar los términos de los contratos.

Mientras esto ocurre, los países de América Latina y las compañías mineras que exportan concentrados de cobre van perdiendo su capacidad negociadora y de decisión de mercado. Además, cada vez tienen menos capacidades científicas y tecnológicas para fundir y refinar sus propios concentrados. Es efectivo que China y otros países asiáticos tienen un enorme poder sobre la industria de fundiciones y refinerías, pero al mismo tiempo son cautivos de la industria minera productora de concentrados de cobre. La diferencia es que mientras esta última tiene fuertes barreras legales para actuar oligopólicamente, lo mismo no ocurre en el lado de las fundiciones y refinerías.

La gran mayoría de las fundiciones de cobre de América Latina aún son propiedad de compañías mineras. La Caridad en México e Ilo en Perú, pertenecen a Southern Copper Corporation de Grupo México, Chagres en Chile pertenece a Anglo American, y Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas

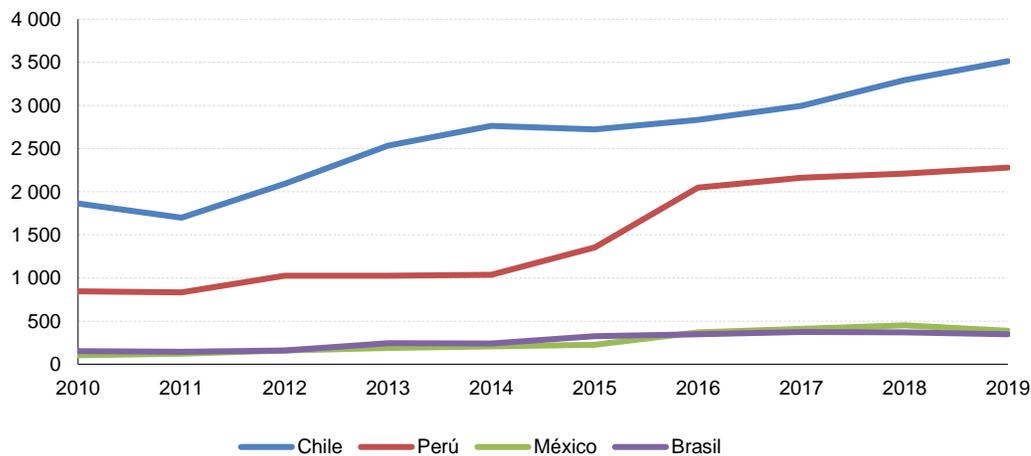
y Caletones pertenecen a Codelco Chile. Las fundiciones independientes en América Latina son Caraíba en Brasil, perteneciente a Paranapanema S.A., Hernán Videla Lira (HVL) que pertenece a Enami, y Altonorte, que pertenece a Glencore, estas dos últimas, ubicadas en Chile.

Es decidor que la producción de este formidable conjunto de fundiciones fue prácticamente igual en 2020 (2,0 millones de toneladas) que en 1990 (1,95 millones de toneladas). En particular, la producción de las fundiciones chilenas fue casi igual en 2020 que en 1990 a pesar del inicio de la fundición Altonorte en 1993, y de la expansión de Chagres en 2005 (Incomare, 2021).

Estas tendencias, sumadas al aumento de la producción de concentrados, y a la reducción del cobre refinado producido mediante lixiviación, extracción por solventes y electro obtención (Lix/Sx/Eo) significaron una fuerte reducción del porcentaje de cobre refinado exportado por Chile con respecto al total de cobre exportado, pasando de 89% en 1990 a 51% en 2020 (Minería UC, 2021). Lo mismo ocurrió en Perú, el que redujo su exportación de cobre refinado desde 85,7% en 1990 a 14% en 2020, y México desde 73% en 1994 a 46,9% en 2020 (Incomare, 2021). Por otro lado, Brasil importaba concentrado en 1990 a su fundición de Caraíba, es decir refinaba todo el cobre producido en el país. En 2020, en tanto las exportaciones de cobre refinado de Brasil representaban el 36,2% del total.

El aumento de la producción de cobre por parte de los países Latino Americanos junto al estancamiento de la capacidad de fusión significó que las exportaciones de cobre en concentrados aumentaron, según lo indica el gráfico 1. Entre 2010 y 2019, este crecimiento fue 89% en Chile, 170% en Perú, 276% en México y 128% en Brasil. De dichas exportaciones, un alto porcentaje se destinaron a mercados asiáticos en el año 2019: Chile, 87%; Perú, 87%, Brasil, 40%.

Gráfico 1
Exportaciones de cobre contenido en concentrados
(En miles de toneladas de cobre)



Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de aduanas y anuarios de producción de minerales de cada país.

Es previsible que esta tendencia de reducción de las exportaciones de cobre refinado se perpetúe en el tiempo, ya que las mayores reservas de cobre en estos países son en base a sulfuros primarios, minerales complejos que deben ser tratados por el proceso tradicional, el que requiere de fusión y refinación. Y la otra causa de la continuidad de esta tendencia es que los países Latinoamericanos seguirían aumentando su producción minera de cobre tal como ocurrió en los últimos 30 años. Ello se debería a que, teniendo las reservas y establecida la estructura productiva, la industria tiende a utilizarla para crecer.

Este trabajo identifica estas tendencias productivas como una **primera vulnerabilidad** de la industria del cobre de América Latina.

Una **segunda vulnerabilidad** de la industria minera del cobre en Latinoamérica es la presión cada vez mayor por reducir la huella de carbono, cuestión que está influenciada por la exportación de concentrados en vez de cátodos. Efectivamente, el transporte de concentrados tiene intrínsecamente una huella alrededor de 45% más alta que el transporte de cátodos, suponiendo que el ácido sulfúrico generado en la fundición se consume en la misma operación o en una operación cercana, de modo que la huella de su transporte sea muy pequeña.

Adicional al transporte, la diferencia en la huella de carbono de la energía eléctrica entre Chile, Perú y Brasil, y los países asiáticos mencionados, es favorable a los países Latinoamericanos en la actualidad, y es posible que se mantenga como tal por un largo periodo. En otras palabras, las emisiones de GEI del sistema eléctrico chileno son menores que las de China, Corea del Sur e India. Ello lleva a reducir más la huella de carbón al fundir y refinar en América Latina que en Asia. Este trabajo evalúa algunas de las alternativas tecnológicas para reducir la huella de carbono y analiza las implicancias de fundir y refinar en Chile o en Asia.

Existe una **tercera vulnerabilidad** que es más aplicable a Chile que al resto de los países de América Latina debido al gran peso económico que tiene la industria minera del cobre en este país. Dicha vulnerabilidad es de carácter científico tecnológica y dice relación con el desarrollo y manejo por parte de Chile de las tecnologías requeridas para explorar, explotar, procesar, refinar, utilizar, y comercializar los minerales de los yacimientos chilenos, sus subproductos y coproductos, así como almacenar, disponer, recuperar, o usar los desechos, logrando que la *minería del cobre en su conjunto* sea un negocio sustentable para el país en el largo plazo. El desarrollo de la economía circular cobra gran importancia en este enfoque, ya que está íntimamente relacionada con la meta de producir cobre en forma sustentable, y en particular, de reducir su huella de carbono.

Este trabajo analiza estas vulnerabilidades, identificando oportunidades, así como costos y beneficios de aplicar determinadas soluciones técnicas, ambientales, y económicas en la industria regional del cobre.

En forma preliminar, se identifica numerosas oportunidades, las que son evaluadas en este trabajo. Algunas de estas son: Primero, construir una nueva fundición refinería (F-R) en la región que sea sustentable. Segundo, que esta instalación genere renta económica para su dueño, y para la sociedad. Tercero, que esta instalación opere con los mejores indicadores ambientales que se registran a nivel global, en cuanto a captura de anhídrido sulfuroso y otros elementos. Cuarto, diseñar este nuevo complejo para que sea carbono neutral en el corto plazo. Quinto, utilizar los conceptos de la economía circular para reutilizar los residuos, o alternativamente, disponerlos en forma segura. Sexto, usar esta instalación como laboratorio de investigación para nuevos procesos de tratamiento de concentrados.

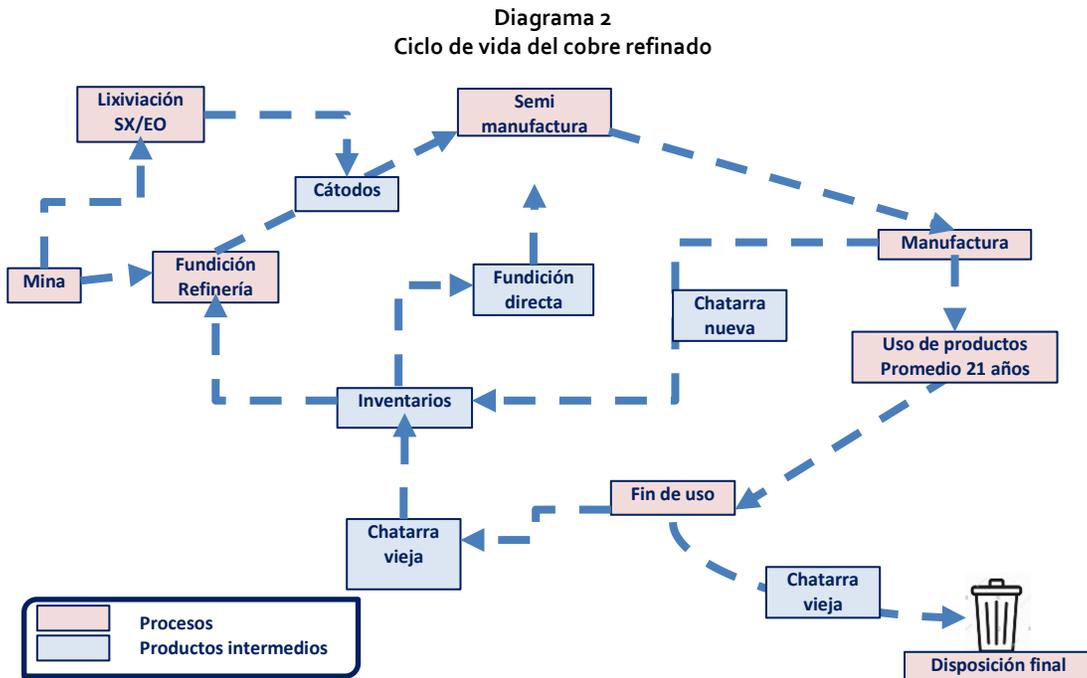
Por último, el análisis de la chatarra de cobre que es alimentada a fundiciones de cobre es importante por cuanto ello sería un factor clave en el futuro en el abatimiento de las emisiones de carbono de la minería del cobre. Ello porque la energía requerida para fundir y refinar cobre es muchísimo mayor para el cobre de mina que para la chatarra de cobre, y, por ende, esta última es el principal sustituto del cobre de mina en el contexto de lograr carbono-neutralidad. La energía requerida para fundir y refinar cobre es entre 6 y 7 veces menor que la energía requerida para producir cátodos a partir de cobre de mina (BIR, 2008).

El 15,5% del cobre refinado provenía, en 2020, de chatarra que es refinada. Una parte de esta chatarra proviene de productos que terminaron su uso y por ello se denomina chatarra vieja. El resto de la chatarra vieja tiene tres destinos (Glöser et al, 2013; ICA, 2013). El primero es alimentar la chatarra denominada de fundición directa, que no requiere nueva refinación, el segundo es almacenarla esperando un mejor precio, y el tercero es enviarla a botaderos en diversas partes del mundo, ya que identificarla, separarla, transportarla y refinarla no resulta rentable.

La fundición y refinación es seguida por la semi manufactura, por la manufactura, por el uso de los productos de cobre, por el fin de uso y por la selección de la chatarra que vuelve al ciclo productivo y aquella que prosigue a botaderos o a inventarios, en reserva para tiempos de precio alto. El diagrama 2 muestra un ciclo de vida simplificado del cobre refinado.

La industria semi manufacturera fabrica tubos, cañerías, alambres, cables, planchas y otros productos que son posteriormente vendidos a los consumidores finales, tales como los fabricantes de automóviles, de vehículos en general, de bienes electrónicos (computadores, celulares, y otros), de línea blanca, de motores, turbinas de avión, transformadores, de compañías distribuidoras de energía, intercambiadores de calor, etc.

No existe contabilidad exacta de cuanta chatarra vieja de cobre termina en botaderos cada año, por lo que el flujo que retorna al mercado de refinado después de su uso se puede solamente estimar.



Fuente: Elaboración propia.

El flujo de la chatarra de cobre indicada en el diagrama 2 fue complementada con el trabajo del Instituto Fraunhofer (Glöser et al., 2013), el que es analizado en la sección II.C.

Dada la realidad actual y las tendencias observadas en la minería del cobre, este trabajo asigna el énfasis principal al análisis del mercado de los concentrados y al negocio de las Fundiciones y Refinerías.

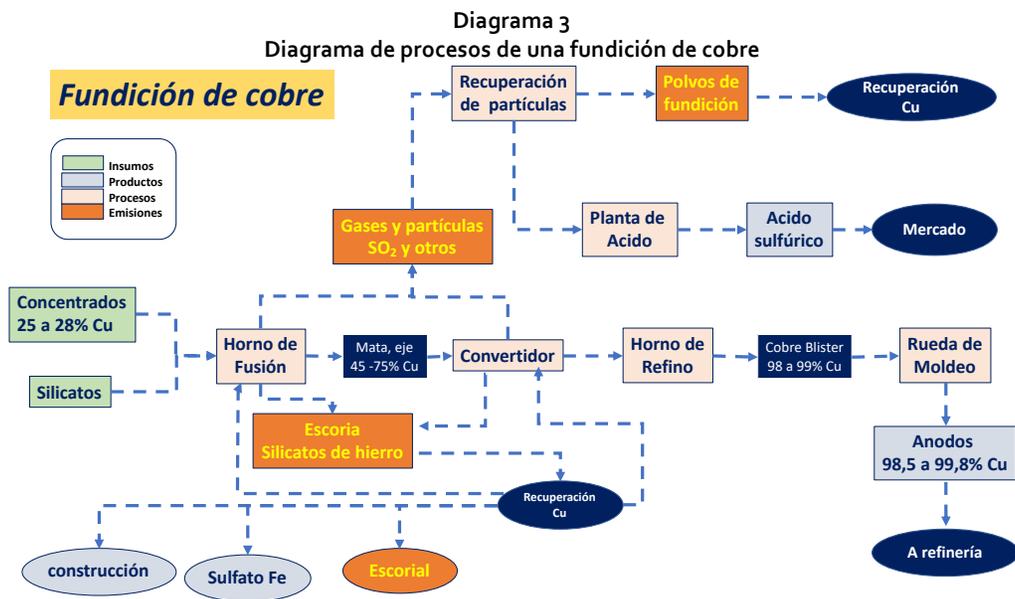
Una forma de abordar las vulnerabilidades mencionadas es construir nueva capacidad de fusión y refinación en América Latina. Esta alternativa será analizada en este trabajo tanto desde la perspectiva económica como de sus implicancias ambientales, sociales, y tecnológicas.

La sección I de este documento trata sobre las alternativas tecnológicas de procesamiento de minerales y concentrados, con énfasis en estos últimos. La sección II aborda el mercado de concentrados y de materiales secundarios. La sección III aborda el análisis técnico económico de una fundición y refinería. La sección IV analiza la cadena de valor de la minería, mientras que la sección V trata la sustentabilidad de fundiciones y refinerías. La sección VI contiene un modelo de negocios propuesto para incentivar el resurgimiento de la exportación de cobre refinado. La sección VII contiene las conclusiones y recomendaciones.

I. Tecnologías de procesamiento de concentrados

A. Procesos en una fundición

El proceso productivo de una fundición sigue el esquema de una transformación química en que el concentrado, que contiene cobre, hierro y azufre, reacciona con aire enriquecido con oxígeno a alta temperatura, para dar óxidos de hierro (escoria), dióxido de azufre (SO₂) y cobre. Este proceso se desarrolla en tres etapas consecutivas: fusión, conversión y refinación como se muestra en el diagrama 3. Estas etapas se diferencian sólo en las características de como logran la oxidación, pero en todos los casos el proceso químico es el mismo.



Fuente: Elaboración propia.

Fusión. La etapa de fusión en alguna medida define la identidad de la fundición, donde el tipo de reactor genera las principales condiciones operacionales de todo el complejo. El desarrollo tecnológico de estos reactores ha sido determinado por exigencias claramente establecidas: lograr eficiencia energética, y minimizar, e idealmente eliminar, los impactos ambientales.

El primer paso en el desarrollo tecnológico de los hornos de fusión fue reemplazar la fusión de concentrados realizada en hornos de reverbero y hornos eléctricos, los que usaban energía de combustibles fósiles y energía eléctrica. Los primeros desarrollos de tecnologías alternativas corresponden a los hornos de fusión Outokumpu en Finlandia e INCO en Canadá. Estos hornos, conceptualizados en la década de los años 60, logran la oxidación del concentrado en un quemador, equivalente a un quemador de carbón. Otra interesante condición de estos reactores, denominados "hornos flash", es que canalizan la totalidad del SO₂ generado con objeto de neutralizar el azufre, eliminando por completo las emisiones de SO₂ al ambiente. Esta tecnología se consolidó al mismo tiempo que la tecnología de plantas de oxígeno se hizo más abordable, lo que permitió aumentar la eficiencia energética de la oxidación, con el enriquecimiento con oxígeno del aire de proceso.

En paralelo a estos desarrollos surgieron también otras tecnologías que en menor o mayor medida son hoy retadoras a la fusión flash, la que es la indiscutida "*Best Available Technology*" (BAT, o *mejor tecnología disponible*) del mercado. El Convertidor Teniente (Chile, Codelco) y el Reactor Noranda (Canadá, Noranda, hoy Glencore), íconos de los denominados hornos de "fusión en baño", están entre los primeros que se consolidaron para modernizar las fundiciones como alternativa a los hornos flash, con costos de inversión y operación menores. Éstos soplan aire e inyectan concentrado directamente en la fase fundida, no habiendo entre ellos mayores diferencias técnicas.

Tanto los hornos flash como los reactores Convertidor Teniente (CT) y Noranda, requieren de concentrados secos. En la perspectiva de evitar el secado de concentrados y sus costos asociados, en la última década llegaron al mercado tecnológico hornos que no la requieren permitiendo al mismo tiempo aumentar el contenido de O₂ en el aire para la oxidación. Los principales reactores de fusión añadidos son los *Top Submerged Lance (TSL)* y los reactores chinos de soplado por el fondo, *Bottom Blowing*, ambos clasificados como reactores de fusión en baño.

Los reactores TSL se desarrollaron en Australia entre los años 70 y 90 para el tratamiento de diferentes tipos de cargas, en particular para la reducción de escorias. La lanza equipada en este reactor puede ser empleada como quemador de combustible para fundir una primera carga, como lanza reductora o como lanza para inyectar oxígeno en el baño y lograr las oxidaciones que se requieren en el procesamiento de concentrados de cobre. El desarrollo impulsado por CSIRO dio lugar a dos reactores virtualmente iguales: AUSmelt e ISASmelt, actualmente AUSmelt es comercializado por Outotec y ISASmelt es comercializado por Glencore Technologies.

Por otra parte, los *Bottom Blowing Reactors* o *Furnaces (BBR o BBF)* se introdujeron en 2015. Son de gran similitud al reactor Noranda y CT, salvo que la inyección del gas enriquecido se realiza a una velocidad muy superior a la que se inyecta en el caso del CT o Reactor Noranda, lo que determina mejoras en el proceso.

Actualmente la capacidad de fusión instalada se distribuye en un 55% con reactores flash, y 35% en fusión en baño, notándose en este grupo un paulatino aumento de los reactores TSL y BBR en desmedro de una retirada de los tradicionales CT y reactor Noranda, y muy particularmente una marcada retirada del mercado del CT. Esto se explica porque ningún reactor de fusión en baño tiene la misma capacidad de captura de SO₂ ni la eficiencia de recuperación de energía que un horno flash. Los reactores Noranda, sin embargo, han sido desarrollados para capturar más azufre hasta la fecha de esta publicación, cuestión que no ocurrió con los reactores CT desde 2005, ya que Codelco decidió abandonar su desarrollo.

Conversión. La etapa de conversión continúa con la oxidación selectiva del hierro y azufre a partir del producto de la etapa de fusión. En este caso la tecnología dominante es la de los convertidores Pierce Smith (CPS), cuyas características tecnológicas no se han modificado desde sus inicios en el año 1900. Hoy procesan del orden de 90% del cobre producido en las fundiciones. Su condición de operación abierta a la atmósfera y discontinua son la principal fuente de emisiones contaminantes de todo el proceso productivo, por lo que se han desarrollado reactores alternativos que han ido paulatinamente reemplazando los tradicionales CPS. Entre éstos, el convertidor flash, el que responde de mejor manera a los requerimientos de control medioambiental al tener las mismas características que el reactor de fusión con una captura de la totalidad de los gases generados en el proceso. También, pero de manera menos clara, los reactores TSL están proponiendo su aplicación a la etapa de conversión. Hay que agregar, sin embargo, que el uso de reactores flash en conjunto de con CPS es utilizado en numerosas fundiciones del mundo, habiéndose logrado altas recuperaciones de azufre y otros contaminantes aéreos, llegando a capturar hasta 99,9% de estos elementos. Así ocurre en las fundiciones de Huelva en España, de Aurubis en Alemania, y de Guixi en China.

Refinación. La última etapa de las operaciones de una fundición corresponde a un ajuste de los contenidos de azufre y oxígeno disuelto en el cobre, lo cual se realiza en todas las fundiciones en hornos basculantes previo al moldeo de los ánodos.

1. Procesos continuos en una fundición

Para la optimización energética y medioambiental de una fundición resulta de interés tender a procesos de fusión y conversión en los que la oxidación en la fusión y la conversión se hagan en forma continua y permanente, esto es que el caudal de oxígeno para la oxidación se mantenga constante y sin interrupciones en el tiempo. Esta óptima condición operacional choca con las características de los CPS, reactor más utilizado en la etapa de conversión, pero que tiene una operación batch.

La primera solución a esta condición fue el proceso Mitsubishi que emplea un reactor de fusión con lanzas de soplado e inyección de concentrado que operan sobre el baño. Este reactor alimenta gravitacionalmente y en forma ininterrumpida un reactor decantador donde se separa la escoria y la fase rica en cobre, la que sigue fluyendo en forma continua hasta el convertidor. Tanto la etapa de fusión y conversión tienen un flujo continuo de SO_2 que es canalizado hacia la planta de ácido sulfúrico, manteniendo una operación estable que facilita tener una máxima captura del SO_2 producido.

Una segunda opción conocida como "doble flash" considera la fusión y la conversión en hornos flash. En este caso la fusión genera un material que se acopia y se alimenta a la etapa de conversión que opera en forma continua. Es esta la configuración óptima para nuevas fundiciones, pero la inversión resulta ser la más cara frente a otras alternativas. Si bien el objetivo de maximizar la captura de SO_2 se ve facilitado por las operaciones continuas y el uso de tecnología flash para fusión y conversión no se debe dejar de tener presente, como ya se mencionó anteriormente, que hay fundiciones que con una configuración tradicional del tipo Flash - CPS o Reactor de fusión en baño - CPS logran estándares de captura sobre 99% (Aurubis Hamburgo, y la mayoría de las fundiciones japonesas). Esto indica claramente que, si bien el factor tecnológico es de alta importancia, la gestión operacional es una herramienta importantísima. No se puede plantear a priori que una configuración u otra garantice la máxima captura de SO_2 .

En relación a los consumos energéticos de una fundición, se debe evaluar la energía eléctrica de uso principalmente para el movimiento de gases, y los consumos de combustibles fósiles como soporte térmico. La combinación de diferentes tecnologías para establecer el flowsheet de una fundición fue analizada por Coursol et al. (2015), obteniendo consumos energéticos para diferentes rutas de procesamiento (cuadro 1).

Cuadro 1
Comparación de consumo de energía para la producción de cobre (concentrado a ánodo),
para tecnologías seleccionadas de fundición de cobre

| Ruta de procesamiento | Energía por tonelada de ánodos | | | Energía Eléctrica | Energía Fósil |
|--|--------------------------------|--------------------|------------|-------------------|---------------|
| | Energía Eléctrica (MJ) | Energía Fósil (MJ) | Total (MJ) | | |
| Flash-Flash + flotación de escorias | 9 266 | 1 518 | 10 784 | 85,90% | 14,10% |
| TSL-PSC + tratamiento pirometalúrgico de escorias | 6 903 | 4 175 | 11 078 | 62,30% | 37,70% |
| Mitsubishi | 8 508 | 2 498 | 11 006 | 77,30% | 22,70% |
| Baño con alimentación seca + PSC + flotación de escorias | 10 088 | 2 657 | 12 745 | 79,20% | 20,80% |
| Baño con torta de filtro + PSC + flotación de escorias | 8 946 | 4 127 | 13 073 | 68,40% | 31,60% |
| BBR con torta de filtro + PSC + flotación de escorias | 9 263 | 2 370 | 11 633 | 79,60% | 20,40% |
| Promedio | 8 829 | 2 891 | 11 720 | 75,50% | 24,50% |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Coursol et al. (2015).

2. Concentrados de cobre en una fundición

Los concentrados alimentados a las fundiciones de cobre consisten en una mezcla de especies mineralógicas que contienen principalmente cobre (Cu), hierro (Fe) y azufre (S), elementos que se distribuyen en una proporción variable (cuadro 2). La variabilidad de los contenidos de estos elementos está determinada por las características geológicas y la etapa de explotación del yacimiento. A nivel mundial, el contenido de cobre promedio en los concentrados ha ido paulatinamente disminuyendo, estando actualmente en torno a un 28%, y se espera que este valor siga a la baja en los próximos años.

Cuadro 2
Concentración de Cu, Fe y S en concentrados

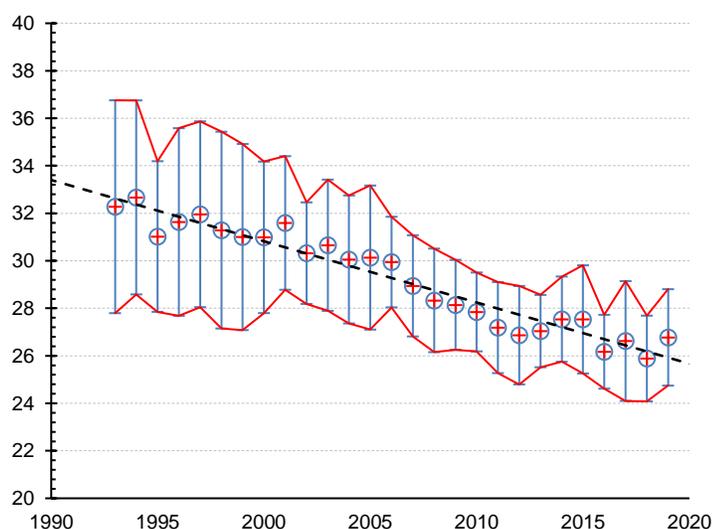
| Elemento | porcentaje en peso |
|-------------|--------------------|
| Cobre (Cu) | 22 – 35 |
| Hierro (Fe) | 20 – 30 |
| Azufre (S) | 28 – 36 |

Fuente: Elaboración propia.

Los tres elementos principales del concentrado (Cu, Fe y S) definen tres circuitos para el procesamiento de concentrados de cobre, independientemente de la tecnología utilizada.

El circuito de cobre, objetivo principal del procesamiento de concentrados, busca maximizar la recuperación de cobre desde el concentrado. Los circuitos de hierro y azufre, son equivalentes en su análisis y se pueden considerar en un enfoque primario como residuos del proceso. La gestión de residuos implica costos asociados y en el contexto de los nuevos enfoques de economía circular de tender a procesos “cero residuos” se busca valorizar el SO₂ y los óxidos generados.

Gráfico 2
Variación del contenido promedio de Cu en concentrados
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Wood Mackenzie (2019).

Nota: El punto corresponde al promedio de ese año, y los extremos la desviación estándar.

Debido a su carácter contaminante, el SO_2 comenzó a recuperarse en forma masiva a partir de la década de los años 80 produciendo ácido sulfúrico, el cual dependiendo de su precio y comercialización puede significar un ingreso importante para el negocio de las fundiciones.

En el caso del hierro, sin embargo, en la mayoría de los casos produce un pasivo ambiental: la escoria. En las últimas dos décadas, y tal como se ha señalado previamente, se ha propiciado sin embargo su uso en diferentes aplicaciones para obras civiles, y se espera que esta tendencia se desarrolle en forma creciente.

Desde la perspectiva física, los concentrados consisten en partículas en torno a 50 micrómetros (0,005 mm de diámetro), y traen usualmente una humedad de 8% (Schlesinger et al., 2011). En la mayoría de las tecnologías de hornos de fusión el concentrado debe ser secado hasta alcanzar una humedad de 2%¹, e incluso menor a 0,5% en los convertidores Teniente y en los hornos Flash, de tal forma que su alimentación al horno de fusión, que está a una temperatura de 1.250 °C, logre la oxidación del hierro y del azufre con mínima energía para formar una fase fundida de azufre y cobre. El oxidante es usualmente oxígeno industrial o aire enriquecido con oxígeno, lo que requiere que haya una planta de oxígeno en la fundición. Al mismo tiempo se alimentan fundentes al horno, usualmente silicatos, los que reaccionan con el hierro formando escoria (silicato de hierro) con el mínimo de cobre posible. Estas dos reacciones son exotérmicas, lo que significa que, una vez comenzada la oxidación, se mantiene la temperatura sin necesidad del uso de combustibles. Las fases líquidas que se extraen del horno de fusión son escoria, con contenido de cobre entre 1 y 3%, y "Mata", "Eje" o "Metal Blanco", con contenido de cobre entre 45% y 75%, dependiendo del tipo de horno utilizado.

¹ Esto aplica para los hornos de fusión flash, y convertidores Teniente y Noranda, por ejemplo. Por otro lado, los hornos Isasmelt, pueden aceptar concentrados con humedades mayores, y los hornos TSL y BBF usan concentrados directamente desde el filtro de la planta concentradora, con una humedad de alrededor de 8%, para eliminar el costo del secado previo.

A continuación, la mata es transportada en fase fundida desde el horno de fusión al convertidor (ver diagrama 3), el que también usa aire enriquecido con oxígeno como oxidante para continuar con la oxidación selectiva del hierro y azufre y separarlos del cobre mediante estas reacciones exotérmicas, las que garantizan mantener todo el sistema fundido. El convertidor produce cobre de pureza de aproximadamente 98,5%, llamado cobre blíster. La escoria producto del convertidor tiene alto contenido de cobre (8 a 12% en el caso del convertidor Peirce Smith) debido a los procesos de mezcla que ocurren en este reactor. Ello significa que la escoria del horno de fusión y del convertidor es enviada normalmente a un proceso posterior en que se recupera el cobre, como plantas de flotación de escorias (fundiciones Chuquicamata, Altonorte, Potrerillos y Caletones) y hornos de limpieza de escorias (fundiciones Hernán Videla Lira, Chagres y Ventanas).

En Chile hay tres tipos de hornos de fusión, el Convertidor Teniente (CT) presente en 2020 en 4 de las 7 fundiciones (Caletones, Ventanas, Hernán Videla Lira (HVL), y Potrerillos), el horno Flash (FF) presente en las fundiciones de Chagres y Chuquicamata, y un convertidor Noranda (CN), en la fundición de Altonorte. Todas estas fundiciones, así como sobre el 90% de las fundiciones del mundo, tienen convertidores Peirce Smith.

Finalmente, el cobre blíster es refinado a fuego con objeto de remover oxígeno y azufre remanente y poder moldear ánodos delgados (40 a 50 mm de espesor) con superficie plana (aproximadamente de 1 m de alto y 1 m de ancho), los que son enviados a la refinería electrolítica (Schlesinger et al., 2011). La pureza de los ánodos de cobre está en el rango de 98,5 a 99,8% de cobre.

Los concentrados de cobre contienen, además de cobre, numerosos subproductos, incluyendo, en muchos casos, oro, plata, platino, paladio, selenio, telurio, molibdeno, cinc, níquel, galio, rodio, renio, rutenio, antimonio, cobalto, germanio, indio, y estroncio (Manríquez-Mujica, 1997). Algunos de estos elementos se encuentran a nivel traza (Rui Liu y Jianxing, 2020). Algunos yacimientos, como el de Olympic Dam en Australia, presentan abundancia de otros elementos, incluyendo varios de la serie lantánidos y varios elementos radioactivos incluyendo uranio, torio, polonio, y otros.

Los subproductos de la minería del cobre son recuperados en diversas partes de la cadena de procesamiento e incluyen, además de los elementos mencionados, el ácido sulfúrico, las escorias y otros productos menores.

Como ejemplo, el molibdeno y el germanio se recuperan tempranamente, en celdas de flotación selectiva, siendo separados del concentrado de cobre. Otros elementos siguen en el concentrado de cobre, ingresan a la fundición y siguen a la refinería electrolítica para terminar en los barros anódicos y precipitados formados durante el proceso de electrorefinación. Estos elementos prosiguen a una planta de metales nobles en donde se extraen el oro, la plata, el platino y el paladio, y posteriormente se separa el selenio el telurio y los otros elementos mencionados. La planta Recuperadora de Metales SpA de LS-Nikko Copper ubicada en Mejillones, región de Antofagasta, está diseñada para recuperar hasta 5 toneladas de oro, 500 toneladas de plata, 150 kg de paladio, 10 kg de platino, 200 toneladas de selenio, 20 toneladas de telurio y 1.600 toneladas de sulfato de cobre (PRM, 2013).

Las fundiciones y refinerías pagan a las minas que les venden el concentrado el contenido de algunos de estos subproductos (Au, Ag, Pt, Pd y otros), siempre que se encuentran presentes en concentraciones mínimas establecidas. Se paga también una determinada recuperación que es menor a 100%. Las fundiciones y refinerías ganan si recuperan más que lo pagado y, además, pueden usar tecnologías propias para recuperar los elementos que no se pagan. El molibdeno no se recupera en las fundiciones, y por ello no se paga en los contratos de concentrados ya que se supone que, si la concentración de molibdeno es importante, la mina debería tener una planta de recuperación del molibdeno anterior a suministrar el concentrado a la fundición.

Los ingresos y costos de una fundición serán tratados en profundidad en la sección II.A.3. Es importante señalar aquí, sin embargo, que tratar impurezas puede ser un negocio rentable para las fundiciones que tienen las tecnologías para hacerlo.

Los concentrados también contienen impurezas (ver cuadro 3) de elementos que son penalizados por las fundiciones de acuerdo a la concentración que presenten en los concentrados. Este aspecto es abordado en la sección III.A.

B. Emisiones y residuos de las fundiciones

Las principales emisiones y residuos de una fundición son los gases que pueden ser emitidos a la atmósfera (principalmente SO_2), partículas con contenido de metales tóxicos tales como el arsénico y el plomo, y las escorias, las que pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones y también pueden almacenarse en escoriales.

1. El anhídrido sulfuroso, SO_2

Los gases emitidos del horno de fusión, de los convertidores y de los hornos de refino (diagrama 3), son captados por instalaciones especiales, con objeto de extraer el polvo, y neutralizar el azufre, el arsénico y otros contaminantes, que de otra manera serían emitidos a la atmósfera.

Los convertidores Peirce Smith generan SO_2 de baja concentración, los que son más costosos de procesar. Tecnologías más modernas con la integración de la fusión y conversión han superado este problema.

El gas más comúnmente emitido de estos hornos es el anhídrido sulfuroso (SO_2), el que es dañino para la flora, la fauna y para los seres humanos. Además, el SO_2 reacciona con el agua de la atmósfera para formar ácido sulfúrico, acidificando la atmósfera y la superficie del suelo, las ciudades, poblados, infraestructura, etc.

Por ello el SO_2 cuenta con normas de calidad primaria (para la salud humana) y secundaria (para la naturaleza). La norma de calidad primaria chilena para el SO_2 fue modificada en mayo 2019 mediante el Decreto Supremo 104, posterior a la dictación del DS 28 de 2013, que reguló las emisiones de las fundiciones. La lógica indica que el proceso debiera haber sido al revés, ya que una norma de emisión se calcula para satisfacer una norma de calidad y no al revés. En todo caso, el DS 104 fija una norma bastante menos exigente que las guías de la OMS y que el Estándar de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Este aspecto será discutido en la sección correspondiente al medio ambiente.

La primera etapa en la captura de gases consiste en enfriarlos, preparándolos para la precipitación electrostática de los polvos de fundición. Ello se realiza en un reactor que transforma el calor en vapor y recupera el calor. Una fracción del polvo precipita (aproximadamente el 70% del total) al enfriar el gas de proceso. Después de enfriados, los gases de fundición pasan por precipitadores electrostáticos los que remueven más del 99% de los polvos. Los polvos de fundición contienen cobre e impurezas, y pueden ser recirculados a la fundición o bien tratados mediante métodos hidrometalúrgicos. Esta última opción es mejor ya que la primera concentra impurezas en los procesos de fusión.

Después del precipitador electrostático los gases son preparados para la formación de ácido sulfúrico. Ello se hace principalmente en plantas de ácido sulfúrico de doble contacto, o doble absorción, las que pueden recuperar hasta el 99,7% de SO_2 (Schlesinger et al., 2011). Existe tecnología actualmente para elevar la recuperación de SO_2 a 99,9%.

Primero, los gases son enfriados más de tal forma que el polvo residual sea removido y no afecte los catalizadores de la fabricación de ácido sulfúrico. Este enfriamiento permite absorber impurezas como HCl, HF, SO_3 , y otras impurezas tales como As_2O_3 . Posteriormente el gas se enfría hasta 35 a 40°C antes de ingresar a precipitadores de neblina en donde se precipitan gotas de líquido residual. Después, el gas sigue

sometiéndose a enfriamiento, para ser secado en un reactor que contiene un filtro cerámico. El proceso de transformación del SO₂ a ácido sulfúrico que sigue tiene muchas etapas, en que una de las últimas consiste en el uso de catalizadores de la oxidación, sin los que el proceso sería muy lento.

El ácido sulfúrico producido tiene concentraciones que van desde 93 a 98%. Los reactores de fusión modernos, incluyendo los hornos Flash, Isa Smelt, reactores Bottom Blowing (de origen chino), Convertidor Teniente, Sumitomo, y otros producen gas SO₂ en concentraciones "altas" en comparación con hornos de tecnología más antigua, como los de reverbero. Ello tiene ventajas para la producción de ácido sulfúrico. Los gases que entran a la torre de secado tienen, típicamente, 18% de SO₂, que es un compuesto de gases de baja concentración provenientes de los convertidores Peirce Smith y de los de alta concentración provenientes de los procesos de fusión directa y continua.

La recuperación de ácido por parte de una fundición es un ingreso muy importante usualmente, ya que el precio de venta del ácido sulfúrico excede el costo de producirlo, el que es, de todas formas, ineludible, debido a las normas ambientales. Sin embargo, en algunos casos, como en China, la producción de ácido sulfúrico local es tal, que su mercado interno no es capaz de absorberla, lo que ha terminado en su exportación a precios muy bajos, cercanos al costo de transporte. Ello ha favorecido las importaciones de ácido de Chile desde dicho país. Este tema se desarrolla en mayor profundidad en la sección II.C.

2. Otros elementos contaminantes

La diferenciación entre un concentrado "limpio" y uno "complejo" está caracterizado en el cuadro 3, el que muestra las penalizaciones (US\$/tonelada) a nivel global para distintos contaminantes. Ello significa que un concentrado vendido por una compañía minera a una fundición debe pagar extra por concentraciones de elementos que sean superiores a lo indicado en la columna 2 del cuadro 3², "Límite para aplicar penalidad". Ello significa también que un concentrado que tiene menos de 0,2% de arsénico y 0,6% de plomo, y que no tiene concentraciones de los otros elementos del cuadro 3, es considerado un concentrado "limpio".

Cuadro 3
Castigo por impurezas en concentrados

| Elemento | Límite para aplicar una penalidad (en porcentajes) | Penalidad 2019 (en dólares/tonelada de concentrado) |
|-----------|---|---|
| Arsénico | 0,2 | 2 a 3 por 0,1% de As hasta 0,5% As. Posteriormente ver escala cuadro 6 |
| Antimonio | 0,1 | 4 por 0,1% Sb |
| Cinc | 2,5 | 1,5 a 2,0 por 0,1 Zn |
| Plomo | 0,6 | 0,2 por 0,1% de Pb |
| Mercurio | 0,001 | 2 por 0,001% de Hg |
| Bismuto | 0,01 | 3 por 0,01% de Bi |
| Cloro | 0,05 | 0,5 por 0,01% de Cl |
| Flúor | 0,03 | 0,1 por 0,001% de F |

Fuente: Elaboración propia en base a Menzies (2019).

Chile y Perú tienen numerosas minas con concentrados excediendo algunos de los valores de la columna 2 del cuadro 3. Perú tiene depósitos polimetálicos en que el plomo y el cinc son productos principales. Ninguna de estas impurezas es tan relevante en las minas chilenas y peruanas como el arsénico.

Aproximadamente el 80% de las reservas de mineral de sulfuro de cobre se encuentran en depósitos de pórfido y casi la mitad de estas reservas contienen minerales con contenido de arsénico (Schwartz, 1995). En términos de operaciones, actualmente alrededor del 60% de todas las operaciones mineras de cobre en

² La sección III.A incluye una tabla más detallada de la penalización del arsénico.

el mundo producen concentrados con algún nivel de arsénico (Wood Mackenzie, 2016). La mitad de ellos (el 30% de la producción mundial) contiene más del 0,1% o 1.000 ppm de arsénico.

Según datos de Wood Mackenzie (2015), había 3,1 millones de toneladas de concentrados que contenían más de 1% de arsénico (considerado muy alto), y estos provenían de seis minas. Chuquicamata y Ministro Hales en Chile (58,1%), Toromocho y El Brocal en Perú (37,9%), y un 4% proveniente de minas en otras partes del mundo. Al mismo tiempo, el arsénico es un problema más general ya que en 2015 un 21% de las minas a nivel global reportaron generar concentrados con más de 0,2% de este elemento.

La presencia de Chile en concentrados de alto contenido de arsénico ha hecho que el país se haya especializado en tratar y disponer el arsénico, y ello representa una oportunidad para hacerse cargo de este contaminante, al menos en el cono sur, donde están situadas el 96% de las minas de las minas con alto contenido de arsénico.

3. Escoria

La escoria podría ser comercializada para ser usada como material de construcción de caminos y otra infraestructura, y otras aplicaciones como herramientas abrasivas, gránulos para techos, herramientas de corte, tejas, balasto de ferrocarril, entre otras (Pavez et al., 2019; Nazer et al., 2010; Shi et al., 2008; Rajeeth et al., 2020; Dey et al., 2014; Pitroda y Raval, 2019). La escoria en Chile es depositada usualmente en escoriales, o botaderos diseñados para este propósito.

El Ministerio de Obras Públicas de Chile anunció la autorización por parte del Laboratorio de la Dirección de Vialidad del MOP Región de Valparaíso, para la utilización de la escoria procedente como infraestructura para caminos, y en particular la escoria de la fundición Ventanas (MMA, 2015). La misma fuente señaló que la autoridad de salud sostuvo que “es importante decir que es un residuo no peligroso, que está catalogado como no peligroso, pero que, sin embargo, la normativa vigente nos exige un plan de uso que cumpla con ella, donde también por salud ocupacional los trabajadores usen los elementos de protección personal adecuado, para poder evitar daños de la salud que pudiera producirse por la remoción y el uso de esta escoria o este pasivo ambiental”. Por otro lado, en 2015 se realizaron pruebas para el uso de escorias de la fundición de Chagres como estabilizador en la construcción del tramo Panquehue de la ruta CH 60.

Cabe agregar que numerosos países, incluido Alemania y China (ICA, 2021; Peute Baustoff, 2021), permiten el uso de la escoria en la construcción de caminos dependiendo de la concentración de elementos tóxicos que esta contenga. De acuerdo con Nazer et al. (2005), algunos países han regulado el empleo de finos de escorias como aditivo para el cemento basado en normas DIN, BS y ASTM, entre otras. De acuerdo con un estudio de Análisis de Ciclo de Vida desarrollado por Aurubis (2020a), se determinó que al sustituir un 20% de cemento Portland por escoria (polvo y gránulos de silicato de hierro), en una mezcla de un millón de toneladas de cemento usada en la construcción de un camino, se lograba una disminución de emisiones GEI equivalente a 170.000 toneladas de CO₂.

C. Procesos en una refinera electrolítica

Las refineras electrolíticas concitan menos atención pública que las fundiciones, pero su rol es esencial en la producción de cátodos de buena calidad, de uso eficiente de la energía, y de bajo costo.

Los ánodos provenientes de la fundición se colocan en una celda electrolítica que contiene un cátodo de dimensiones de alto y ancho levemente superior a la del ánodo. Ánodo y cátodo están ubicados verticalmente y separados por unos 50 mm. El cátodo es inicialmente una placa delgada de acero inoxidable (1 a 10 mm de espesor). Una celda contiene aproximadamente 40 a 50 pares ánodo – cátodo.

La celda contiene una solución denominada electrolítica que está a una temperatura de 60 a 65°C, contiene ácido sulfúrico (150 a 200 kg/m³) y cobre (40 a 50 kg/m³).

Al aplicar una diferencia de potencial o voltaje de unos 0,3 voltios entre el ánodo y el cátodo, se genera una corriente eléctrica que es proporcional a la depositación de cobre en el cátodo y que causa la disolución electroquímica del cobre en el ánodo. El cobre metálico pasa a ser un catión (ión), el que es transportado por el campo eléctrico en el electrolito desde el ánodo hasta que se deposita en el cátodo, pasando de ser un catión a cobre metálico. Mientras mayor es la densidad de corriente menor es el tiempo de la electrólisis, contribuyendo a reducir el inventario de cobre que está en la refinería. Densidades de corriente usuales están entre 240 y 350 A/m², y se ha realizado mucha investigación sobre el aumento de esta variable, pero no hay métodos que puedan superar los valores mencionados. Un aumento indebido de la densidad de corriente usualmente reduce la eficiencia de corriente, influyendo en la calidad de los cátodos. La eficiencia de corriente se define como la corriente utilizada para depositar cobre dividida por el valor teórico de dicha corriente.

El voltaje de la celda y la eficiencia son claves en el uso de energía de una planta de refinación, la que está entre 300 y 400 kWh/t de cobre producido. Otro aspecto clave en el manejo de una refinería es lograr uniformidad de la temperatura del electrolito, el que debe estar circulando lentamente en cada celda, ya que la eficiencia de corriente se reduce fuertemente cuando hay grandes variaciones de la temperatura del electrolito.

El cobre depositado en el cátodo es de alta pureza, conteniendo aproximadamente 25 ppm de oxígeno (0,0025%) y menos de 65 ppm (0,0065%) de otras impurezas. Este es el cátodo tradicional grado A de amplia aplicación en los mercados, que es usado en aplicaciones eléctricas o cualquier otra, excepto en aplicaciones de alta demanda electrónica. Estas requieren cobre aún más puro, libre de oxígeno y con impurezas menores a 5 ppm (0,0005%), el que debe ir a un proceso posterior de purificación, donde el cátodo grado A es usado como ánodo en una nueva refinación electrolítica.

Una refinería electrolítica contiene hasta 2.600 celdas electrolíticas (Chuquicamata), dependiendo este número de la capacidad de producción de la refinería. El proceso para producir un cátodo que pesa entre 50 y 80 kg, formándose uno a cada lado de la placa madre de acero inoxidable, dura entre 6 y 12 días, al cabo de la cual el cátodo es extraído con una grúa de la celda electrolítica y llevado a una instalación en donde el cobre depositado es separado mecánicamente del acero inoxidable de la placa madre. Posteriormente, el cátodo puede ser transformado a formas físicas diversas o mantenido tal cual con objeto de ser vendido a clientes finales para su uso en semi manufactura o manufactura. La extracción de cátodos de la refinería no detiene el proceso debido al alto número de celdas existentes. Por ello el proceso es considerado como continuo.

El ánodo tiene inicialmente un peso entre 330 y 420 kg y se mantiene en el proceso hasta que llega a pesar entre 12 a 18% de su peso inicial. Ello significa que los ánodos tienen un ciclo de vida superior al cátodo. El ánodo final es extraído de la celda y enviado a la fundición para su reprocesamiento.

Una parte de las impurezas que contiene el ánodo precipita al fondo de la celda, en lo que se denomina barro anódico. Entre estos elementos están el oro, el platino, la plata, el paladio, el selenio, el telurio, y otros. Las refinerías producen una amplia gama de cantidades de barro anódico por tonelada de cobre producido (entre 2 y 8 kg de barro anódico/t de cátodo). La gran diferencia se justifica por la diversa composición de los ánodos.

Otras impurezas contenidas en el ánodo, también se desprenden del ánodo y se disuelven parcialmente en el electrolito, pero no se codepositan en el cátodo debido a sus propiedades electroquímicas. Entre estos elementos están el arsénico, el bismuto, el cobalto, el hierro, el azufre, el níquel y el antimonio, los que pueden llegar a contaminar el cátodo mediante mecanismos de adherencia mecánica. Al mismo tiempo una fracción menor del cobre en el ánodo puede disolverse

químicamente en el electrólito, lo que aumenta la concentración de cobre en este. Ello requiere que el electrólito sea purificado en forma continua en celdas especiales en la misma refinería, extrayendo el cobre en exceso y eliminando las impurezas indicadas. El electrólito limpio es realimentado a las celdas de la refinería.

La calidad del cátodo depende también de la uniformidad de la superficie. Por ello se usan aditivos como la goma, cola animal o tiourea, los que tienen por objeto moderar los nódulos que pueden crecer en la superficie, y reducir el tamaño de grano del cobre depositado, logrando un depósito compacto e uniforme con bajas impurezas.

D. Tratamientos hidrometalúrgicos para concentrados

La lixiviación de concentrados de sulfuros de cobre ha sido considerada como una alternativa a la ruta pirometalúrgica habitual desde hace muchos años. Este interés es gatillado por los siguientes aspectos del tratamiento hidrometalúrgico.

- Mayor tolerancia a las impurezas, abriendo oportunidades para tratar concentrados complejos o de baja ley.
- Reducción o eliminación de emisiones gaseosas nocivas.
- Beneficios económicos de menor costo de capital y menor sensibilidad a la escala de producción.
- Aprovechamiento de inversión existente, específicamente instalaciones de extracción por solvente y electro obtención que estén quedando ociosas.

Sin embargo, también enfrenta algunos desafíos y su implementación a escala industrial han tenido un éxito limitado. Entre los desafíos cabe mencionar: la recuperación de cobre y metales preciosos inferior a los procesos pirometalúrgicos; competitividad de costos; mayores riesgos asociados a la implementación de nuevos procesos; y tratamiento y/o eliminación de residuos insolubles con énfasis en azufre.

1. Fundamentos de la lixiviación de concentrados de sulfuros de cobre

Las principales especies mineralógicas de sulfuros de cobre, presentes en los concentrados, son Calcopirita (CuFeS_2), Bornita (Cu_5FeS_4), Calcocina (Cu_2S), Covelina (CuS), además de las especies asociadas con arsénico como Enargita (Cu_3AsS_4) y Tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{AsS}_{13}$).

La lixiviación de concentrados consiste en someter los concentrados a un proceso en el cual se solubilizan las especies de cobre hacia una solución acuosa, desde la cual se puede recuperar posteriormente el cobre en la forma de cátodos de cobre, mediante operaciones típicamente de extracción por solventes (SX) y electrodeposición (EW).

La etapa de lixiviación es la más relevante por cuanto predetermina en gran medida la economía del proceso, dado que define el nivel de recuperación de la especie de interés, especialmente el cobre.

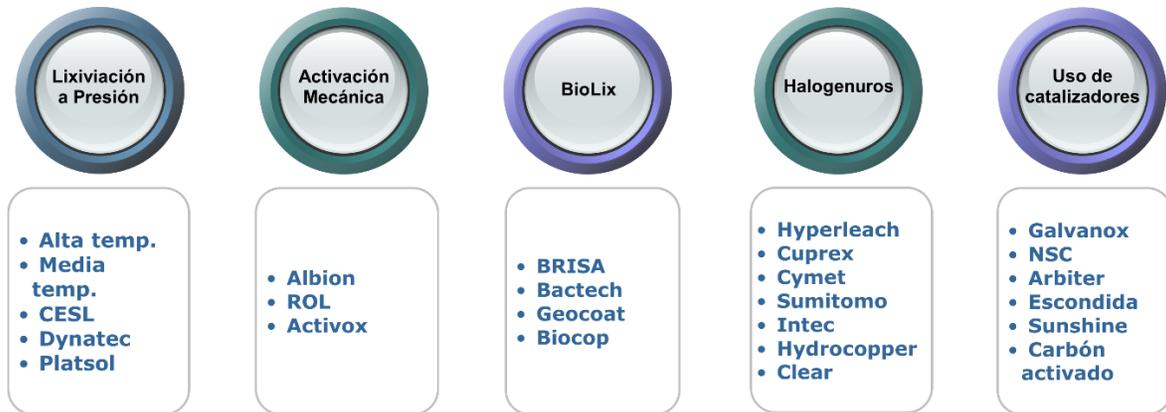
A diferencia de la lixiviación de especies de cobre oxidadas, la lixiviación de especies sulfuradas requiere la presencia de un agente oxidante, que modifique la forma en que se encuentra el azufre, permitiendo la solubilización de las especies metálicas. En general el elemento oxidante es el oxígeno del aire, y eventualmente usando intermediarios como el ion férrico, o acciones catalíticas para acelerar los procesos.

Los procesos que se definen para el procesamiento de concentrados, deben establecer los diseños y condiciones de proceso de manera que éste se desarrolle dentro de los parámetros cinéticos y termodinámicos, para que el proceso sea económica y técnicamente factible.

2. Tecnologías para el procesamiento de concentrados de cobre

Desde que se inició el interés por procesar hidrometalúrgicamente concentrados de cobre, muchos procesos han sido propuestos, basados en diferentes aproximaciones tecnológicas. El diagrama 4 resume la mayoría de los procesos hasta ahora estudiados.

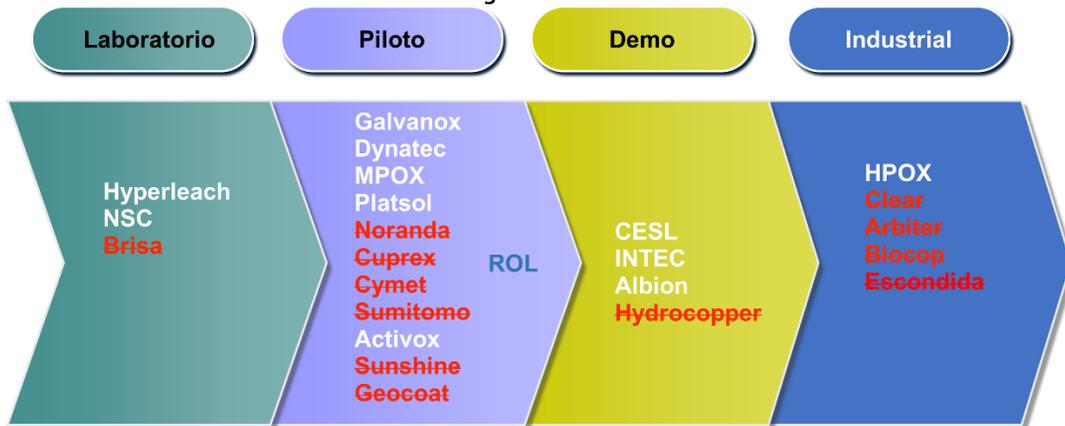
Diagrama 4
Procesos para el tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre



Fuente: Parra y Salas (2018).

De los procesos listados anteriormente, sólo algunos de ellos han logrado llegar a las fases de demostración o industrial, y muchos de ellos han sido descontinuados y ya no se encuentran en operación o no están siendo comercializados. En el diagrama 5, se esquematiza el nivel de desarrollo que han alcanzado las diferentes tecnologías, destacando que la única tecnología que permanece en operación industrial es la planta de Morenci en Arizona, EE.UU., de propiedad de Freeport McMoran.

Diagrama 5
Madurez de las tecnologías de lixiviación de concentrados



Fuente: Parra y Salas (2018).

Nota: Las tecnologías con los nombres tachados corresponden a opciones descontinuadas.

3. Análisis comparativo con las tecnologías pirometalúrgicas

En un análisis comparativo entre las dos rutas tecnológicas realizado para el International Copper Study Group (Parra y Salas, 2018), se estimó que:

- Desde el punto de vista económico, al evaluar una operación aislada de tratamiento de concentrados por el proceso HPOX a alta presión y temperatura, los costos de capital para la línea hidrometalúrgica resultan menores que los costos de capital para la línea pirometalúrgica. Mientras que los costos de operación son mayores para la línea hidrometalúrgica para escalas superiores a 100 kt/año de concentrados.
- Estos valores se ven modificados si la operación hidrometalúrgica se realiza integrada con una planta de tratamiento de óxidos o usa capacidades existentes de SX y EW, por la consiguiente reducción en los costos de capital, haciendo más atractiva la opción hidrometalúrgica.
- Desde el punto de vista energético, ambas líneas presentan consumos similares, con una leve ventaja para la línea pirometalúrgica (3.500 kWh/t Cu Piro vs 4.000 kWh/t Cu Hidro).
- En términos de recuperación de cobre, la línea hidrometalúrgica exhibe consistentemente recuperaciones comparables a la línea pirometalúrgica.
- En relación al procesamiento y recuperación de elementos menores considerados impurezas como el arsénico o el azufre, la línea hidrometalúrgica presenta ventajas porque permite el confinamiento del arsénico a la forma de escorodita, considerada como la especie más estable ambientalmente de arsénico. Sin embargo, el azufre presenta un desafío relevante, toda vez que hay que realizar la disposición de efluentes con ácido sulfúrico diluido o azufre elemental. Por ello, la integración con una planta de tratamiento de óxidos otorga ventajas comparativas a la línea hidrometalúrgica, al permitir usar el ácido sulfúrico diluido.
- En cuanto al procesamiento y recuperación de especies menores consideradas valiosas, como los metales preciosos, si bien se han postulado alternativas tecnológicas, la línea hidrometalúrgica aún no exhibe una tecnología estándar y aceptada para la recuperación de estos valores.

4. Conclusiones tratamientos hidrometalúrgicos para concentrados

En la opción hidrometalúrgica de tratamiento de concentrados, existe una amplia gama de alternativas tecnológicas, pero pocas han alcanzado la operación a escala industrial. Por tanto, la hidrometalurgia se percibe como una tecnología menos madura.

La economía de una planta de lixiviación de concentrados a alta presión depende de la escala y se ve fuertemente afectada por condiciones locales, como las capacidades existentes de SX-EW y el uso eventual de ácido sulfúrico diluido, que reducen los gastos de capital y operacionales. En base a esto, la hidrometalurgia se considera una tecnología que para los concentrados de cobre tiene aplicaciones en condiciones de nicho.

Sin embargo, debe considerarse que los procesos a presión ambiental siguen logrando nuevos avances, ofreciendo costos de capital sustancialmente reducidos, que eventualmente pueden desplazar el punto de competitividad entre la pirometalurgia y la hidrometalurgia.

II. Análisis del mercado de concentrados y materiales secundarios

Esta sección describe y analiza los mercados de concentrados y materiales secundarios (chatarra).

A. Mercados de concentrados

1. Introducción

Las fundiciones y refinерías de cobre son procesos industriales que tratan concentrados de cobre para transformarlos en cátodos, no poseen de por sí, ventajas comparativas naturales como los yacimientos, y su rentabilidad depende de la gestión, de las tecnologías utilizadas, de la calidad y costo de la mano de obra, y de los insumos tales como energías, combustibles y materias primas requeridos en su operación.

Los concentrados de cobre no son commodities, pues tienen una composición muy diversa tanto de metales valiosos y al mismo tiempo contienen elementos indeseados que se consideran contaminantes en concentraciones determinadas (cuadro 3).

La capacidad de almacenamiento de concentrados en el mundo es bien limitada, por cuanto estas instalaciones deben estar protegidas contra la lluvia y contra el viento para evitar que la humedad se desvíe de los valores aceptados en las transacciones (alrededor de 8% de agua, lo que se denomina concentrado húmedo³), y para evitar la contaminación de polvo de localidades vecinas, así como las pérdidas de material valioso. En 2020 se estima que los inventarios de concentrados tenían una vida media de entre 37 a 39 días, lo que corresponde a aproximadamente un 10% de la capacidad anual efectiva de fundición mundial, la que era 17,2 millones de toneladas de cobre contenido (Wood Mackenzie, 2020a). La baja capacidad de almacenamiento de los concentrados representa un serio

³ Versus concentrado seco, el que contiene 2% de agua.

desafío para las cadenas de suministro, las que estuvieron fuertemente amenazadas por la Pandemia del Covid 19 en 2020, y podrían estarlo en el futuro nuevamente.

2. Ingresos y costos de la producción de concentrados

Los productores de concentrados venden estos al valor del precio del cobre menos el valor de los cargos de tratamiento (fusión o TC) y refinación (RC), en su conjunto denominados TCRC.

Sus costos variables⁴ comprenden las remuneraciones, el costo de los contratos con terceros, combustible, energía, insumos⁵, TCRC, créditos por subproductos, costos de venta⁶, y otros. Sus costos fijos incluyen la depreciación, los intereses, y los costos financieros, incluidos la amortización.

Por ello sus utilidades antes de impuestos (UAI) están dadas por las ventas de concentrados y subproductos menos los costos totales, los que son iguales a sus costos variables y fijos.

Cuando estas compañías son competitivas, como en el caso de muchas minas en Perú, Chile, México y Brasil, sus utilidades son muy importantes, especialmente cuando el precio del cobre está en niveles medios y altos. Ello será discutido en mayor profundidad en la sección IV.

3. Ingresos y costos de fundiciones y refineras

Los ingresos fijos de una fundición incluyen los TC, los cargos por tratamiento de oro, plata y otros pocos elementos pagables, y los cargos por impurezas presentes en los concentrados. Para los elementos pagables se estipula una recuperación dada para el cobre, otra para el oro y diversas cifras para otros elementos. Si la fundición o refinera recuperan más de lo que pagaron se obtiene una ganancia. Si recupera menos, obviamente tiene una pérdida. Normalmente para un concentrado de 30% se pagaba en 2020 el 96,75% del cobre contenido, pero muchas fundiciones recuperaban 98% y más de cobre.

Los ingresos variables de una fundición incluyen las ventas de subproductos tales como ácido sulfúrico, otros elementos presentes en los barros anódicos fuera de los "pagables", la venta de elementos pagables como oro y plata cuando se obtienen recuperaciones superiores a las estipuladas en los contratos, la venta de escoria para diversas aplicaciones, y la energía recuperada de los procesos. Estos ingresos constituyen costos negativos. El uso de chatarra es un aspecto que otorga flexibilidad a las políticas comerciales de las fundiciones, pero desgraciadamente la chatarra tiene un mercado muy pequeño en Chile, a diferencia de China en donde es un mercado muy importante. La chatarra más usada en fundiciones chilenas consiste usualmente de ánodos de descarte de las refineras, una vez que estos alcanzan su vida útil. Ello obedece a que el proceso de electro refinación se realiza eficientemente cuando hay ánodos enteros desde los que se produce la disolución del cobre. Una vez que estos ánodos están ya gastados debido a su disolución, es más eficiente refundirlos para hacer ánodos enteros.

Los costos totales de una fundición incluyen costos directos, costos operativos aparte de los costos directos, y los costos fijos. Los costos directos incluyen costos laborales, la energía neta total (electricidad más combustible), la mantención, los consumibles, y otros costos del sitio. Una fundición que trata concentrados con impurezas tiene costos directos superiores a los costos de una fundición que trata concentrados limpios. Los costos de fabricación de ácido sulfúrico están también incluidos en los costos directos y, obviamente, son mayores, mientras mayor sea la captura de azufre. Entre los costos operativos, además de los costos directos, están los costos de transporte terrestre entre el puerto y la fundición, y los costos de venta de ánodos.

El TCRC es un ingreso fijo para fundiciones y refineras mientras que es parte del costo cash de las minas de cobre. En los 80 y 90 el TCRC llegó a constituir hasta el 34% del precio del cobre, pero desde

⁴ Dependientes de la producción, a diferencia de los costos fijos, los que no dependen de esta.

⁵ Los principales insumos aparte de la energía y los combustibles, son las bolas de molino, los explosivos, reactivos, y el agua.

⁶ Incluye el transporte y los costos de las gestiones para vender el concentrado.

2006 hasta 2012, en el auge del superciclo, representó cerca del 2,5% del precio del cobre. En 2015 había subido a cerca de 6% del precio y en 2020 el valor de TCRC combinado (fusión y refinación) era 15,9 c/lb, lo que constituía el 5,6% del precio del cobre y 12,6% del costo de operación (cash) del percentil 50 de la producción de cobre de mina mundial (Wood Mackenzie, 2020b).

Una fundición que entrega compra concentrados⁷, tiene utilidades antes de impuesto (UAI) que son iguales a:

$$UAI = TC_{Cu, Au, Ag} + V_{Extra Cu, Au, Ag} + V_{OM} + V_{AS} + V_{energía} + TC_I - C_T \quad (1)$$

En que $TC_{Cu, Au, Ag}$ es el cargo de tratamiento por contenido de cobre, oro, y plata, $V_{Extra Cu, Au, Ag}$ corresponde al extra o pérdida por recuperar más o menos de lo pagado por el cobre, oro, y plata, V_{OM} es la venta de otros metales recuperados y vendidos que no son pagados en el contrato, V_{AS} son las ventas de ácido sulfúrico, $V_{energía}$ corresponde a la venta de energía recuperada del calor de la fundición, TC_I es el cargo de tratamiento extra cobrado debido a la presencia de impurezas, y C_T son los costos totales (variables y fijos) incurridos por la fundición en recuperar el cobre, oro, plata, separar las impurezas y disponerlas en forma segura, tratar los otros metales (OM), recuperar la energía a partir del calor de la fundición, y producir ácido sulfúrico.

La refinera electrolítica tiene un procedimiento similar a la fundición para estimar sus utilidades. Sus ingresos están dados por el valor de RC.

El $TC_{Cu, Au, Ag}$ es usualmente una parte importante de los ingresos de la F-R, pero puede ser de menos importancia que el resto de los ingresos cuando el TCRC es muy bajo, tal como ocurre en 2020 y 2021.

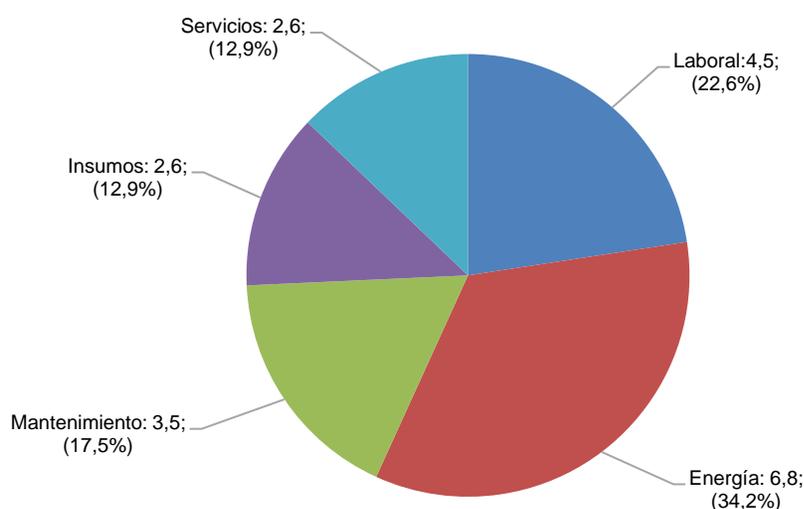
En cuanto a la competitividad de las fundiciones antes de pagar impuestos, ella está determinada principalmente por la gestión tecnológica, ambiental, social, y comercial y también por las características del país en que operan, en que lo que impacta principalmente es el nivel salarial, y el costo de la energía. Cuando la fundición está ubicada lejos del mar, de una vía navegable, o transporte ferroviario, el costo de transporte puede ser muy relevante a menos que haya centros manufactureros que utilizan cobre en las cercanías.

Otra característica de los costos de fundiciones y refineras es que estas tienden a ser mucho más estables en el tiempo que los costos de las minas, los que están muy influenciados por el precio del cobre y por las características físicas de los yacimientos. Por ello se observa que las curvas de costos de la industria de fundiciones y refineras son prácticamente iguales en periodos de varios años.

Las diferencias observadas entre los valores máximos y mínimos de los principales indicadores, tales como costos salariales, productividad, costo de la energía, costos de mantención y otros son muy grandes. Por ejemplo, en costo salarial en 2017, la diferencia entre el mayor y menor costo laboral en las fundiciones del mundo, según datos de Wood Mackenzie (en c/lb) fue 74 veces, en costo de energía esta diferencia fue 5,6 veces, en costo de mantención este valor fue 71 veces, en consumibles fue 74,5 veces, y en productividad, medida en t/h, fue 24 veces. La energía representó en promedio el 34,2% de los costos directos ese año, los costos laborales un 22,6%, la mantención un 17,5% y los consumibles y otros servicios en el sitio representaron 12,9% cada uno (gráfico 3).

⁷ Otro caso es que la fundición compre concentrados y venda ánodos.

Gráfico 3
Promedio ponderado global de costos directos de fundición, año 2017
(En c/lb Total 19,9 c/lb)



Fuente: Wood Mackenzie (2017).

En este trabajo comparamos 14 fundiciones en el mundo en 2017. Entre estas, algunas de las menores costos del mercado, Dongying en China, Aurubis en Hamburgo, Huelva en España y Tamano en Japón, que representan fundiciones muy bien operadas, con capturas de entre 99,8 y 99,9% de sus emisiones aéreas, y 10 fundiciones en Latinoamérica, incluida la Caridad en Mexico, Caraiba en Brasil, Ilo en Perú, y las 7 fundiciones chilenas.

Dongying (China) es una de las fundiciones más competitivas del mundo y está en el primer cuartil de costos, mientras que le siguen Huelva, Tamano y Aurubis, las que están en el segundo y tercer cuartil de costos, respectivamente. Y finalmente las chilenas Caletones y Altonorte están en la parte baja del cuarto cuartil.

El cuadro 4 muestra los principales indicadores de costos de estas 14 fundiciones en 2017.

Cuadro 4
Competitividad de fundiciones de referencia y de América Latina en 2017

| 2017 | Posición en curva de costos directos (percentil) | Laboral (c/lb) | Energía bruta total (c/lb) | Mantenimiento (c/lb) | Consumibles (c/lb) | Servicios en el lugar (c/lb) | Direct cash costs (c/lb) | \$/hr | hr/t | \$/t |
|----------------------|--|----------------|----------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------|-------|------|------|
| Dongy Ing | 2 | 1,0 | 5,5 | 0,4 | 0,7 | 0,2 | 7,8 | 3,8 | 1,2 | 4,7 |
| Tamano | 39 | 4,8 | 4,6 | 2,6 | 1,3 | 1,6 | 14,8 | 43,7 | 0,7 | 29,3 |
| Huelva | 34 | 3,3 | 3,9 | 1,3 | 1,4 | 3,6 | 13,5 | 34,5 | 0,6 | 19,0 |
| Aurubis | 59 | 6,1 | 5,3 | 3,5 | 1,9 | 0,8 | 17,5 | 69,5 | 0,5 | 34,8 |
| Mejor América Latina | 57 | 3,6 | 5,9 | 1,3 | 0,6 | 1,6 | 19,2 | 4,7 | 1,6 | 12,4 |
| Mejor Chile | 79 | 4,5 | 7,0 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 25,3 | 17,7 | 1,6 | 27,7 |
| Peor Chile | 99 | 20,4 | 12,9 | 12,9 | 14,9 | 19,8 | 64,8 | 28,6 | 5,9 | 121 |

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Wood Mackenzie (2017).

En el cuadro 4 la suma de los componentes de los costos directos de las fundiciones de Dongy Ing, Tamano, Huelva y Aurubis, es igual a los costos directos que se indican en el cuadro. En cambio, la suma de los componentes de los costos directos de las fundiciones "Mejor de América Latina", "Mejor de Chile", y "Peor de Chile" no es igual a los costos directos indicados en el cuadro por cuanto se muestra el mejor componente de las fundiciones en cada caso.

Se observa que a pesar de que Aurubis tiene la mayor productividad en el cuadro 4, sus costos laborales no son los menores debido a que sus salarios son los más altos. En el cuadro 4 se muestra el valor mayor y menor de las fundiciones chilenas para cada variable.

Si se selecciona la mejor fundición chilena para cada uno de los indicadores de dicho cuadro (penúltima fila del cuadro 4), se obtiene un costo directo de 15,9 c/lb.

4. Contratos de concentrados

Un contrato de compra-venta de concentrados de cobre simula una maquila de conversión entre el concentrado y el cátodo de cobre que realiza una fundición (Treatment Charge o TC) y una refinación (Refining Charge o RC). Los concentrados son productos mucho menos líquidos que los cátodos y en general se observa que el mercado de los concentrados es un mercado optimizador de capacidades instaladas.

El precio al cual se negocian los concentrados se determina en función del costo de transformarlo en cátodo. En general junto con el cobre (Cu) se valorizan otros elementos como la plata (Ag), el oro (Au), y se penalizan los contenidos de impurezas como el arsénico (As), bismuto (Bi), entre otros.

El hecho es que este contrato trata de simular que la capacidad de fundición y refinación fuese propia del minero y donde se consideren los pagos por descuentos por tratamiento (TC) y refinación (RC). La simulación de un contrato de maquila busca traspasar los riesgos de esta transformación a un contrato en donde la compañía minera aparece como la solicitante del servicio de maquila para llevar los concentrados a cátodos, pasando por la etapa de producto intermedio blíster-ánodo una vez ocurrida la etapa de fusión.

Normalmente los parámetros que se negocian en un contrato consideran el riesgo de variación de la base de precio del Cu, Au, Ag, el riesgo de pérdidas metalúrgicas de elementos de valor y el riesgo de contenidos en los análisis de elementos (Cu, Ag, Au), el riesgo financiero, el riesgo de tiempo de demora en el transporte y procesamiento de los concentrados, además del riesgo de tratamiento de impurezas como As, Bi, además de Sb, F, Cl, niveles mínimos-máximos de humedad, entre otros elementos.

Para la determinación del precio del cobre (principal elemento pagable) en la negociación de los contratos de concentrados se asume el tiempo que demora su transformación en productos líquidos. Se calcula un mes y fracción de transporte del concentrado al destino de la fundición, otro mes de proceso en fundición, cerca de un mes de proceso en refinación, además un mes de ingreso al mercado como cátodo o alambión, que es el principal segmento de uso del cobre en su cadena de valor. Esa referencia de tiempo de prácticamente cuatro meses se incluye contractualmente como el período de cotización para el cobre en base al promedio de cotizaciones de la Bolsa de Metales de Londres (LME), aplicándose el promedio de las cotizaciones del LME del cuarto mes siguiente del mes de embarque, por lo que en el contrato se utiliza la nomenclatura M+4, siendo M el mes correspondiente al embarque.

Si el precio del cobre subió o bajó en ese período, es riesgo del vendedor, que usualmente es una compañía minera, y esta puede cubrirse para ello en el mercado financiero.

Ya que los ingresos totales de una fundición refinación (F-R) son bastante limitados, el factor tiempo de tratamiento, y obviamente los costos totales hasta la venta del cátodo, son claves para el resultado. Una F-R que compra 100 mil toneladas de cobre contenido en concentrados, al precio del cobre (por ejemplo 400 c/lb), y del TCRC (por ejemplo 15 c/lb) actual, tendría que pagar cerca de 850 millones de dólares a la compañía minera, mientras que su ingreso total por el TCRC es de solo 33 millones de dólares. Por ello, los

contratos de concentrados colocan típicamente al vendedor cubriendo el riesgo del cambio posible de precio en los 2 a 3 meses que tarda la F-R en transformar los concentrados en cátodos y venderlos.

Los contratos de comercialización de concentrados asumen que existen pérdidas metalúrgicas en el procesamiento de los elementos de valor contenidos. Específicamente, para el cobre normalmente se paga el 96,6% de su contenido en los concentrados. La plata recibe un pagable generalmente de 90% si el contenido de plata es mayor a 30 gramos/t, o bien, se paga el 100% con deducción fija de 30 gramos. Para el caso del oro, se paga el 90% si el contenido de oro es mayor a 1 gramo/t, pagándose alternativamente el 100% de su valor contenido con una deducción fija de 1 gramo.

Prácticamente todos los contratos comerciales de concentrados consideran descuentos por contenidos de impurezas que superan ciertos límites, expresados por porcentajes o por partes por millón. Por mucho, el elemento más penalizado de los concentrados de cobre nacionales es el arsénico, siendo una de las impurezas que más abundan hoy y de las más restrictivas en términos de acceder a distintos mercados. El principal país al que se exportan concentrados es China, mercado que impone, salvo puntuales excepciones, límites al ingreso de concentrados de cobre con contenidos superiores a 0,5% de contenido de As por tonelada. Los descuentos comienzan con penalidades crecientes a partir de contenidos que van desde 0,2% generalmente. Otros elementos como antimonio, bismuto, plomo, cloro, entre otros, reciben penalidades según ciertos límites, aunque su ocurrencia es menor y su impacto de manera agregada es acotada para los concentrados de origen chileno.

Las Compañías Mineras que producen los concentrados los venden al precio del cobre menos los cargos por tratamiento y refinación TCRC⁸, menos las deducciones metalúrgicas, menos los cargos adicionales que pueden tener los concentrados debido a su contenido de impurezas, más los contenidos pagables de oro y plata.

Si recupera menos o más metal que lo pagado, las pérdidas o ganancias, según corresponda, son de la fundición. Hay numerosos metales que la fundición no paga en los contratos de compra de concentrados. Entre estos están las tierras raras o lantánidos, el molibdeno, y varios otros metales, tales como el germanio y el renio.

Por su parte, el vendedor de concentrados no quiere regalar ingresos a las fundiciones, por lo que, si el mineral que extrae de la mina tiene más que una cierta cantidad de molibdeno, es económico recuperarlo, producir y vender concentrado de este metal. Es el caso de numerosas minas en Chile, incluyendo Chuquicamata, Collahuasi, Pelambres, Andina y otras, cuyos ingresos se ven favorecidos por la venta del molibdeno que recuperan en sus plantas de flotación selectiva. En cambio, Escondida, por ejemplo, no tiene planta de flotación de molibdeno ya que la concentración de este metal en el mineral que extrae no hace rentable esta operación, y, por ende, el concentrado que vende contiene molibdeno. Las fundiciones, por otra parte, no tienen, usualmente, un proceso para recuperar el molibdeno, por lo que este es tratado como una impureza que no debe contaminar el ánodo.

Cada contrato de venta de concentrados contiene condiciones de cantidad, duración, calidad del concentrado, frecuencia y tamaño de los embarques, velocidad de carguío y desembarque (ello es importante para el dueño del barco y también para el que paga el embarque, el que puede ser el comprador o el vendedor), y otros aspectos. El tamaño de los embarques tiene opciones para el vendedor, ya que en caso de que haya fuertes variaciones en el mercado, este puede modificar la cantidad del embarque de acuerdo con lo establecido en el contrato.

Este mercado tiene contratos spot y de largo plazo, donde estos últimos tienen un rol predominante, abarcando en torno a 95% del total concentrados transados en el mundo en un año. Los

⁸ TCRC se mide en centavos por libra combinados (fundición + refinación) o bien se mide el TC (cargos de tratamiento en fundición) en US\$ por tonelada de concentrado seco (dmt) y cargo por refinación (RC) en c/lb.

TCRC de contratos de largo plazo, también conocidos como benchmark, se determinan año a año en diversos ejercicios entre vendedores (compañías mineras) y compradores de concentrados (compañías con fundiciones refineras).

Las razones para evitar los contratos spot son numerosos, comenzando por la gran volatilidad de este precio. Otros motivos de importancia para usar contratos de largo plazo son: 1) El vendedor de concentrados debe conocer los antecedentes legales intachables, la capacidad financiera, la calidad del tratamiento y de los procesos usados, el cumplimiento del fundidor con todas las normativas éticas, de transparencia, ambientales, de sustentabilidad, laborales, de seguridad, y de muchos otros aspectos importantes en el mundo de los negocios internacionales. 2) El vendedor debe asegurar que tiene un comprador confiable siempre, ya que, entre otros aspectos, no tiene capacidad de almacenar los concentrados por largos periodos, es decir debe colocar los concentrados que vende en el corto plazo. 3) La F-R le conviene tener contratos de largo plazo que aseguren abastecimiento para la utilización completa de la F-R. No podría operar en un ambiente en que tuviera que buscar suministro de concentrados con frecuencia.

Las grandes compañías productoras de concentrados, entre las que están BHP, Glencore, Codelco, Freeport McMoran, AMSA y otras, se reúnen en China con el representante de las fundiciones de este país en diciembre de cada año, y usando los datos del mercado proyectados para el año siguiente, así como los antecedentes de los últimos años, negocian el TCRC benchmark que regirá el año siguiente.

El precio benchmark que adoptan la inmensa mayoría de las compañías productoras de concentrados y las fundiciones refineras es determinado, usualmente, por el productor más importante de concentrados en negociación con el representante de las fundiciones chinas. El precio negociado entre estas últimas y otros productores de concentrados es un insumo relevante para fijar el precio benchmark. El precio benchmark y spot es publicado por una variedad de compañías internacionales tales como Wood Mackenzie, Commodity Research Unit, Platts, y otras. Por ello, las autoridades fiscalizadoras de los países del vendedor y del comprador, así como los dueños de las naves y otros medios de transporte de los concentrados, pueden chequear frecuentemente los precios y condiciones con que se realizan las transacciones y los envíos.

Antes de 2005, cuando las dos industrias más grandes del mundo de fundiciones y refineras de cobre eran las de Japón y Chile (de similar magnitud cada una), la determinación de los contratos benchmark TCRC se hacía de la misma forma, pero esta vez eran las fundiciones japonesas las que negociaban y no las chinas.

Las fundiciones tienen, preferentemente, una capacidad equivalente propia o contratos de largo plazo con refineras electrolíticas ya que el mercado spot de ánodos, producto principal de las fundiciones, es pequeño y volátil.

5. Determinación del peso y composición del concentrado

Los contratos contienen cláusulas sobre el lugar y el método detallado para muestrear, comprobar la masa, la composición y la humedad de los concentrados. Inicialmente hay muestras de un embarque que el vendedor envía al comprador, una muestra para uso propio y varias muestras adicionales para el caso que haya contienda sobre el resultado. Para este caso hay un árbitro que está indicado en el contrato, quien debe contribuir a resolver la contienda. El vendedor tiene derecho a tener un representante en el procedimiento de pesaje y análisis del comprador. La humedad del concentrado puede sufrir variaciones durante el carguío en el puerto de origen y en el transporte al puerto de destino, lo que altera el peso de la muestra. El método para resolver estas eventualidades está especificado en los contratos. Cuando una fundición lleva años comprándole concentrados a una compañía minera, el método se ajusta a las prácticas ya probadas.

El precio que se paga por la fusión y refinación se hace típicamente por lotes de concentrado (el precio del lote depende de varias de las variables indicadas en la fórmula 3.1), el que debe ser transportado en forma totalmente separada de los otros lotes desde el puerto de embarque al lugar de destino. Este puede ser el puerto de destino o bien la fundición misma.

Las cláusulas para resolver controversias contienen básicamente tres opciones: 1) los resultados del árbitro son finales; 2) los resultados del árbitro y del actor más cercano geográficamente al árbitro es final; 3) el resultado final es el promedio de las mediciones del vendedor, del comprador y del árbitro. Los métodos más usados son los números dos y tres.

Todos los contratos contienen seguros por pérdidas durante las diversas etapas de transporte, debido a causas naturales (terremotos, maremotos, tempestades, etc.).

Cláusulas sobre los impuestos y tarifas de embarque, desembarque, transporte, que deben ser pagados al Estado y a otros agentes en los puertos de embarque y destino también están incluidos en los contratos.

6. Alteración de los términos de intercambio de los concentrados

Las partes involucradas en los complejos procedimientos contenidos en un contrato de venta/compra de concentrado, incluye al menos a los siguientes actores: 1) Ejecutivos a cargo de las transacciones de ambas compañías, la vendedora y la compradora, incluidos su personal administrativo 2) Directorios de ambas compañías y su personal administrativo. 3) Directivos y técnicos que toman las muestras y realizan los análisis en ambas compañías. 4) Agentes del Estado y otros, que fiscalizan envíos y recepción, y que fijan las tarifas e impuestos a ser pagados en puertos de ambos países.

Alterar los términos de la venta, por ejemplo, modificando el contenido de cobre u oro del concentrado, ya sea para ventaja del vendedor o del comprador, o de ambos, involucra al menos a unas 50 personas en las compañías vendedora y compradora. Este procedimiento no puede ser llevado a cabo sin la colusión de ambas compañías para defraudar a los estados de ambos países. En 2019 Chile exportó en valor el 53% de sus concentrados a China, el 19% a Japón, el 8% a Corea del Sur, el 4% a India, y el 13% a otros países.

La acusación de alteración de los términos de exportación de concentrados, para ventajas de las compañías mineras, circula en forma generalizada en numerosos medios en Chile.

Es más probable que este tipo de transacciones se dé entre compañías relacionadas patrimonialmente, que entre compañías que no lo son.

Es importante señalar, sin embargo, que de ocurrir, ello sería ilegal no solo en Chile, sino que también en el país de destino de los envíos de concentrados, y en el país en que la compañía minera tiene su casa matriz (y su directorio). El descubrimiento de estos procedimientos debiera ocurrir en el tiempo dada la gran cantidad de personas involucradas. Si ello se comprobara, las penalidades legales en los dos o tres países involucrados llevaría posiblemente a la quiebra hasta las compañías más grandes del mundo.

La probabilidad que ello ocurra es, por ende, inmensamente baja, aunque la fiscalización del puerto de embarque sea probadamente deficiente.

B. Tendencias en mercados de concentrados

1. El corto plazo

El examen de la tendencia en mercados de concentrados comprende un análisis de la oferta y demanda por concentrados, y de los aspectos normativos y de políticas que pueden afectar la oferta y demanda de dichos concentrados.

Desde 2018 los TCRC combinados (fundición y refinación) fueron reduciéndose desde 21,1 c/lb (para concentrados de 30% de cobre) hasta llegar a 15,9 c/lb en 2020, debido a que la oferta de concentrados por parte de las minas creció menos que la demanda por concentrados por parte de fundiciones.

En la segunda mitad de 2020 los concentrados transados en el mercado spot entre productores y fundiciones obtuvieron valores de TCRC 20% bajo el precio benchmark (15,9 c/lb combinado para un concentrado de 30% de cobre) establecido para dicho año (Wood Mackenzie, 2020a). Influyó en ello las paralizaciones de producción debido al Covid 19 en varios países en el segundo trimestre, y la disputa entre China y Australia que paralizó los envíos de concentrados desde este último país a China. El mayor impacto en la reducción de los TCRC spot en 2020 fue debido al Covid 19, lo que constituyó un 59% del total de los recortes de producción, es decir cerca de 950 mil toneladas de concentrados menos que lo proyectado. Una fracción alta de estos recortes debido al Covid 19 se generaron en Perú, mientras que Chile no tuvo reducción de producción debido a este motivo.

Si bien es posible que el Covid 19 tenga efecto en el abastecimiento de concentrados en 2021, se espera que ello sea sustancialmente menor a lo ocurrido en 2020.

Se anticipa que en 2021 la producción de concentrados crecería 5,4% frente a la capacidad de fundición cuyo crecimiento sería 9%. Debido al menor efecto del Covid 19 en el abastecimiento esperado de concentrados al momento de negociar el TCRC benchmark para 2021, el TC⁹ benchmark fue 59,5 US/t seca de concentrado (t_{SC}), lo que traducido a c/lb es 9,0 c/lb para un concentrado de 30% de cobre. Este valor corresponde a 14,7 c/lb para fusión y refinación, igual que en 2020.

Sólo las fundiciones más competitivas del mundo tienen costos directos¹⁰ tan bajos como 9,4 c/lb, y estas están en su mayoría en China. Por ello, el TCRC benchmark de 2020 y 2021 colocan a la mayor parte de las fundiciones del mundo, incluidas las de Chile, Perú y México, en una posición de pérdida operativa neta (Wood Mackenzie, 2020a).

2. Mediano y largo plazo

La oferta de concentrados para fundiciones independientes debiera seguir creciendo en 2022 lo que permitiría alcanzar un TCRC de 13,3 c/lb TCRC combinado, y un máximo de 15,6 c/lb TCRC combinado en 2024, bajando a 14,1 c/lb TCRC combinado en 2026, lo que se considera como TCRC de largo plazo. Estas alzas del TCRC involucran una mayor utilización de las fundiciones, al mismo tiempo que aumento de los inventarios de concentrados (Wood Mackenzie, 2020a).

El China Smelter Purchase Team (CSPT), quien negocia de forma coordinada la fijación del benchmark anual de los contratos de concentrado debiera apuntar a obtener TCRC de largo plazo de tal forma que las fundiciones refineras marginales en China puedan cubrir sus costos directos. El TCRC combinado de 14,1 c/lb está pensado como el valor que podría permitir esto.

⁹ TC es el cargo de tratamiento de fundiciones, se mide en US\$ por tonelada de concentrado seco.

¹⁰ Costos de operación que no incluyen los costos de venta, es decir los costos de comercialización.

3. La potencial elevación del TCRC más allá de su valor de mercado

En Chile existe un amplio grupo de expertos que indica como escenario probable que el CSPT pueda determinar en algún momento del futuro, cuando la concentración de la capacidad de fundición sea aún mayor que en 2020 en China y en Asia, precios para el benchmark TCRC que están por sobre el valor del mercado, brindando mayor rentabilidad a las fundiciones de China y del resto del mundo, y reduciendo el margen de utilidad de las compañías que venden concentrados.

Por otra parte, existe la presunción que China intentaría reducir la compra de cobre refinado, cuestión que habría ocurrido en 2020, pero tal vez ello se habría debido a la liberación de inventarios estratégicos que este país posee, y que llegarían a dos millones de toneladas (Jonathan Barnes, OLME, 17 junio 2021).

Las cifras muestran, que la producción de cobre refinado primario y secundario abasteció el 64% de la demanda interna de China en 2020, cifra que ha ido aumentando desde 2010 en que fue 37%, pero que en 2025 no sería fundamentalmente distinta a la de 2020.

Si China llegara a producir una fracción superior de abastecimiento de su demanda por cobre refinado, ello constituiría una presión importante para la capacidad de refinación fuera de Asia.

Finalmente, hay también un grupo de expertos que piensa que es poco probable que China elija el camino de elevar artificialmente los valores del benchmark TCRC ya que ello sería respondido por el resto del mercado con la construcción de mayor capacidad de fundición y refinación fuera de dicho país, por lo que los altos precios de un benchmark TCRC durarían solo el tiempo en que tardaría la construcción de estas nuevas fundiciones y refinerías.

Si bien, a nivel global es esta última mirada la que predomina, en Chile, la Comisión Presidencial para las fundiciones de Codelco y Enami (Comisión Presidencial Fundiciones y Refinería, 2016), recomendó que Chile mantuviera su capacidad de fundición debido al potencial riesgo de elevación de los TCRC.

C. Mercado del ácido sulfúrico

Chile importa ácido sulfúrico para abastecer las necesidades de fertilizantes, las operaciones de lixiviación, y otros usos, hasta 2021, y lo seguirá haciendo al menos hasta 2027, de acuerdo al informe de Cochilco (2020). En 2019 Chile produjo 4,6 millones de toneladas de ácido, e importó 3,4 millones de toneladas. El 94,9% del ácido sulfúrico en Chile se utilizaba en la producción de cátodos mediante lixiviación en 2019. El consumo de este compuesto aumentó desde 7,8 a 8,1 millones de toneladas entre 2010 y 2019.

El aumento del uso de ácido sulfúrico en el país estuvo causado por el mayor uso de ácido por tonelada de cobre producido en las operaciones de lixiviación debido a la caída de la ley de los minerales que se lixivian, a pesar de que la producción de cobre a partir de la lixiviación se redujo desde 2,09 a 1,58 millones de toneladas de cobre entre 2010 y 2019.

El precio del ácido sulfúrico en Chile está fijado por el precio de importación de ácido, fundamentalmente desde China, y ha oscilado entre 2011 y 2019 entre 25 y 250 US\$ por tonelada (Cochilco, 2020).

Cerca del 80% del ácido sulfúrico mundial se produce a partir del petróleo, entre 10% y 15% se produce en fundiciones de cobre y otros metales, y el resto se produce a partir de otros procesos. En 2020 y 2021 se produjo una paralización de muchas refinerías de petróleo en medio oriente lo que causó un déficit de ácido sulfúrico en China, haciendo subir el precio mundial del ácido. Ello generó altos

precios del ácido en Chile, llegando a 170 US\$/t spot, mientras que el precio de contratos de largo plazo está en alrededor de 60 US\$/t.

Según Cochilco la producción base de Chile en 2029 sería de 5,3 millones de ton de ácido en base a las 7 fundiciones. En el caso que se cierre las fundiciones de Potrerillos, Ventanas y Paipote en esta década debido a factores ambientales y/o económicos, ello representaría 24,9% de esta producción, es decir 1,32 millones de t de ácido, mientras que una nueva fundición con una capacidad de tratamiento de 1,5 millones de toneladas de concentrado produciría 1,48 millones de toneladas de ácido, compensando el cierre de las tres fundiciones mencionadas. Ello significa que la producción de ácido sulfúrico del país continuaría en niveles similares a los históricos. Este aspecto es discutido en mayor profundidad en la sección V.A.

Cochilco proyecta que el precio de largo plazo (2024) sería de 62 a 65 US\$/t, lo que se justificaría ya que la demanda interna bordearía los 8 millones de toneladas, valor inferior al de 2020 (Cochilco 2020).

Por otra parte, Cochilco proyecta que Chile tendría necesidad de importar ácido sulfúrico para su consumo interno hasta 2027. Las proyecciones de consumo nacional indican que la exportación de ácido chileno comenzaría en 2028 a 2029. Más allá de dicho año, el precio de referencia sería Brasil, en donde se proyecta un nivel de precios de largo plazo del orden de 70 US\$/t (Incomare 2021), a lo que habría que restar la logística y transporte, con un costo de 30 US\$/t. Por ello, un precio de 40 US\$/t de largo plazo en Chile pareciera ser conservador.

Por otro lado, es posible que con precios bajos de ácido sulfúrico se activen numerosas faenas de lixiviación en Chile, además de extenderse la vida de algunas minas de óxidos que están en operación. Esta fue la tónica que se observó en el pasado, cuando el cierre de numerosas faenas mineras de óxidos, aún en funcionamiento en 2021, había sido pronosticada para la década pasada, y fue retrasándose persistentemente.

Es probable entonces, que las proyecciones de Cochilco para el uso de ácido en faenas de lixiviación en Chile sea conservadora. Por ello la evaluación desarrollada utiliza un precio del ácido de largo plazo de 55 US\$/t, que es superior a los 40 US\$/t que se indicó anteriormente, y sigue siendo menor que la estimación de Cochilco indicada.

D. Mercado de la chatarra

1. Introducción

En gran parte de la literatura científica y técnica sobre los mercados de cobre persiste aún la clasificación de chatarra en chatarra vieja (Ch_v) y chatarra nueva (Ch_n)¹¹, por ejemplo, en Tilton y Guzmán (2016), Slade (1980), y Tan (1987). Una parte de la chatarra vieja es refinada una vez que termina el uso de productos que contienen cobre, y un supuesto clave de esta clasificación implica suponer que toda la chatarra que es refinada y reingresa al ciclo del cobre refinado proviene de chatarra vieja. Jolly (ICA, 2013) sigue en línea con este principio, pero permite algunas tolerancias, mencionando que, tradicionalmente, la chatarra utilizada en fundición y refinación proviene principalmente de chatarra "vieja", mientras que la chatarra de fundición directa proviene principalmente de chatarra "nueva".

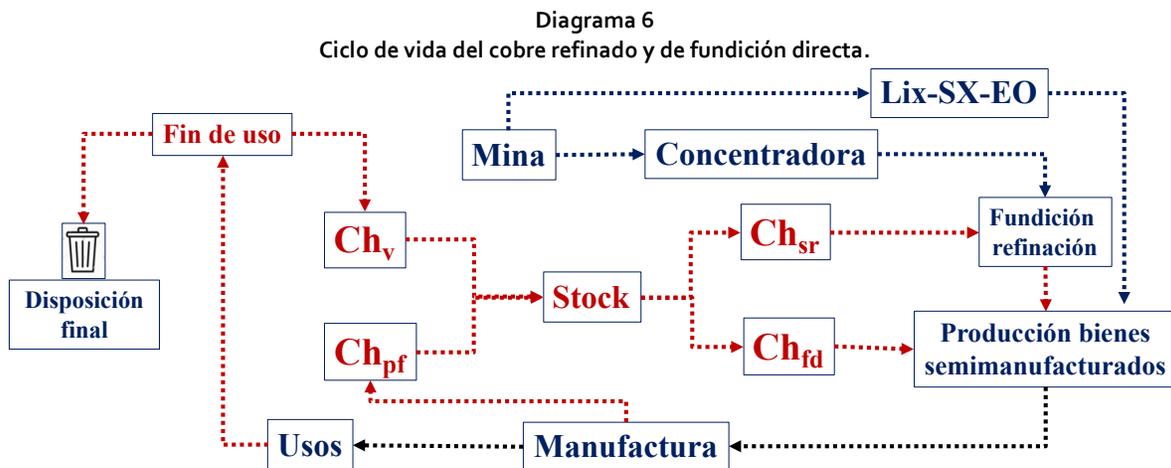
Glöser et al. (2013), investigadores del Instituto Fraunhofer, desarrollaron un modelo dinámico de existencias y flujos mundiales de cobre con el objeto de estimar las eficiencias de reciclaje, las existencias de cobre en uso y el cobre disipado y depositado en vertederos. Este modelo contiene flujos detallados de orígenes y destinos, y de stocks (inventarios), tanto de chatarra vieja como nueva. Dentro de los flujos de chatarra vieja considera chatarra destinada a fundición y refinación, sólo a refinación, o

¹¹ Tiene un período de circulación muy corto. Janice Jolly (ICA, 2013) sugiere que es de alrededor de 30 días.

sólo a fundición directa, según su calidad sea baja, media o alta, respectivamente. Y en el caso de chatarra nueva considera flujos a refinación y a fundición directa, donde el segundo destino es el mayoritario. A partir de dicho modelo, desde el año 2013 los Copper Factbooks de ICSG publica las estimaciones de chatarra del Instituto Fraunhofer.

El enfoque de Fraunhofer fue publicado anualmente por ICSG en los World Copper Fact Books¹². En estos se adopta la denominación de chatarra proveniente de fabricación (Ch_{pf}) (ICSG, 2020), la que debiera ser igual a la chatarra nueva (Ch_n). Es interesante notar, sin embargo, que ICSG no eliminó la nomenclatura chatarra nueva, y la sigue usando en el World Copper Factbook, a pesar que no la define. La chatarra de fundición directa (Ch_{fd}) definida en los World Copper FactBooks¹³, está inserta en el ciclo de vida del cobre, después de la chatarra proveniente de fabricación (diagrama 6). Una fracción de Ch_{pf} ingresa al ciclo del cobre refinado, ya que habría un acopio o Stock en el que se produce la mezcla.

ICSG-Fraunhofer (ICSG, 2020) estimaban que, en 2018, la generación de chatarra proveniente de la fabricación (Ch_{pf}), es decir chatarra nueva, fue 4,54 millones de toneladas, mientras que la chatarra después del fin de vida (Ch_{sr}) que está dirigida a fundición y refinación, fue 3,29 millones de toneladas, y la chatarra de fundición directa (Ch_{fd}) fue 5,43 millones de toneladas. En este ejemplo, Ch_v (chatarra vieja) es 3,99 millones de toneladas, bien superior a las 3,29 millones de toneladas de Ch_{sr} . Este esquema de flujo para la chatarra implica una mezcla importante entre los diversos tipos de chatarra, Ch_{pf} y Ch_v .



Fuente: Elaboración propia.

2. Procesos de tratamiento de la chatarra

La chatarra de cobre puede ser reciclada en tres ubicaciones en las fundiciones de cobre de mina, también conocidas como fundiciones primarias.

La ubicación más común para añadir chatarra son los convertidores, pero también se puede añadir la chatarra a los hornos de fusión y los hornos de ánodos. Los hornos de fusión, sin embargo, requieren inyección de oxígeno para que el proceso sea exotérmico, compensando la falta de azufre que contienen los minerales sulfurados. Ya que la chatarra no contiene azufre debe ser añadida a los hornos de fusión en cantidades limitadas para asegurar que estos no requieran adición de energía (Schlesinger et al., 2011). Hay tecnologías de hornos de fusión que han adaptado sus procesos para añadir chatarra. Tal es el caso de los hornos Mitsubishi y Noranda, no así los hornos Flash.

¹² Este esquema para la chatarra será referido en este trabajo, como ICSG-Fraunhofer.

¹³ Material secundario que puede ser usado directamente en un horno, sin limpieza de fundentes ni refinación.

Por ello es preferible añadir chatarra a los convertidores primarios ya que estos tienen un exceso de energía exotérmica y, por ello, requieren hasta 35% de alimentación de chatarra. Eso sí, se prefiere chatarra de mayor pureza para estos hornos.

También se puede añadir chatarra secundaria a los hornos de ánodos, aunque estos tratan ya los desechos de ánodos provenientes de las refineries electrolíticas.

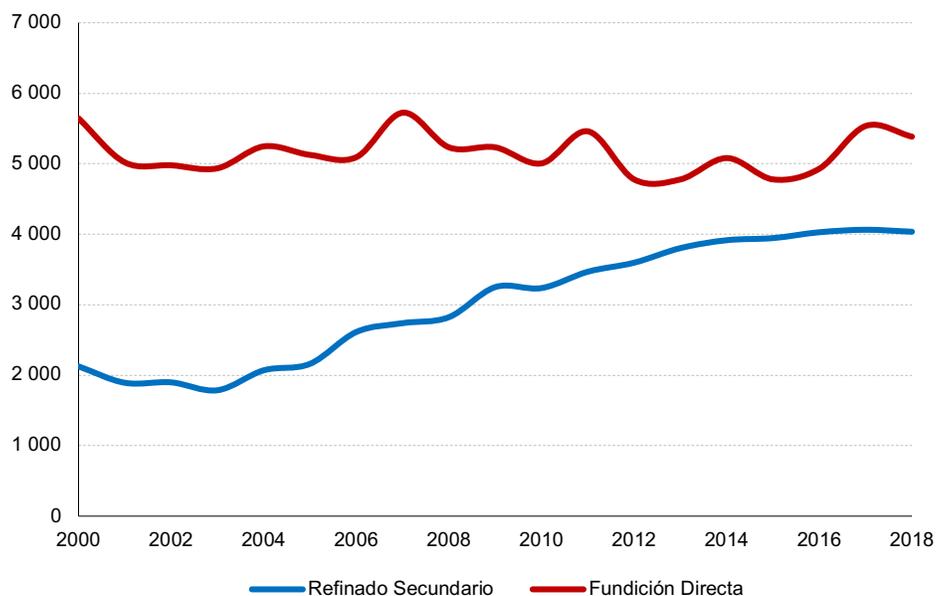
ICSG (2020) indica que aproximadamente el 17,5% de los 20 millones de toneladas tratadas en fundiciones primarias en 2018 provinieron de chatarra, aunque no se indica cuanto de esta cantidad provino de los ánodos que deben ser refundidos en las refineries electrolíticas y cuanto provino de chatarra secundaria adquirida en el mercado.

3. Tendencias en mercados de chatarra

La cantidad de chatarra que es refinada cada año depende de muchos factores, pero tal vez el más importante es el precio del cobre (Slade, 1980; Tan, 1987; Valencia, 2005; Gómez, Guzmán y Tilton, 2007). Cuando este es alto, e independiente del diferencial de precio entre el cobre refinado y la chatarra¹⁴, la oferta de chatarra aumenta, y lo contrario ocurre cuando hay precios bajos, como en el caso de la crisis asiática. Uno de los factores que afecta el diferencial de precio es la pureza de la chatarra, por lo que usualmente la chatarra más transada para ser refinada es la más limpia.

El gráfico 4 contiene la producción de chatarra refinada y de chatarra de fundición directa entre 2000 y 2018 (ICSG, 2018). Se aprecia que mientras la chatarra refinada aumentó desde 2 a 4 millones de toneladas en este período, la chatarra de fundición directa se mantuvo constante en alrededor de 5 millones de toneladas. El aumento de la chatarra refinada se justifica plenamente ya que en el año t esta es proporcional a la demanda por cobre del año $t-VM$, en que VM es la vida media del cobre en los diversos usos en la sociedad.

Gráfico 4
Producción de chatarra refinada y de fundición directa
(En miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia en base a ICSG (2018).

¹⁴ La chatarra de cobre se transa en el mercado a un precio ($p_{chatarra}$) inferior que el cobre refinado ($p_{refinado}$).

La chatarra que fue refinada varió su participación en el uso mundial del cobre, es decir en la demanda, desde 12 a 18%. Desde 1950, en que se cuenta con registros, esta cifra nunca superó el 20% (ICSG, 2010).

El motivo principal por el cual este valor no superó el 20% es porque la vida media del cobre en uso fue más de 20 años en décadas pasadas (ICA, 2013) y, por consiguiente, al reemerger el cobre al fin de su vida útil, la demanda de cobre refinado ha crecido considerablemente (Lagos y Henríquez, 2004). En las condiciones del mercado actual, ello significa que a menos que la demanda de cobre refinado se estanque o se reduzca en el futuro, o bien que la vida útil del cobre en uso se reduzca sustancialmente, no sería posible observar un aumento de la chatarra refinada como proporción de dicha demanda.

Ahora, si surgen premios por cobre con menor huella de carbono en el futuro, es posible que se haga rentable incluir mayor proporción de chatarra en el ciclo de producción de cobre primario, y ello podría modificar sustancialmente el balance entre cobre refinado primario y cobre refinado secundario. La sustitución del cobre refinado primario por cobre refinado secundario es un concepto central de la forma como muchas industrias manufactureras y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales en el mundo piensan que se dará la reducción de la huella de carbono del cobre en el futuro (Spano et al., 2020).

III. Evaluación económica de una nueva fundición refinera en Chile

El estudio realizado para evaluar la viabilidad económica de una F-R en Chile, considera una capacidad efectiva de tratamiento de 1,5 millones de toneladas de concentrado por año, con una ley de cobre de 28,5% y una ley de arsénico en torno a 0,7%. Esto último requiere alimentación de concentrados de las minas Chuquicamata y Ministro Hales en Chile y de Toromocho en Perú.

El horizonte de evaluación son 25 años. La fundición evaluada produce 421 mil toneladas de cobre en ánodos por año, lo que la haría la mayor fundición de Chile, seguida por Caletones, la que produjo 345 mil toneladas de cobre en 2020. La refinera tiene una capacidad para tratar todos los ánodos producidos por la fundición.

La inversión requerida para una F-R de tecnología Bottom Blowing Reactor (BBR) con conversión y refinación en una sola etapa, se adoptó de varios estudios, incluido uno realizado por Chagres, y es de 1.725 US\$ millones.

Las variables seleccionadas para la evaluación fueron cuidadosamente evaluadas.

- El precio del cobre y los cargos de tratamiento y refinación (TCRC) fueron fijados con valores conservadores (280 c/lb y 90/9, respectivamente). Este último está determinado teóricamente por Wood Mackenzie, y coincide con un precio que permite la construcción de nuevas fundiciones en China. Es un valor bastante superior a los valores actuales del TCRC benchmark y spot. Se espera, sin embargo, que estos bajos valores aumenten en los próximos años. El precio del cobre no influye mayormente en la evaluación de la F-R.
- Los costos directos seleccionados son los siguientes:
- Costo laboral. Se considera el salario medio pagado a cada trabajador, así como su productividad para determinar los costos laborales.

- La productividad de la nueva fundición fue seleccionada considerando que esta sería sustancialmente mejor que las de las fundiciones chilenas, pero no tan bajas en horas por toneladas como las fundiciones de Aurubis, Tamano y Huelva, que tenían en promedio 0,6 hrs./t de concentrado. La meta para la fundición chilena se fijó en 0,9, bastante mejor que 1,6 hrs./t que correspondía a la mejor fundición chilena en 2017. El salario por trabajador se determinó por el salario menor por trabajador que tenían las tres fundiciones chilenas mencionadas. Estos dos indicadores arrojaron un costo laboral de 2,4 c/lb, lo que es inferior a seis de las siete fundiciones comparadas, con la excepción de Dongying, que tenía costos laborales menores a la mitad de esta cifra.
- El costo de mantención se definió en 2,5 c/lb que es el promedio de las fundiciones de Huelva, Tamano, y Aurubis, y a la vez es 14% más bajo que la mejor fundición chilena. Criterios similares se adoptaron para los insumos consumibles y para los servicios del sitio.
- El costo de energía fue seleccionado en 2,76 c/lb, inferior al menor costo de energía reportado para una fundición chilena (7,0 c/lb). Este costo se estimó con los siguientes supuestos. Primero, la eficiencia de uso de energía bruta se asumió que estaba entre lo que las fundiciones chilenas tenían en 2017 en promedio (2.660 MJ/t concentrado), y el mejor registro mundial que lo tiene la fundición de Huelva, que era de 1.488 MJ/t concentrado (Wood Mackenzie, 2017). El mejor valor para una fundición chilena era 2.132 MJ/t concentrado en 2017. Como objetivo para la nueva fundición asignamos un valor de 1.800 MJ/t concentrado (0,5 MWh/t concentrado), dado que habrá tecnologías más eficientes que las utilizadas actualmente en las fundiciones chilenas. Segundo, el costo de la energía eléctrica de largo plazo es 30 US\$/MWh, lo que es realista dados los últimos contratos firmados por varias entidades que producen energías renovables.
- El costo de insumos consumibles fue seleccionado en 1,5, igual al costo menor de una fundición chilena actual.
- El costo de servicios se seleccionó en 1,3 c/lb, un 19% menor que el costo menor observado actualmente.
- Ello arroja un total de 10,4 c/lb para el costo directo de la fundición.
- Si se mejora la productividad, se puede llegar a obtener costos directos para una nueva fundición inferiores a este valor, lo que la ubicaría en la parte baja del segundo cuartil de costos. Se entiende, por ello, que fijar un costo directo de 10,4 c/lb para un ejercicio de evaluación, no es arbitrario, sino que obedece a una visión en que la gestión se puede conducir en Chile en forma mejor de lo que realiza cualquiera de las fundiciones actuales.

Los costos de la refinería se definieron en 4,0 c/lb, lo que corresponde a una refinería promedio en el mundo.

La recuperación de cobre de la fundición fue fijada en 98%, lo que es un valor alto, alcanzado por fundiciones bien operadas.

El costo del ácido sulfúrico se fijó en 55 US\$/t tal como está indicado en la sección II.C.

El cuadro 5 resume los principales indicadores de una nueva fundición refinería.

Cuadro 5
Supuestos de la evaluación económica de la fundición refinera

| | | | |
|--|-------|---|-------|
| Precio del cobre largo plazo (c/lb) ^a | 280 | Costos directos fundición (c/lb) | 10,4 |
| Concentrado tratado (miles de ton secas) | 1 500 | Costos directos refinera (c/lb) | 4 |
| Ley de cobre concentrado (%) | 28,5 | Precio ácido sulfúrico largo plazo (US\$/t) | 55 |
| Ley de arsénico concentrado (%) | 0,7 | Producción de cobre anódico fundición (kt) | 421 |
| Recuperación de cobre en fundición (%) | 98 | Producción de cobre catódico refinera (kt) | 419 |
| Recuperación de cobre en refinera (%) | 99,95 | Inversión fundición (millones de US\$) | 1 350 |
| Captura de azufre en fundición (%) | 99,8 | Inversión refinera (millones de US\$) | 375 |
| TC (US\$/ ton concentrado seco) | 90 | Tasa de descuento (%) | 8 |
| RC Cargo de refinación (c/lb) | 9 | VAN (millones de US\$) | 620 |
| Cargo de tratamiento y refinación combinado (c/lb) | 23,0 | TIR | 12,1 |
| | | Recuperación del capital (años) | 7 |

Fuente: Elaboración propia.

^a c/lb: centavos de dólar de los Estados Unidos por libra.

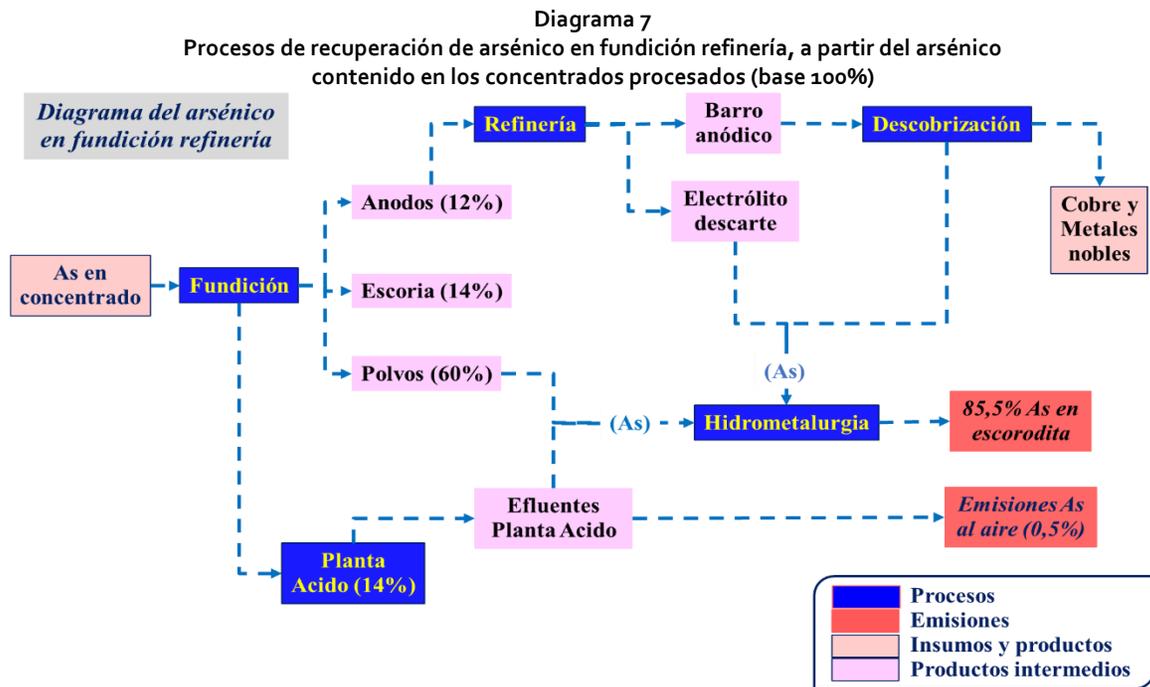
A. Tratamiento del arsénico en una fundición

Existen numerosos procesos para tratar el arsénico en concentrados, y este trabajo aborda algunos de ellos que están relacionados con una F-R de cobre. Los procesos de recuperación del arsénico dependen de las tecnologías de fusión y conversión utilizadas, es decir este elemento se distribuye en cantidades distintas en los diversos productos intermedios de una fundición dependiendo de la tecnología (diagrama 3). El arsénico reporta en la escoria, en los polvos de fundiciones, en los efluentes de las plantas de ácido, y en los ánodos que van a la refinera, dependiendo de si se trata de la tecnología de fusión y conversión Outokumpu (Flash), convertidor Teniente, convertidor Noranda, Mitsubishi, Isa Smelt, Bottom Blown Converter, etc.

Al mismo tiempo, es posible que la recuperación principal del arsénico a partir del concentrado, se realice en un tostador como el que tiene la mina Ministro Hales de Codelco, cuyo producto principal son calcinas con bajo contenido de arsénico (<0,3%), las que son posteriormente enviadas a una fundición. Las calcinas son similares a los concentrados, pero se diferencian de estos en que contiene menor concentración de azufre.

Este trabajo considera el procesamiento en una F-R de concentrados con una ley de arsénico de 1%, y su recuperación, tal como lo indica el diagrama 7, considerando numerosas publicaciones (Valenzuela, 2000; Zhou et al., 2021; Selivanov et al., 2020; Wang et al., 2019; Corema Antofagasta, 2009).

En este diagrama la totalidad del arsénico contenido en el concentrado que es tratado en la fundición se distribuye en ánodos, escoria, polvos de fundición, y efluentes de la planta de ácido, además de otros productos intermedios tales como el barro anódico y el electrólito de descarte de la refinera. El arsénico recuperado en los diversos procesos (99,5%) termina, ya sea en la escoria, o es tratado mediante hidrometalurgia para inmovilizarlo en la forma de escorodita, mineral de gran estabilidad química. Tal como se indica en la sección I.A.1, la escoria es sometida a flotación, y vuelve a la fundición en forma de concentrado, o bien se dispone en botaderos y no es utilizada en otras aplicaciones en Chile, por ahora. El arsénico emitido al aire en este ejemplo, es el 0,5% del total.



Fuente: Elaboración propia.

Las penalidades impuestas por las fundiciones al arsénico, así como el premio del cargo de tratamiento, que incluye los costos de tratamiento, recuperación y disposición segura del As, permite elevar los ingresos de la F-R.

La evaluación económica consideró tres aspectos del tratamiento del arsénico. Primero, la penalización del contenido de arsénico en el concentrado cuando la concentración de As excede 0,2%. El cuadro 6 muestra la penalización del arsénico según su concentración en forma más detallada que el cuadro 3.

Segundo, los concentrados que contienen más de 0,2% de arsénico están afectos a un cargo adicional en el cargo de tratamiento que es igual 100 US\$ por un 1% de concentración de arsénico en una tonelada de concentrado. Desde el punto de vista de la fundición, este cargo adicional es considerado un premio, ya que corresponde a un ingreso adicional.

Y tercero, el costo de tratamiento y disposición del arsénico en la forma de escorodita se consideró en 2.200 US\$/t de arsénico. El costo marítimo de transporte de concentrados es independiente de la concentración de arsénico y se realiza a granel.

Cuadro 6
Penalizaciones por arsénico en concentrados

| Rango Leyes As (X) | US\$/t seca por cada 0,1% As |
|------------------------|------------------------------|
| $X \leq 0,2\%$ | 0 |
| $0,2\% < X \leq 0,5\%$ | 2,5 |
| $0,5\% < X \leq 1\%$ | 5 |
| $1\% < X \leq 1,5\%$ | 7 |
| $1,5\% < X \leq 2\%$ | 12 |
| $X > 2\%$ | 15 |

Fuente: Elaboración propia.

IV. La cadena de valor del cobre desde la mina a la manufactura

La cadena de valor de la producción de cobre de mina analizada en este trabajo incluye la producción de concentrados de cobre, la producción de ánodos y cátodos (fundiciones y refinerías), y la producción de productos semi manufacturados (industria semi manufacturera). La métrica utilizada es la del EBIDTA/Ventas (gráfico 5), en que el EBIDTA son las ganancias antes de intereses, depreciación, impuestos y amortización, ampliamente disponible en memorias anuales de diversas compañías en el mundo. Se adoptaron los valores disponibles más recientes (2019 y 2020).

Es importante notar que 2019 y 2020 fueron años de precios intermedios para varios commodities minerales, incluidos el cobre (264,7 y 280,4 c/lb, respectivamente), el hierro (93,8 y 108,9 US\$/t¹⁵, respectivamente), y el carbón (71,9 y 65,7 US\$/t¹⁶ respectivamente), productos importantes para las compañías productoras de estos commodities como BHP, Rio Tinto, Anglo American, Vale y Glencore. El año 2020 fue un año de precios promedio moderados, pero muy desigual en el primer trimestre respecto al último trimestre, debido a la pandemia del Covid 19.

El producto que tiene mayor valor EBIDTA/Ventas son los concentrados de cobre (Antamina, Los Pelambres, Collahuasi, Grasberg), con valores de este índice que van desde 0,54 a 0,82, mientras que las fundiciones y refinerías de Atlantic Copper en Huelva, España, y de Aurubis, Alemania, Bélgica, Bulgaria, entre otros, tienen valores del índice de 0,027 y 0,047 respectivamente, es decir 17 a 20 veces menos que las compañías líderes en ventas de concentrados de cobre.

Ello se explica debido a que las fundiciones de cobre obtienen sus ganancias a partir de los limitados montos de los cargos de tratamiento y de otros ingresos (como la venta de ácido sulfúrico, y otros factores discutidos en la sección II.A.2) menos sus costos directos y los costos de venta. El punto de partida de los ingresos es extraordinariamente bajo, entonces, ya que los TCRC escasamente llegaron a constituir 10% del precio del cobre en los últimos 10 años. Ello se compara con una mina que vende sus concentrados de cobre al precio del metal menos los costos.

¹⁵ Mineral de importación en China, 62% de Fe, precio spot incluido el flete hasta puerto en China, estadísticas de World Bank Commodity Price Data.

¹⁶ Carbón (Sudáfrica), precio f.o.b. Richards Bay, NAR, 6,000 kcal/kg, menos 1% de azifre, forward 1 mes, estadísticas de World Bank Commodity Price Data.

Antamina (Perú) y Grasberg (Indonesia) deben su alto cociente en parte importante a que entre sus ventas están las de oro, mientras que tanto Collahuasi como Pelambres deben una parte importante de sus ganancias a las ventas de molibdeno.

Las compañías semi manufactureras cuyo índice EBIDTA/Ventas figuran en el gráfico 5 incluye Ningbo Jintian, China (0,023 en 2019), LS Cable Systems, Corea del Sur (0,041 en 2020), Zhejiang Hailiang, China (0,042 en 2019) y Nexans, Francia (0,058 en 2020), es decir valores 14 a 23 veces inferiores a las más rentables compañías productoras de concentrados.

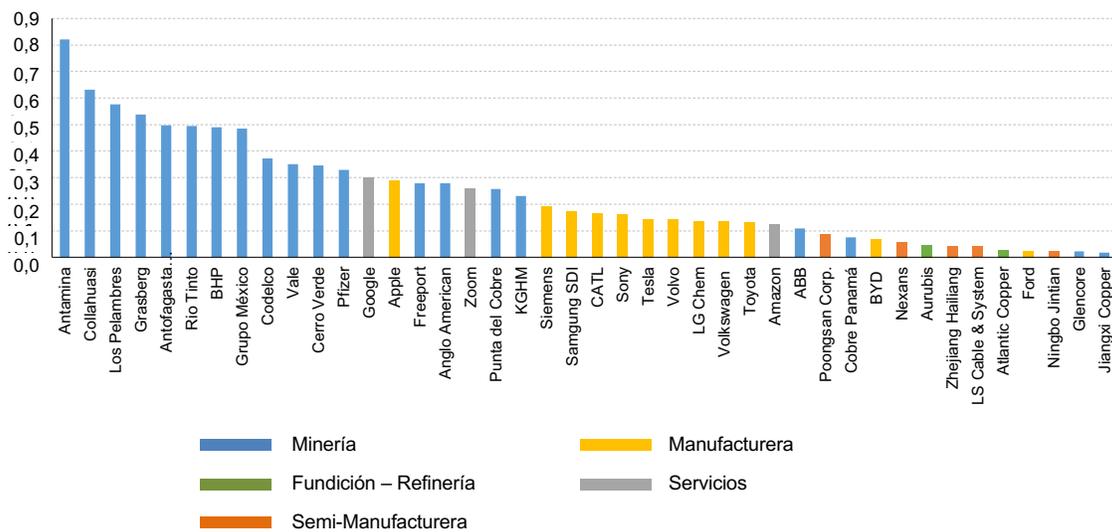
Codelco tiene un índice EBIDTA/Ventas bastante alto (0,37 en 2020), y más bajo que compañías que venden solo concentrados. Codelco produce una alta proporción de su cobre como metal refinado, es decir funde y refina una alta proporción de los concentrados que produce en sus propias instalaciones. Ello contribuye a reducir el EBIDTA debido a que tres de sus cuatro fundiciones producían pérdidas en 2019 y 2020.

Apple y Google son las únicas dos compañías de alta tecnología que tienen cocientes EBIDTA/ventas superiores a 0,29 y que no son mineras. Las grandes compañías tecnológicas, Siemens, Samsung, Sony, Toyota, VW, Volvo y otras, tienen cocientes menores a 0,2.

Es crucial indicar que estos cocientes no muestran el volumen de ventas de las empresas, en los que se observa que las empresas mineras tienen volúmenes de venta muy inferiores a las grandes empresas tecnológicas y manufactureras del mundo. Específicamente, Antamina, la empresa con mayor cociente EBIDTA/Ventas en el gráfico 5, tuvo ventas de tan solo 2,5 billones de dólares (US\$) en 2020, mientras Apple tuvo ventas de 294 billones de dólares (US\$) en dicho año, Volkswagen y Toyota tuvieron ventas de 250 bUS\$ cada una, Amazon de 386 bUS\$, y Google de 183 bUS\$. Las dos mayores mineras transnacionales BHP y RT, con altos cocientes de EBIDTA/Ventas tuvieron ventas de 45 bUS\$ cada una en 2020.

Entonces, si bien el cociente EBIDTA/Ventas es indicador de rentabilidad operacional, el volumen de ventas es indicador de impacto en las economías de los países en que se desenvuelven las empresas, y en ello las grandes mineras globales no se acercan al impacto nacional y global que tienen las grandes empresas tecnológicas y manufactureras.

Gráfico 5
Cociente Ebitda/Ventas para una muestra de compañías de diversas industrias, información de años 2019 y 2020
(EBIDTA/Ventas)



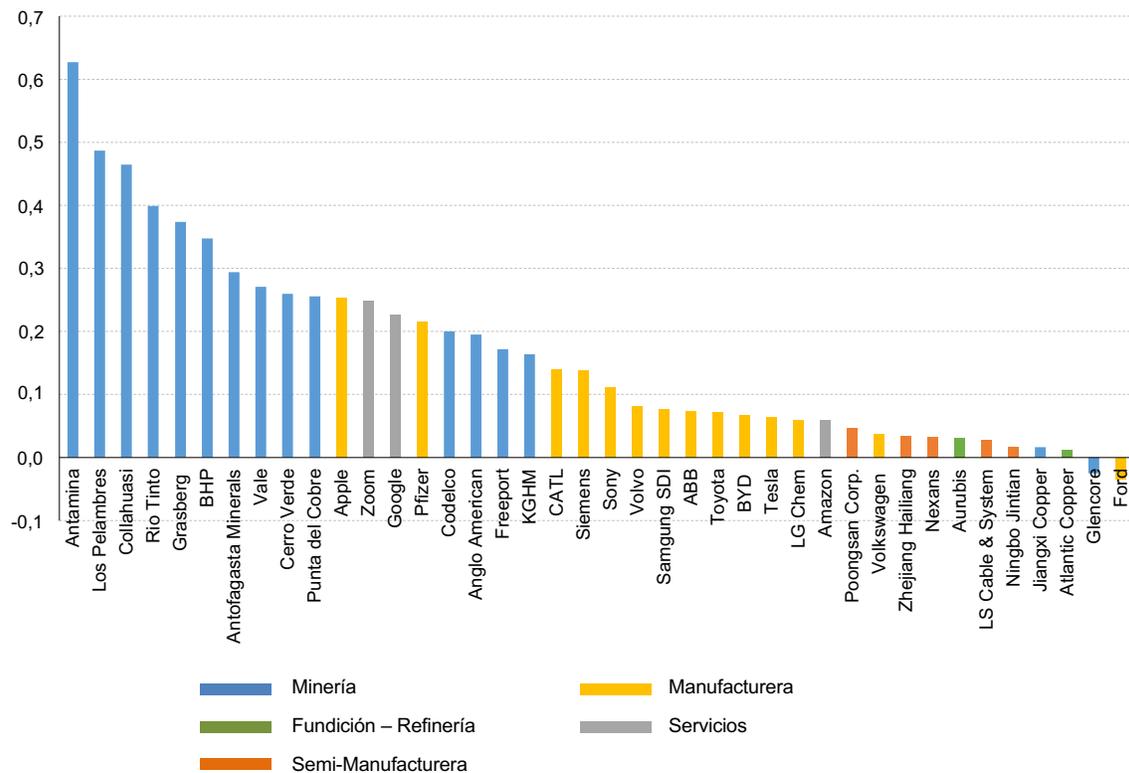
Fuente: Elaboración propia en base a estados financieros y reportes anuales de las compañías.

El gráfico 6 muestra el valor del EBIT/ventas. El índice EBIT considera la depreciación y la amortización y, por ende, diferencia las industrias intensivas en capital, como la minera, de las no intensivas en capital, como la manufacturera. El índice EBIT debiera, por ello, representar mejor la rentabilidad de las compañías que el EBIDTA. Las empresas extractivas son intensivas en capital, lo que generalmente representa una barrera de entrada, lo que favorece una estructura de costos que favorece un más alto margen de EBIDTA.

Esto se aprecia en que el cociente EBIT/ventas para las industrias extractivas es menor que el cociente EBIDTA/ventas. Se observa por ello, que algunas de las empresas extractivas se desplazan hacia la derecha en el gráfico EBIT/ventas con respecto al gráfico EBIDTA/ventas, mientras que las industrias manufactureras tienen un desplazamiento opuesto, hacia la izquierda.

En definitiva, el índice EBIT sería más apropiado que el EBIDTA para comparar empresas extractivas con empresas manufactureras.

Gráfico 6
Cociente Ebit/Ingresos para una muestra de compañías de diversas industrias, información de años 2019 y 2020 (EBIT/Ventas)



Fuente: Elaboración propia en base a estados financieros y reportes anuales de las compañías.

V. Sustentabilidad de fundiciones y refinerías

A. Análisis de emisiones de anhídrido sulfuroso

Las emisiones de anhídrido sulfuroso (SO_2) son no solo las más importantes emisiones de las fundiciones de cobre, sino que también son indicativas de las emisiones de elementos más tóxicos al medio ambiente, en particular el arsénico, el plomo, material particulado, y otros. No es posible abatir las emisiones de estos últimos elementos sin simultáneamente abatir las emisiones de anhídrido sulfuroso. Por ello, en este trabajo se focaliza la atención sobre el anhídrido sulfuroso.

Por otra parte, las emisiones de partículas a la atmósfera, medidas como $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} , dependen también, en buena medida, de la eficiencia de captura de las emisiones de anhídrido sulfuroso, debido a que el complejo sistema de manejo de polvos y gases está íntimamente relacionado entre sí en una fundición moderna.

Hay numerosas fundiciones en el mundo que capturan 99,8%, y hasta 99,9% del anhídrido sulfuroso, tal como ya fue indicado. Por último, la eficiencia de captura del anhídrido sulfuroso en una fundición de cobre es proporcional a su capacidad de producir ácido sulfúrico.

En los países Latinoamericanos, la preocupación por abatir las emisiones de anhídrido sulfuroso se hizo presente a partir de 1990 y no antes. Ello significó que hasta esta fecha la mayor parte del anhídrido sulfuroso era emitido a la atmósfera, y la capacidad de producción de ácido sulfúrico de las fundiciones Latinoamericanas era muy reducida.

Hasta comienzos de la década de los 90 era común ver en la televisión reportes sobre la contaminación generada por las fundiciones de cobre. Bastaba filmar el humo negro que salía de las chimeneas, el que producía estragos en la salud de la población y en el medio ambiente.

En Chile, el Decreto N° 185 del Ministerio de Minería (1992) estableció nuevas normas de calidad para el SO_2 , declaró zonas saturadas¹⁷ en cuanto a este contaminante en Chuquicamata, y a la Región

¹⁷ Zona saturada se define como aquella en que las normas de calidad del SO_2 han sido sobrepasadas, y zona latente es aquella en que la concentración de SO_2 se sitúa entre 80 y 100% de la norma de calidad.

Metropolitana de Santiago. Al mismo tiempo declaró como zona latente la comuna de Catemu en donde está ubicada la fundición de Chagres, perteneciente a la Compañía Minera Disputada de Las Condes.

También dispuso el establecimiento de redes de monitoreo en Salvador (donde está ubicada la fundición de Potrerillos de Codelco), en Copiapó, donde está ubicada la fundición Hernán Videla Lira de la Empresa Nacional de Minería (Enami), en Ventanas, donde está ubicada la fundición de Ventanas de Enami, y en Caletones, donde está ubicada la fundición de Caletones, perteneciente a la División El Teniente de Codelco.

Posteriormente se dictarían los decretos que establecían planes de descontaminación para todas estas fundiciones, fijando los límites de emisión de SO_2 , arsénico, y partículas.

Cabe agregar que el Decreto 185 fue señero en Chile, por cuanto se dictó antes de que se votara en el Congreso Nacional la Ley de Bases del Medio Ambiente N° 19.300, de 1994.

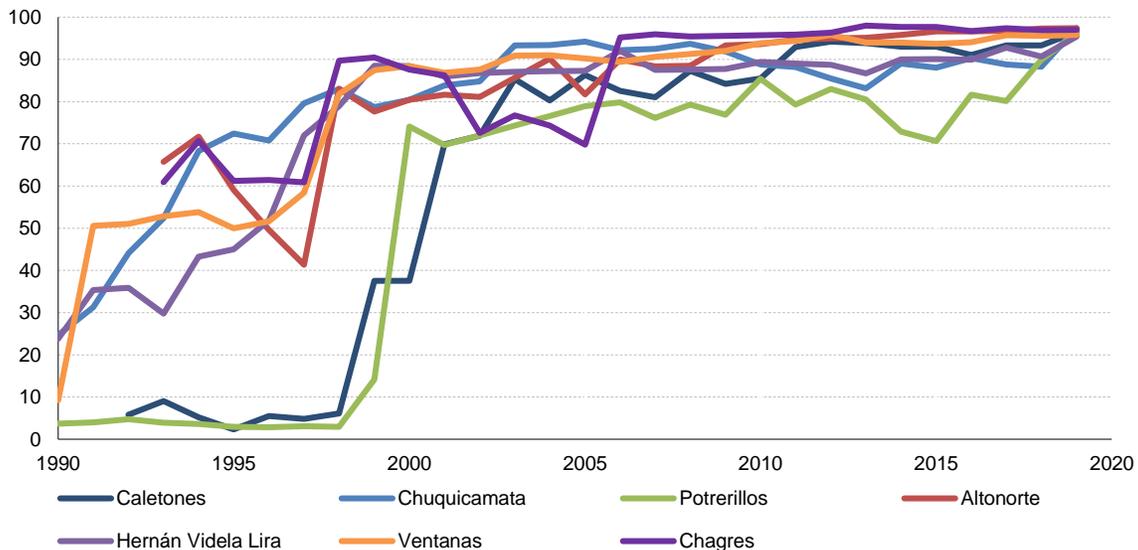
De esta manera, las fundiciones de cobre chilenas comenzaron a realizar inversiones ambientales para limitar sus emisiones atmosféricas.

En 2013 se dictó el Decreto Supremo N°28 del Ministerio de Medio Ambiente, que definió que las fundiciones de cobre chilenas debían capturar a diciembre 2018 al menos el 95% del anhídrido sulfuroso que generaban. Si bien era un avance importante, fue una meta tímida comparada con el 97% promedio de captura de SO_2 que lograban las fundiciones en el mundo en 2016.

En 2020, de acuerdo con la información proporcionada, todas las fundiciones de cobre chilenas habían cumplido con las exigencias del Decreto 28.

El gráfico 7 muestra el porcentaje de captura de las siete fundiciones chilenas desde 1990 a 2019.

Gráfico 7
Porcentaje de captura y fijación de azufre en fundiciones de cobre chilenas 1990-2019
(En porcentaje de captura y fijación de azufre)



Fuente: Elaboración propia en base a reportes de sustentabilidad, informes de fiscalización y Minería UC (2021).

En México, la fundición La Caridad, perteneciente a Grupo México, fue creada en 1986 para procesar los concentrados producidos por la mina La Caridad, también perteneciente a Grupo México, y por otras minas. En 1988 se construyó la primera planta de producción de ácido sulfúrico, con lo que sus emisiones

de SO₂ se redujeron. En 2019 Brosig et al. (2019) midieron que la captura de azufre era de 98,2%. Esta fundición tiene un edificio construido que cubre todas sus instalaciones y en 2020 debían entrar en funcionamiento nuevos equipos para aumentar la captura de SO₂ y otros contaminantes a más de 99%. En 2020 esta fundición tenía una capacidad de producir 258 mil toneladas de ánodos (Incomare, 2021).

En Brasil, la fundición de Caraíba fue inaugurada en 1982 con plantas de ácido que permitían una captura del 89% del azufre contenido en los concentrados. La capacidad de las plantas de ácido fue incrementada en 2005 y nuevamente en 2011, para compensar el aumento de tratamiento de concentrado, capturando el 89% del azufre hasta 2020. En 2020 su capacidad de producción de concentrados de cobre era 200 mil toneladas de ánodos (Incomare 2021).

En Perú, la fundición de Ilo fue construida en 1960 con una mínima capacidad de producción de ácido sulfúrico. Dicha capacidad fue expandida a 30% en 1995% y nuevamente a 92% en 2007. En 2020 su capacidad de producción de ánodos era 292 mil toneladas (Incomare, 2021). Perú también tuvo la fundición La Oroya, construida en 1922, la que fue cerrada debido a problemas ambientales en 2009.

Entre las 10 fundiciones de cobre en Latinoamérica, sobresale La Caridad desde la perspectiva de la captura de SO₂. En 2019 Chile modificó la norma de calidad del SO₂ mediante el Decreto 103 del Ministerio del Medio Ambiente, creando un estándar horario que no existía antes. Hasta 2019 Chile sólo tenía estándar primario anual y diario del SO₂. Era evidente que estos estándares eran inadecuados por cuanto este gas tiene efectos agudos, los que pueden causar incluso la muerte cuando generan una alta concentración durante cortos periodos de tiempo. El cuadro 7 muestra la progresión de la norma primaria para el SO₂ en Chile, en EEUU (la Agencia de Protección Ambiental USEPA) y en Canadá. También se muestra la Guía de la OMS para esta norma.

Cuadro 7
Normas primarias de SO₂ (µg/Nm³)

| Normas de calidad SO ₂ | 1978 | 2003 | 2019 | 2005 | 1971 | 2010 | 2016 | 2020 | 2025 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | Chile | Chile | Chile | OMS | JSEPA | USEPA | Canadá | Canadá | Canadá |
| Anual | 80 | 80 | 60 | X | 80 | X | 26 | 13 | 10,5 |
| 24 hrs | 365 | 250 | 150 | 20 | 365 | X | X | X | X |
| 1 hr | | | | X | | 196 | 450 | 183 | 170 |
| 10 min | | | | 500 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la norma dictada por Chile en 2019 es menos exigente que la norma de la USEPA dictada en 2010, y mucho menos exigente que la guía de la OMS dictada en 2005. La USEPA revisó la norma elaborada en 2010 y decidió mantener el mismo valor de 196 µg/Nm³, que representa un valor protector de las personas ante todos los efectos que produce el SO₂. Al mismo tiempo la USEPA eliminó la norma diaria y anual ya que concluyó que si se cumplía la norma horaria, también se cumplirían las otras dos.

El hecho que Chile tenga una norma menos exigente que la de la USEPA tiene al menos dos significados.

El primero es que es estándar de calidad primario chileno para el SO₂ debe hacerse más exigente que el actual en algún momento en el futuro con objeto de proteger integralmente la salud de la población. El aumento del estándar económico del país, medido en ingreso per cápita, ha significado que los chilenos sean cada vez más exigentes en cuanto a la protección de la salud y del medio ambiente en los últimos 30 años. Este proceso continuará, y por ello se puede esperar que las fundiciones de cobre tendrán que emitir menos SO₂, realizando las inversiones necesarias para lograrlo.

El segundo significado es que aquellas fundiciones que no puedan financiar estas inversiones deberán cerrar. Es previsible que tres de las siete fundiciones chilenas deberán cerrar en el futuro debido a que su tamaño actual no es suficientemente importante como para poder financiar estas inversiones. Dos de estas tres fundiciones, Ventanas y Hernán Videla Lira, esta última ubicada en Copiapó, están situadas en zonas con alta densidad de población. Adicionalmente, Ventanas no podría cumplir con la actual norma a partir de 2023 ya que la forma de determinar la excedencia de la norma se modifica a partir de dicho año, haciendo que la norma actual sea más exigente. La tercera fundición, Potrerillos, ubicada en la comuna de Salvador en la Región de Atacama, tiene mayor tamaño, pero su ubicación exige que la alimentación de concentrados sea vía terrestre, lo que es de alto costo.

De esta manera, es previsible que la capacidad de fundición en Chile se reduzca en aproximadamente en 23%. Ello daría la oportunidad de construir una nueva fundición con esa capacidad o parecida, manteniendo constante la capacidad de fundición del país.

B. Impactos sociales

Los impactos sociales generados por las fundiciones y refinería de cobre comprenden la generación de beneficios y costos para la sociedad. Entre los beneficios está la generación de empleo, la tributación, el desarrollo científico y tecnológico, la posibilidad de gestionar integralmente la carbono-neutralidad del cobre refinado, el efecto reputacional de operar una instalación de frontera en protección ambiental, y lograr una mayor calidad de vida de las comunidades vecinas.

Por otra parte, los costos sociales incluyen la generación de gases efecto invernadero, y numerosos impactos ambientales que pueden dañar el medio ambiente y la salud, entre ellos la emisión de anhídrido sulfuroso, arsénico, plomo, y material particulado a la atmósfera, la ocupación de territorio, la emisión de desechos tales como las escorias y desechos líquidos y sólidos.

Un complejo F-R bien manejado puede reducir los impactos ambientales a niveles mínimos, tal como ocurre con numerosas instalaciones en los Estados Unidos, Europa y Asia.

Todas las fundiciones de América Latina tienen historias de alta contaminación y daño a la salud y al medio ambiente sobre todo cuando retrocedemos dos, tres y cuatro décadas. Ello creó una memoria colectiva que aún está presente en 2021, a pesar de las mejoras evidentes que las fundiciones introdujeron en los últimos 10 años en cuanto a emisiones.

No será fácil demostrar a la población que las fundiciones pueden ser instalaciones altamente sustentables en lo ambiental. Se requiere también, mayor transparencia y visibilidad de las iniciativas y resultados logrados (y de aquellos que se buscan alcanzar) para reducir los impactos sobre el medioambiente.

En la actualidad, a juzgar por las cifras de captura de azufre indicadas en la sección V.A, el problema se ha mitigado en forma muy importante pero no ha desaparecido. Una fundición con captura de 95% del azufre contenido en los concentrados procesados, tal como lo exige el Decreto 28, puede emitir anhídrido sulfuroso de tal forma de generar eventos de contaminación notorios para la población.

La Superintendencia del Medio Ambiente formuló cargos de daño grave y gravísimo a la fundición Hernán Videla Lira en Copiapó por emisiones que contravenían la norma de emisión del Decreto 28¹⁸. Ello es sorprendente ya que esta fundición instaló los equipos para cumplir con dicha normativa, y además es una fundición de pequeño tamaño, es decir sus emisiones de anhídrido sulfuroso no debiesen superar las 6 mil toneladas de azufre anual, menos de la mitad de lo que emiten

¹⁸ Miércoles, 22 de Julio de 2020 a las 18:12hrs, Periodista Digital: Cooperativa.cl.

fundiciones de gran tamaño que operan con el mismo Decreto 28. Esta fundición está ubicada en una zona de la ciudad de Copiapó y por ello cualquier evento que ocurra es detectado por la población.

Algo similar ocurre en Ventanas, aunque esta ha tenido un manejo ambiental más exitoso desde hace tres años.

Incluso las fundiciones más avanzadas en el control de las emisiones, tales como Chagres, Altonorte y La Caridad están sujetas a eventos de contaminación que pueden revivir las memorias sobre los daños ambientales y a la salud que ocurrieron en el pasado.

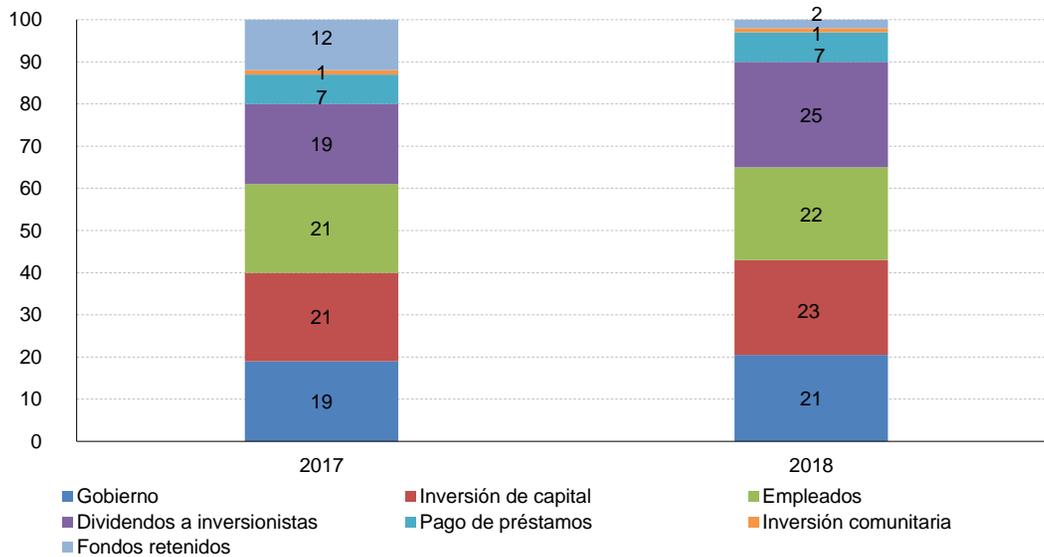
Es decidir que en la ciudad de Antofagasta se haya publicado un sinnúmero de estudios en los últimos cinco años indicando el daño producido por el transporte y el acopio de concentrados ricos en metales tóxicos en el puerto. Ello es expresión no sólo que los daños ambientales y a la salud originados en la minería y en las fundiciones no se olvidan, sino que sus efectos más demostrables siguen presentes hasta la actualidad. Esta situación también obedece al hecho que la sociedad chilena, y también la de otros países Latinoamericanos, se ha transformado en más cuestionadora de las faltas ambientales, es decir las normas que se exigen en la actualidad son mucho más estrictas que las que se exigían hace una y dos décadas atrás.

Ello enfatiza la necesidad que cualquier nueva F-R que se establezca en Chile o en cualquier otro país Latinoamericano deberá cumplir con normas equivalentes a las mejores fundiciones del mundo, tales como Tamano en Japón, Aurubis en Hamburgo, Huelva en España, Garfield en EEUU. Y Guixi en China, por nombrar sólo algunas. Estas fundiciones y muchas otras capturan 99,8% del azufre o más, y aun así se ven exigidas de mejorar sus estándares ambientales en dichos países. Ello significa que los estándares que se usan actualmente en las fundiciones de Latinoamérica, si bien son mucho mejores que los que se aplicaban hace dos décadas, son aún muy insuficientes para satisfacer las exigencias de la población.

En cuanto a los beneficios que generan las fundiciones, algunos de estos son importantes comparativamente con las instalaciones mineras, pero otros no lo son.

Una nueva F-R instalada en Chile demora muchos años en recuperar sus inversiones y, por ello, no pagaría impuestos en dichos años. Los gráficos 8 y 9 muestran evidencia que la minería aporta más recursos a los gobiernos que las instalaciones industriales justamente porque la minería tiene pago de royalties, lo que una fundición no tiene. El gráfico 8 indica que la generación de valor por parte de las 40 mayores compañías mineras que se transan en bolsa a nivel global estuvo balanceada en 2017 y 2018 entre aporte a gobiernos, remuneraciones de empleados, inversión de capital, y aporte a los accionistas. Cada uno de estos recibió entre un cuarto y un quinto del valor agregado generado. Indicativamente, el aporte voluntario a las comunidades representó solo el 1%, en línea con lo que se observa en América Latina.

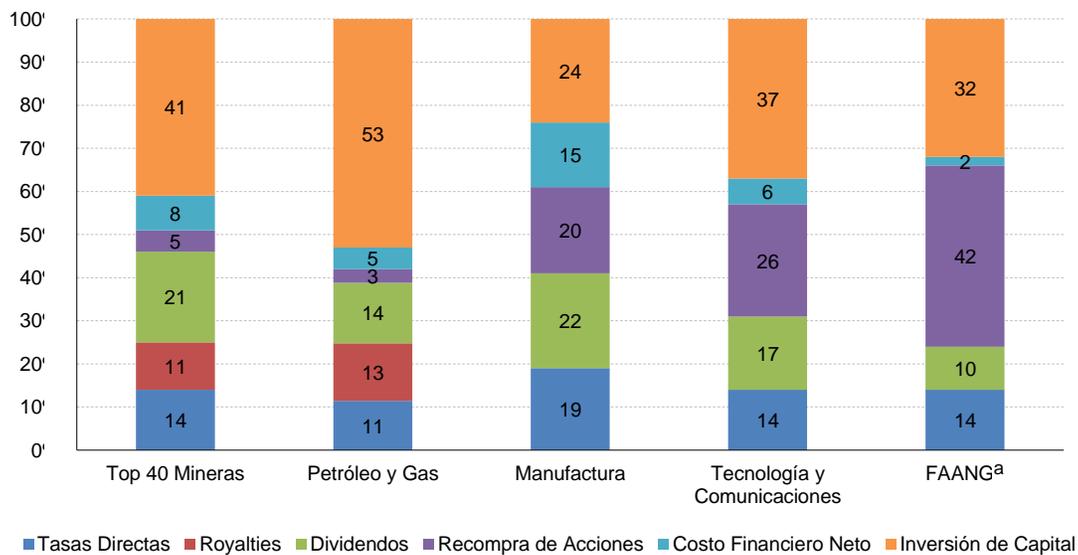
Gráfico 8
Distribución del valor agregado de las 40 mayores mineras globales transadas en bolsa, 2007 y 2018
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PwC (2019).

El gráfico 9 muestra un segmento de la distribución de valor (no indica los salarios) comparativo de la minería con otras actividades. Se observa que la minería debe su alto aporte a la tributación debido al efecto del pago de un royalty, superando ampliamente el aporte de la manufactura, y que la inversión es también más importante en la minería.

Gráfico 9
Distribución del valor agregado de las grandes mineras globales transadas en bolsa, y de otras actividades económicas. Promedio 5 años (2014-2018)
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PwC (2019).

^a FAANG: Facebook, Apple, Amazon, Netflix y Google.

La generación de empleo de un complejo F-R que trata y procesa 1,5 millones de toneladas de concentrados por año genera empleo de calidad y con altas remuneraciones. El número de trabajadores totales varía según la productividad. Las fundiciones con mayor productividad del mundo tienen 0,5 hrs de trabajo por tonelada de concentrado tratado, mientras que, en América Latina, la peor productividad de una fundición era del orden de 12 veces menor en 2018, y la mayor (Ilo en Perú) era 2,6 veces peor. La fundición evaluada en el capítulo 4 de este trabajo apunta a una productividad del nivel de 0,9 hr/t, la que comparada con las fundiciones chilenas actuales es un valor ambicioso, pero no imposible. Ello significaría una dotación de 650 trabajadores, incluidos profesionales. En términos de empleo indirecto, se puede estimar un número adicional de 1.700 empleos.

En cuanto a tributación, una F-R de 1,5 millones de toneladas de capacidad de tratamiento de concentrados tarda poco más de 6 años a partir del inicio de la operación en recuperar el capital, utilizando depreciación acelerada, y paga aproximadamente 120 US\$ millones de dólares de impuesto a partir del año 7. Antes del año 7 el pago de impuesto es menor, variando entre año 3 y 6 en que paga aproximadamente 20 millones de US\$ anuales.

El impacto social local de una instalación industrial que tiene protección ambiental de clase mundial, situada en localidades seleccionadas del norte de Chile, puede ser extremadamente importante si es que dicha instalación va acompañada de un esfuerzo de capacitación técnica de la población local.

Otro aspecto de importancia en cuanto a beneficios es que una instalación de estas características tendría un efecto demostrativo de alto impacto no solo para demostrarle a la población que puede haber complejos F-R de alta protección ambiental, sino que constituiría un centro de influencia, a ser imitado por otras fundiciones del país y de América Latina, y también podría transformarse en un foco de formación de trabajadores y técnicos de excelencia en la gestión avanzada de fundiciones y refinerías.

Finalmente, el activo reputacional que ganaría una F-R de estas características podría ser un foco de investigación e innovación, utilizando para ello no sólo los fondos estatales que financian estas actividades, sino que revitalizando a la academia de las universidades para realizar investigación de punta en temas metalúrgicos.

C. Regulaciones para el transporte de concentrados

La potencial implementación de regulaciones de transporte marítimo y terrestre de concentrados más estrictas que las actuales pueden traducirse en mayores costos de exportación y eventualmente pueden llegar a prohibir su transporte, dependiendo de su composición y de la potencial clasificación del concentrado de cobre como sustancia peligrosa en la normativa de transporte internacional.

En la línea de la clasificación de sustancias peligrosas, Chile aprobó en febrero 2021 el reglamento de Clasificación, Etiquetado y Notificación de Sustancias Químicas y Mezclas Peligrosas, vinculado al Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos, GHS, de las Naciones Unidas (UN, 2019a). Este sistema tiene como propósito desarrollar un marco armonizado para identificar los peligros intrínsecos que se encuentran en sustancias y mezclas, clasificarlos, y comunicar los peligros físicos, químicos y toxicológicos de los productos químicos para la salud humana y el medio ambiente, con el propósito de permitir la implementación de precauciones de seguridad durante el uso o transporte de sustancias o mezclas químicas. El sistema GHS considera tres tipos de peligros, físicos, a la salud humana y al medio ambiente, y dentro de cada tipo considera diversas clases de peligros (endpoints).

En relación con el cobre, la base de datos del catálogo de clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA en sus siglas en inglés), basado en el sistema GHS, reporta clasificaciones de toxicidad humana y acuática para cobre metálico granulado, basado en la información entregada por más de 3.500 compañías a partir de más de 60 notificaciones. Por otra parte, ICA (2020) publicó un estudio donde señala que la clasificación de peligros bajo el sistema GHS es un proceso complejo,

que requiere trabajar con muchos tipos de datos de variada complejidad para los distintos tipos de clases de peligro, como toxicidad humana, carcinogenicidad, o toxicidad acuática, donde los datos pueden ser conflictivos, inadecuados e inconsistentes, y a veces es necesario utilizar herramientas basadas en juicio experto para interpretar datos complejos. En ese contexto, en el estudio de ICA se evalúan y proponen clasificaciones de peligros para la salud humana y el medio ambiente aplicables a tres formas de cobre metálico, basado en el GHS, de acuerdo con lo señalado en el cuadro 8 con el propósito de ofrecer una guía para reguladores y grupos interesados basada en la mejor información científica disponible. Las formas de cobre evaluadas fueron sólida, granulada, y como copos de cobre recubiertos con ácido alifático. Las formas de cobre masivo y en polvo no recibieron clasificaciones de peligro para la salud humana, pero sí para toxicidad acuática. La forma de copo de cobre recubierto, por su parte, sí presentó clasificaciones relativas a la salud humana, junto a clasificaciones de toxicidad acuática.

Cuadro 8
Resumen de clasificaciones GHS para cobre metálico

| Forma de Cobre Metálico | Clasificación de Peligro GHS |
|---|--|
| Cobre Masivo CAS: 7440-50-8, EC: 231-159-6 | Toxicidad Acuática Aguda Categoría 3 |
| Polvo de Cobre CAS: 7440-50-8, EC: 231-159-6 | Toxicidad Acuática Aguda Categoría 1 (M factor = 1) Toxicidad Acuática Crónica Categoría 3 |
| Escamas de cobre recubiertas Sin asignación de número CAS o EC | Toxicidad Oral Aguda Categoría 4 Toxicidad Inhalación Aguda Categoría 3 Irritación Ocular Categoría 2A Toxicidad Acuática Aguda Categoría 1 (M factor = 10) Toxicidad Acuática Crónica Categoría 2 |

Fuente: Reproducido de ICA (2020) del original en inglés. <https://copperalliance.org/about-ica/>.

Nota: GHS = Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals; M Factor = factor multiplicador.

Las Naciones Unidas ha elaborado una serie de reglas relativas al transporte multimodal de mercaderías peligrosas, las que están contenidas en el documento "Recomendaciones de las Naciones Unidas relativas al transporte de mercancías peligrosas". En dicho documento se presenta una clasificación de materiales peligrosos, sin embargo, en su última versión (UN, 2019b) no se hace referencia dentro de este listado al concentrado de cobre, pero sí a algunos compuestos químicos que contienen cobre. Australia y Perú poseen legislación basada en las recomendaciones de las Naciones Unidas, pero a diferencia de este último, clasifican a los concentrados minerales como sustancias peligrosas.

En el ámbito del transporte marítimo, la Organización Marítima Internacional (IMO en sus siglas en inglés) ha desarrollado una regulación internacional relativa al transporte marítimo de materiales en bultos y a granel en forma sólida, que considera los peligros de estos materiales tanto físicos, como para la salud humana y el medio ambiente, con el objeto de controlar sus riesgos y tomar las medidas adecuadas para procurar un transporte seguro y la protección del ambiente marino de sustancias contaminantes.

Estas regulaciones incluyen el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG, en sus siglas en inglés), la Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL, en sus siglas en inglés), en particular es de interés para los concentrados de cobre el Anexo V, y el Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel (IMSBC, en sus siglas en inglés). La evaluación de los peligros en dichas regulaciones considera los criterios del Sistema GHS, los que aplican a minerales y concentrados de minerales, sin embargo, los criterios GHS proveen una orientación limitada para materiales complejos como minerales y concentrados de cobre (ICMM 2014; Male 2017).

El Anexo V de Marpol, que rige desde 2012, prohíbe la descarga de todo tipo de basura al mar, a menos que sea explícitamente permitida. Si los residuos de carga seca, y del agua de lavado que contiene dichos residuos, son clasificados como dañinos al medio ambiente marino (HME en sus siglas en inglés, ellos deben descargarse en puerto en áreas especialmente habilitadas, lo que implica mayores costos asociados.

El IMSBC tiene por objetivo facilitar la estiba y transporte seguro de carga sólida a granel, y estableció la categoría de Materiales Peligrosos solo a Granel (MHB, en sus siglas en inglés), ya que estos materiales tienen peligros químicos distintos cuando se transportan a granel, que los diferencia de la codificación IMDG focalizada en el transporte de bienes en forma empaquetada. Los exportadores deben declarar si sus exportaciones se clasifican en las categorías de HME y/o MHB. Estas clasificaciones implican para el personal expuesto el uso de elementos de protección, como protección ocular, filtros respiratorios y ropa protectora.

Los concentrados de cobre, al contener impurezas catalogadas como tóxicas, como arsénico y plomo, dependiendo de su concentración, pueden ser catalogados como materiales tóxicos de acuerdo con las normativas de clasificación de peligros expuestas.

ICMM (2014) publicó un documento donde explica los diferentes alcances de estas regulaciones de transporte marítimo, y provee una guía para la clasificación general de peligros de minerales y concentrados que puedan utilizar los titulares mineros para el despacho de sus productos. En el documento del ICMM se indica que en el Sistema GHS, minerales y concentrados de diversos metales cubren diversas categorías de peligros, tanto a nivel de la salud humana, del medio ambiente y de peligros físicos. El Código IMSBC considera una sección explícita para concentrados y concentrados de cobre, clasificándolos dentro de las categorías de carga A (cargas que pueden licuarse) y B (cargas que poseen peligros químicos) para la clase de salud humana, con una ficha general para concentrados genéricos y otra para concentrados de sulfuros metálicos, donde en 2018 se agregó la frase “algunos concentrados de sulfuros metálicos pueden tener efectos agudos y a largo plazo sobre la salud”¹⁹, y otra específica para concentrados de cobre categorizados como A, donde la mayor preocupación radica en controlar su límite de humedad transportable para evitar su licuación.

Según ICMM (2014) el Código IMDG clasifica minerales y concentrados genéricos en la clase de salud humana como sustancias tóxicas para efectos de toxicidad agua vía oral, dérmica y por inhalación (clase 6.1), y como sustancias corrosivas (clase 8), además de tener diversas clasificaciones en la clase de peligros físicos. Finalmente, según el mismo documento la convención Marpol clasifica los minerales o concentrados genéricos como dañinos al medio ambiente marino (HME), en algunas clases de peligros de salud humana²⁰.

Actualmente se está discutiendo un proyecto de ley²¹ en el parlamento, que en su redacción original propone que las actividades de traslado, recepción, acopio y embarque de concentrado de cobre

¹⁹ Un estudio del European Copper Institute (ECI, 2014a) reportó que el 30% de los concentrados de cobre pueden cumplir con los requisitos para ser clasificados como sólidos tóxicos y por lo tanto MHB, debido a la presencia de elementos menores (especialmente plomo, pero en algunos casos también cadmio, arsénico y/o níquel). Además, indicó que el potencial de los concentrados de cobre para ser corrosivos o para ser clasificados como sólidos que evolucionan a gases inflamables cuando están húmedos y sólidos que desprenden gases tóxicos necesita más investigación. De acuerdo a Male (2017), esta modificación sería producto del análisis por parte de IMO de un análisis de 110 muestras de concentrado de cobre del año 2016, donde se determinó la presencia de arsénico, plomo, níquel, y cadmio, con una media de concentración de 0,11% de arsénico y un valor máximo de 7,11%. Ello permitió indicar que una proporción de los concentrados de cobre tenía elementos tóxicos, de manera que se clasificaron como Materiales Peligrosos Solo a Granel, MHB en sus siglas en inglés.

²⁰ Otro estudio del ECI (2014b) sugirió que solo los concentrados con alto contenido de calcosina merecen la clasificación HME, y que el resto los otros minerales de cobre evaluados (calcopirita, bornita, diginita, covellita, enargita y tenantita) no serían candidatos a recibir dicha clasificación. La calcosina representaría sólo del 3 al 4% de 119 muestras de concentrados evaluados. Male (2017) reporta que la IMO, en enero de 2017, reportó que el 20% de los concentrados de cobre merecen ser definidos como peligrosos para el medio marino (HME), dados sus valores de referencia de ecotoxicidad, clasificándolos como “Acuático agudo 1”. Ello por la mayor solubilidad de algunos minerales de cobre, como la calcosina respecto a otros relativamente insolubles como la calcopirita.

²¹ Boletín N°10629-12.

se incluyan y sujeten expresamente en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, por su susceptibilidad de causar impacto ambiental.

Además, propone establecer normas para el desarrollo de dichas actividades, tales como el empleo de medios completamente herméticos y con los grados de humedad necesarios para evitar su volatilidad durante el transporte, que durante las actividades de carga, descarga y acopio de concentrados no se emitan partículas, y que los proyectos de involucren estas actividades sean informados a la autoridad para que ésta proponga rutas de transporte que minimicen la exposición de concentrados a la población. Finalmente, se propone eximir del requerimiento de someter estas actividades al SEIA a los pirquineros y pequeña minería, los cuales se someterían a un reglamento especialmente preparado por los ministerios de Minería y Medio Ambiente. En relación a este proyecto, diversas entidades públicas y privadas sugieren que no es necesario incluir por ley explícitamente estas actividades en el ámbito del SEIA, ya que la legislación vigente sí las incorpora en forma indirecta.

Por otro lado, se han planteado regulaciones en torno a limitar la importación de concentrados de cobre con niveles relativamente altos de contaminantes. Este es el caso de China, donde desde 2006 rige una normativa que limita la concentración de arsénico (0,5%), plomo (6%), cadmio (0,05%), entre otras impurezas, en la importación de concentrados de cobre. A mediados de 2019 la autoridad china estuvo consultando con representantes de fundiciones de ese país la posibilidad de hacer más exigente la norma, reduciendo los contenidos máximos a 0,4% para el arsénico, 4,7% para el plomo, y 0,03% para el cadmio, entre otros (Metall Bulletin, 2019). Este escenario se contrapone por una oferta de concentrados con contenidos relativamente altos de arsénico que seguirá aumentando en el futuro (según McKinsey esta proporción es actualmente de 8%, pudiendo llegar entre 9% a 13% en 2028), situación que promueve la mezcla de dichos concentrados con otros "limpios", de menor concentración de arsénico, a fin de cumplir con las tolerancias permitidas, para lo cual la fundiciones china están en conversaciones con la autoridad china (Metall Bulletin, 2020a). En agosto de 2020 el Servicio de Aduanas de China autorizó a un grupo de fundiciones chinas a importar y procesar concentrados complejos, y estabilizar sus desechos (Metall Bulletin, 2020b). El siguiente paso es el definir los detalles de la construcción y operación, y el desarrollo de guías para la minimización de riesgos de contaminación.

D. La huella de carbono de fundiciones y refinerías

1. Introducción

En esta sección se estiman y analizan las emisiones de los gases efecto invernadero, GEI, de fundiciones y refinerías de cobre en distintos casos.

El objetivo de realizar dicho análisis es estimar las mínimas emisiones de GEI logrables en una F-R chilena de acuerdo con la tecnología actual y considerando los procesos estudiados. Dicho mínimo establece la meta para adquisición de bonos de carbono, con objeto de lograr la carbono-neutralidad de la F-R.

Los GEI de una F-R consisten en el CO₂ y otros gases que tienen un efecto equivalente en el calentamiento global, cuando estos gases son emitidos a la atmósfera. Una F-R emite GEI a partir de tres **alcances**.

El primero es en las operaciones de la F-R, incluyendo la quema de combustibles fósiles para el secado de los concentrados alimentados a la fundición, para el equilibrio térmico de los hornos de fusión y conversión, como agente reductor en los hornos de refinación, la quema de diésel en los motores de vehículos que operan en la fundición, y para el calentamiento del electrólito de la refinería, el producto de reacciones químicas de reactivos usados en estos procesos, los residuos y emisiones, y el CO₂ y gases equivalentes emitidos por las personas que trabajan en la F-R en sus funciones de trabajo ya sea al interior o exterior de las instalaciones.

El **segundo** alcance está dado por la producción de electricidad requerida para la F-R. Se incluye aquí el CO₂ y gases equivalentes emitidos durante la fabricación y transporte de los combustibles fósiles y de otros materiales requeridos para la generación de la electricidad.

El **tercer alcance, aguas arriba** de la F-R, incluyendo la fabricación y transporte a esta de materiales, sustancias, combustibles, servicios, por la compra y arriendo de equipos e instalaciones, y por el transporte de las personas que trabajan en la producción de dichos bienes o servicios. El insumo más importante de la fundición son los concentrados, por lo que la huella de producción del concentrado está incluida en el alcance tres de una F-R.

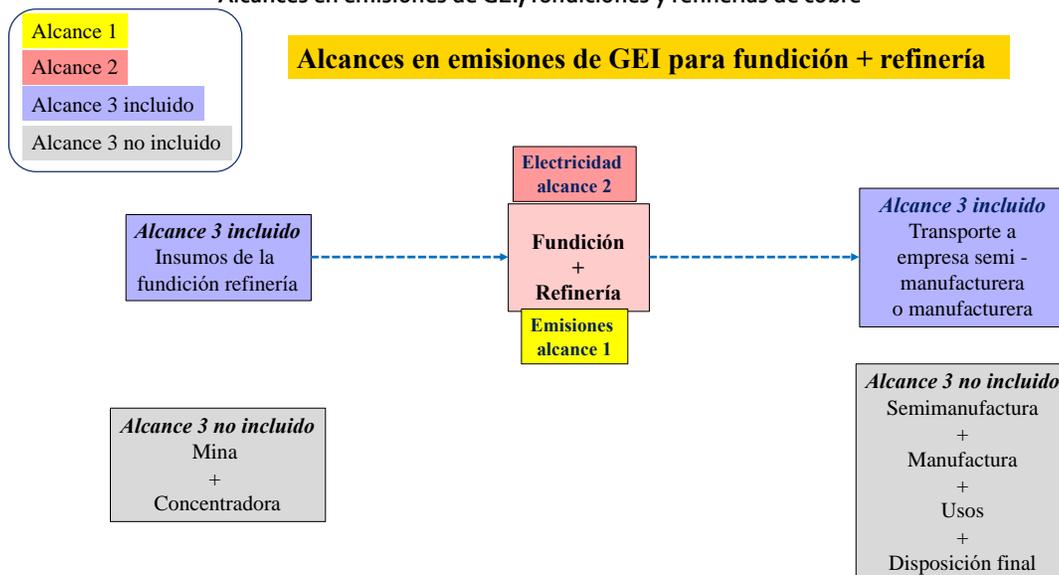
También son alcance tres las emisiones de GEI aguas abajo de la F-R, incluidos el transporte de cátodos a las operaciones de semi manufactura, la fabricación de productos que contienen cobre (automóviles, computadores, motores, etc.), y el uso y destino final de dichos productos después de su vida útil.

En el presente estudio se estima los alcances 1,2, de una F-R. Respecto del alcance 3 se incluye solo información sobre los insumos aguas arriba, sin considerar el concentrado, ni su transporte a la F-R. La producción de concentrados, así como su transporte a la fundición no se consideran ya que el objetivo del estudio es comparar el desempeño ambiental de una F-R, incluida su huella de carbono. De esta forma es sencillo que estas estimaciones sean utilizadas para realizar comparaciones con otras fundiciones refineras. Las características del concentrado, en particular la concentración de cobre y de azufre y la cantidad de impurezas, influyen fuertemente en la estimación. Asimismo, influye la cantidad de chatarra de cobre que se añade a la carga de la fundición.

El producto funcional de las estimaciones es por lo anterior un cátodo colocado en la puerta de la refinera.

Desde esta perspectiva, el diagrama 8 indica los diversos alcances en la emisión de GEI de la minería del cobre y de las compañías manufactureras que utilizan cobre. El diagrama 8 muestra las definiciones de alcances 1, 2, y 3 para una F-R, e indica que aspectos son tratados en este trabajo.

Diagrama 8
Alcances en emisiones de GEI, fundiciones y refineras de cobre



Fuente: Elaboración propia.

En Chile, tal como se indicó en sección anterior, la tecnología predominante en 2019 era la Teniente, seguida de la Flash, y Noranda.

Si bien la tecnología utilizada en la fusión tiene influencia en la emisión de GEI, de mayor importancia que esta es la eficiencia de recuperación de cobre, la ley de cobre de los concentrados y chatarra que entran a la fundición, la combinación de combustibles utilizados en los diversos y complejos procesos de fusión, como así también la composición de la matriz de generación de electricidad.

Este estudio considera una tecnología de fusión, que consiste en un convertidor Teniente en conjunto con convertidores Peirce Smith. El estudio no considera diversas tecnologías de electro refinación ya que se estima que la emisión de GEI de las diversas tecnologías usadas comercialmente en el mundo no varía significativamente.

El estudio estima, primero, las emisiones GEI alcance 1, 2, y parte del 3 de una F-R chilena, en que la fundición tiene alimentación de concentrados con baja carga de impurezas, en particular, de arsénico. Este caso se estima con energía eléctrica suministrada en 2018 por el sistema eléctrico nacional (SEN).

Un segundo caso estimado es igual al primero, excepto que la totalidad de la electricidad es suministrada por fuentes de energías renovables no convencionales (electricidad vía concentración de energía solar, o CSP en sus siglas en inglés, con sistema de almacenamiento térmico que le permite generar energía en forma continua las 24 horas).

Un tercer caso se basa en el segundo caso, pero utilizado hidrógeno verde en vez de combustibles fósiles para el secado de concentrado, para el equilibrio térmico de los hornos de fusión y conversión, como agente reductor en los hornos de refino, y en el calentamiento de las soluciones de la electro refinación. Es posible que en el futuro haya soluciones para impulsar camiones, trenes y barcos con hidrógeno verde. Por ahora estas tecnologías no están disponibles.

Por otra parte, se compara las emisiones de GEI del complejo F-R del caso N°1, cuando dicho complejo está instalado en Chile (en Mejillones), y cuando está instalado en la vecindad de Shanghái, China.

Finalmente se realiza una comparación de emisiones de GEI del caso 1 con la fundición refinaria de Aurubis en Hamburgo, Alemania, y se realiza una discusión sobre diversos aspectos tecnológicos que influyen en la emisión de GEI.

La sección V.D.2 contiene una breve descripción de la metodología.

2. Metodología

La metodología de estimación de los GEI se denomina análisis o evaluación de ciclo de vida, y está definida en la norma ISO 14.044. Tal como se indicó, dicho análisis fue realizado desde la cuna (obtención de materias primas, sustancias y bienes requeridos para la producción de cobre refinado) hasta la puerta de la planta (obtención de cátodos). Como se indicó previamente, no se consideró el transporte de los insumos desde el fabricante a la planta, ni la huella de la producción de concentrados. Las unidades reportadas corresponden a emisiones unitarias kg de CO₂ equivalente (ello significa CO₂ y los gases emitidos que tienen efectos en el calentamiento global) por unidad de producción de cobre (toneladas de concentrados o toneladas de cátodos). Las emisiones de GEI en el transporte se reportan como kg de CO₂ equivalente/t Cobre/km recorrido, o bien en kg de CO₂ equivalente/Mega Joule.

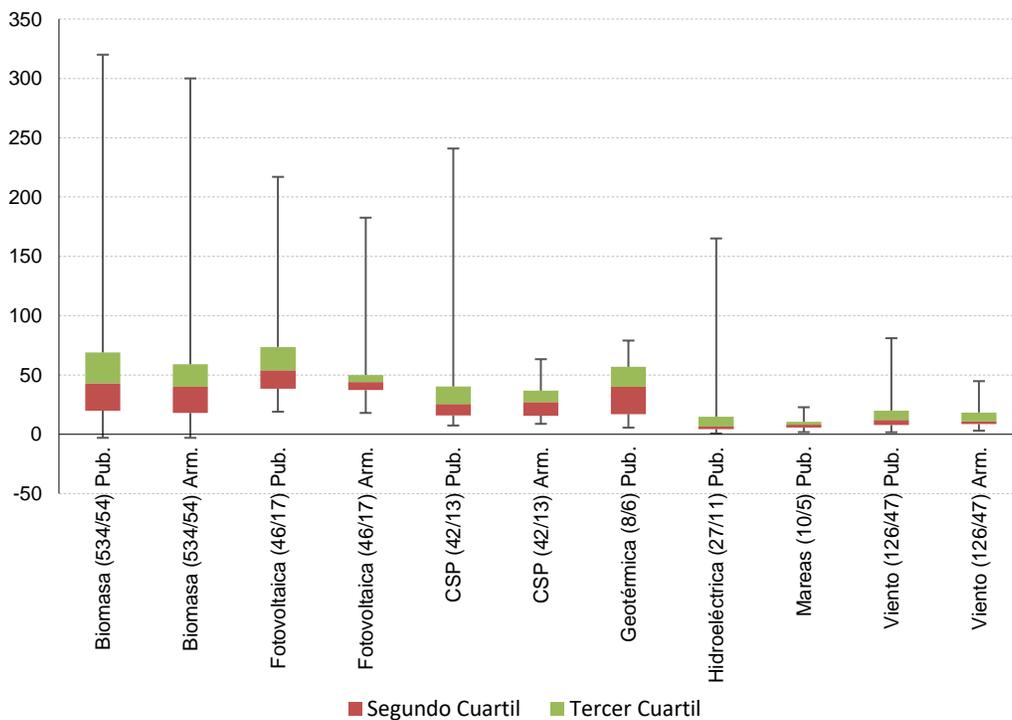
El análisis se realizó utilizando el software GaBi 8.0 y sus bases de datos. Se consideraron las emisiones de azufre asociadas a los porcentajes de captura y fijación de cada fundición.

Para la modelación de la energía eléctrica del caso base se consideró la matriz eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional del año 2018. Para la generación eléctrica en base a electricidad vía concentración de energía solar, o CSP en sus siglas en inglés, con sistema de almacenamiento térmico, que le permita generar energía en forma continua las 24 horas, se usó como referencia la planta

modelada por Gasa et al. (2020). Dicha planta considera una configuración de torre de 240 m, un área de espejos equivalente a 1,469 km², recibe una irradiación directa normal de 3.332 kWh/m²/año, posee almacenamiento térmico en base a sales fundidas de alto calor específico, y es capaz de brindar una potencia de 110MW con una huella de carbono de ciclo de vida de 9,8 kg CO₂e/MWh. Se seleccionó dicha planta por tener prácticamente las mismas características técnicas de la planta CSP de Cerro Dominador, ubicada en la comuna de Sierra Gorda, y por estar entre las plantas de menores emisiones (percentil 25, según Burkhardt et al. (2012)).

En el gráfico 10 se presentan rangos de emisiones de GEI de ciclo de vida para diversas tecnologías renovables de generación de electricidad, derivados de una extensa revisión de artículos publicados entre los años 1990 y 2011, algunos de las cuales fueron sujetas a un proceso de armonización para efectos de poder comparar mediciones bajo condiciones similares.

Gráfico 10
Rangos de emisiones de ciclo de vida de gases de efecto invernadero reportadas para la generación de 1 MWh, de electricidad a partir de diversas tecnologías renovables
(kg CO₂/MWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NREL (2021).

Nota: Los datos presentados corresponden al mínimo, mediana, máximo y cuartiles, de emisiones reportadas en artículos publicados entre 1990 y 2011. Entre paréntesis se indica el número de mediciones y el número de publicaciones revisadas. Pub indica que son resultados directos y Arm. indica resultados armonizados.

Para la elaboración de hidrógeno se consideró una planta contigua a la operación con tecnología de electrólisis de agua por medio de celdas con membranas de intercambio de protones (PEM en sus siglas en inglés), a partir de electricidad solar CSP, con el objeto de cubrir las 24 horas del día, para una producción sustentable de “hidrógeno verde”, y agua desionizada, en base a los consumos reportados por Mehmeti et al. (2018). Se supuso que el agua desionizada se producía en base a agua desalinizada ya disponible en la planta, cuyos costos de extracción, desalinización y transporte no están considerados en la modelación.

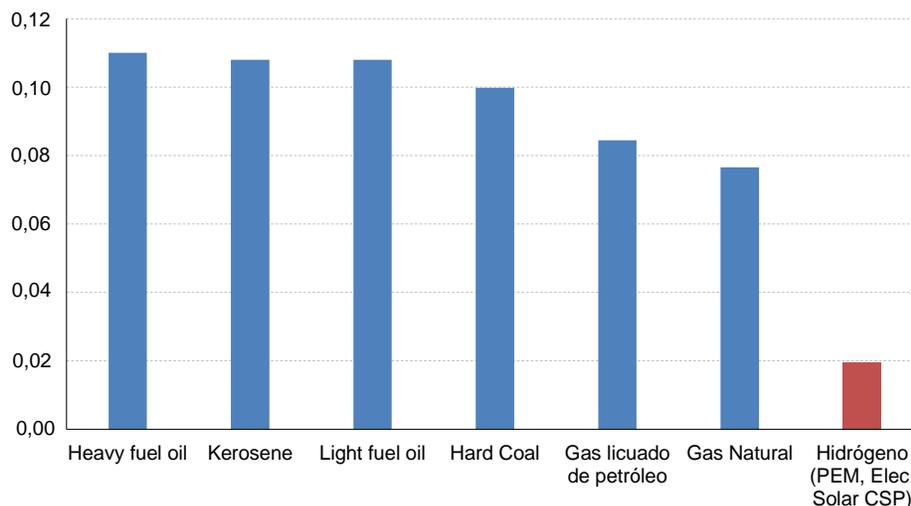
Nuestra modelación para la fabricación de hidrógeno verde dio un valor de 0,46²² (kg CO₂ equivalente/kg de hidrógeno), mientras el cálculo de Mehmeti et al. (2018) indica un valor de 2,21 (kg CO₂ equivalente/kg de hidrógeno). Atribuimos la diferencia entre el cálculo nuestro y el de Mehmeti al aporte de los insumos del electrolizador (cátodo, ánodo, membranas, platino, catalizadores, etc.). El cálculo equivalente realizado por nosotros para producción de hidrógeno mediante generación eléctrica solar CSP dio un valor de 2,33 (kg CO₂ equivalente/kg de hidrógeno), valor que se utiliza en este estudio. Mehmeti (2018) publica otras tecnologías que ocupan más emisiones GEI para la producción de hidrógeno.

La combustión de hidrógeno sólo con oxígeno no genera emisiones, pero al realizarla en presencia de aire existen emisiones de NO_x. Cuando se reduce la temperatura de combustión, sin embargo, también se reducen significativamente las emisiones de NO_x. De acuerdo al fabricante de quemadores y calderas SAACKE (2020), las emisiones de la combustión de hidrógeno en aire pueden reducirse significativamente, mediante un sistema de manejo de gases, considerado en este trabajo. Del total de emisiones de la combustión de hidrógeno verde para generar un mega Joule de energía térmica (0,0195 kg CO₂/Mega Joule, estimado en base electricidad solar CSP), solo el 0,5% corresponde a gases NO_x.

Por ello, esto es prácticamente igual en emisiones de CO₂ equivalente al caso de combustionar el hidrógeno con oxígeno, según estimación propia. Si bien la combustión de hidrógeno y oxígeno no genera emisiones GEI, la producción de oxígeno si lo hace, pero en mínima cantidad. Teóricamente se puede recuperar el oxígeno generado en electrólisis del agua, cuestión que no fue considerada en este estudio.

En el gráfico 11 se presentan los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero para la generación de 1 MJ de energía térmica en base a la combustión de diversos combustibles disponibles en Estados Unidos, además de nuestra estimación de combustión de hidrógeno. Se supone en todos los casos 24 horas de operación por día.

Gráfico 11
Emisiones de gases de efecto invernadero para la generación de 1 MJ de energía térmica, para diversos combustibles de acuerdo con la realidad de Estados Unidos, y nuestra estimación a partir de la fabricación de hidrógeno verde (kg CO₂ eq./MJ)



Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi.

Nota: Las emisiones incluyen las asociadas a la fabricación de cada combustible. Membranas de intercambio de protones (PEM).

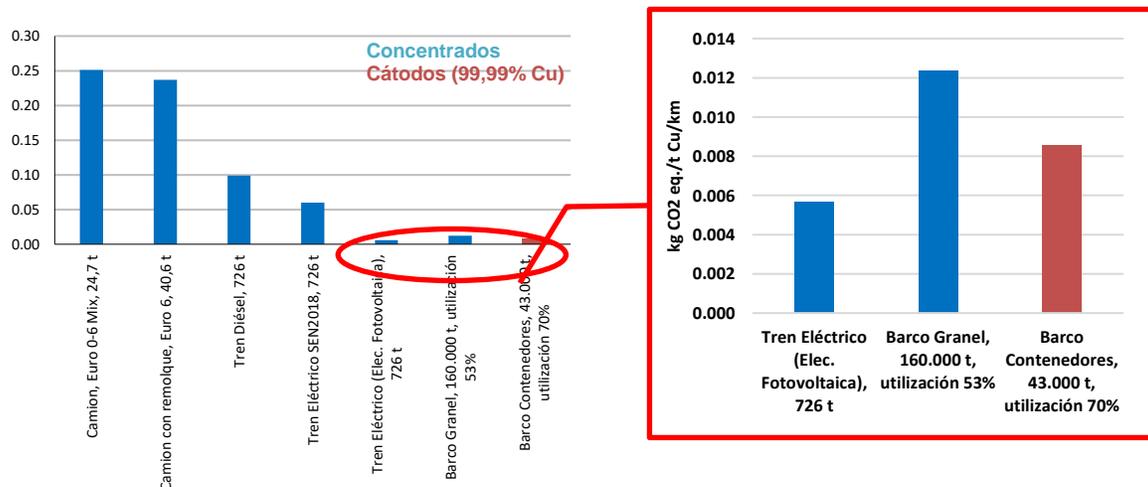
²² Considera los insumos incluidos en Mehmeti et al. (2018) para fabricar un 1 kg de hidrógeno por medio de un electrolizador con tecnología PEM: 54,6 kWh de electricidad eólica, y 18,04 kg de agua desionizada.

La modelación del proceso de fundición considera todas sus operaciones unitarias básicas: secado de concentrados, fusión, conversión, refinación a fuego y moldeo de ánodos, además de instalaciones auxiliares, como hornos de limpieza de escorias, planta de tratamiento de gases (planta de ácido) y planta de oxígeno, entre otras. A pesar de que la mayor parte de las fundiciones comparten muchos procesos, se diferencian principalmente en la tecnología usada en el proceso de fusión, lo que involucra algunas diferencias entre los insumos utilizados. La refinería, por su parte, considera también todos sus componentes, tales como celdas de electro refinación, caldera para mantener la temperatura de la solución, etc.

En términos de uso de insumos, en el proceso de fundición se pueden mencionar dentro de los más relevantes el concentrado de cobre (cuya huella no es considerada en nuestra estimación), sílice (fundente), combustibles (carbón coque, diésel, kerosene, gas natural), oxígeno, electricidad, y agua. También se pueden mencionar la cal, materiales refractarios, desmoldante de ánodos, ácido sulfúrico, carbonato de sodio, sulfato ferroso, entre otros. Los combustibles son utilizados mayormente en las operaciones de secado, para iniciar la operación y de ser necesario para mantener el equilibrio térmico en los hornos de fusión y conversión, ya que las reacciones en dichos hornos liberan calor, y como agentes reductores en los hornos de refinación. En la electro refinación, los insumos relevantes son la electricidad, combustibles (gas natural y diésel para calentar las soluciones), oxígeno, agua, ácido sulfúrico, y en menor importancia ácido clorhídrico, hidróxido sodio y otros aditivos.

Para efectos de modelar el transporte de cobre, contenido en concentrados y en cátodos, se consideraron diversas opciones vía terrestre (camiones, trenes) y vía marítima, en base a combustibles de Estados Unidos y la fuente eléctrica indicada. Se supuso un concentrado con una ley de 27%, lo que en términos de cobre contenido implica que el transporte de concentrados contiene casi cuatro veces más emisiones que en el caso de un cátodo, para cada tipo de transporte. En el gráfico 12 se presentan los resultados de emisiones GEI por tonelada de cobre contenido en productos y por kilómetro, para diversos medios de transporte, en base a los resultados del software GaBi. Dichos valores fueron comparados con los publicados para el año 2019 por el Reino Unido (UK, 2020), encontrándose en rangos similares.

Gráfico 12
Emisiones de gases de efecto invernadero por 1 km de transporte de una tonelada de cobre en cátodos o
contenida en concentrados
(kg CO₂ eq./t Cu/km)



Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi.

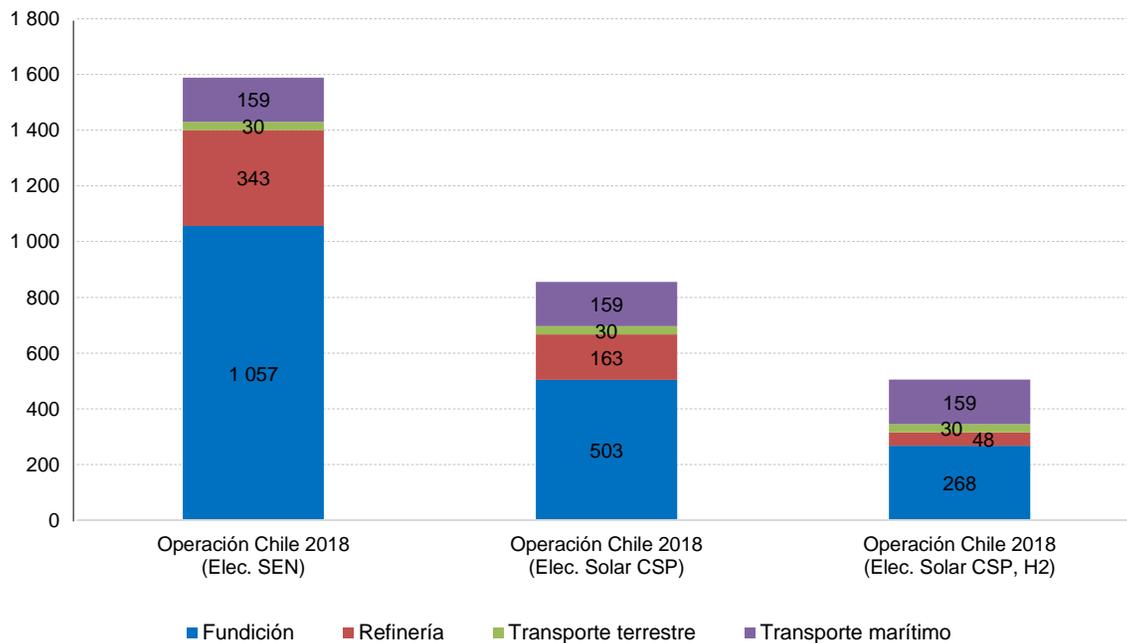
Nota: Se indica la carga útil máxima de cada medio de transporte considerado.

3. Emisiones GEI de alternativas de matriz eléctrica y uso de hidrógeno verde

El gráfico 13 presenta los resultados de emisión de GEI de una operación de fundición y refinación para la producción de una tonelada de cobre en cátodos, el transporte terrestre de concentrados a la planta, ubicada en Mejillones, Región de Antofagasta, Chile, el transporte terrestre de cátodos al puerto, y su transporte marítimo desde Mejillones a Shanghái, China (no considera las emisiones de extracción en la mina y concentración requeridas para la producción de concentrados, ni el transporte de insumos desde sus productores a la planta). En dicho diagrama se presentan los resultados de una operación chilena ficticia que está compuesta por la fundición alimentada con concentrados limpios (sin impurezas), y por una refinación, en base a los datos disponibles de operaciones chilenas para el año 2018, bajo tres casos: un caso base (1), que considera el consumo de insumos 2018; un segundo caso que considera que la electricidad utilizada es generada de fuentes renovables para 24 horas por día (electricidad vía concentración de energía solar, o CSP en sus siglas en inglés, con sistema de almacenamiento térmico que le permite generar energía en forma continua las 24 horas) (2); y un tercer caso, donde además de utilizar energía eléctrica renovable, se reemplazan los consumos relevantes de combustibles por combustión en base a hidrógeno (3).

Gráfico 13

Emisiones de gases de efecto invernadero de fundición y refinación para la producción de una tonelada de cobre en cátodos antes de créditos, para una operación chilena, bajo tres casos
(kg CO₂ eq./t Cu)



Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones del software GaBi.

Nota: No incluye las emisiones de la producción de concentrados ni del transporte de insumos. Considera el transporte terrestre de concentrados desde la mina a la F-R ubicada en Mejillones, Chile, y de cátodos al puerto, y transporte marítimo desde Mejillones a Shanghái, China. No se han asignado emisiones a subproductos (oro, plata, ácido sulfúrico, etc).

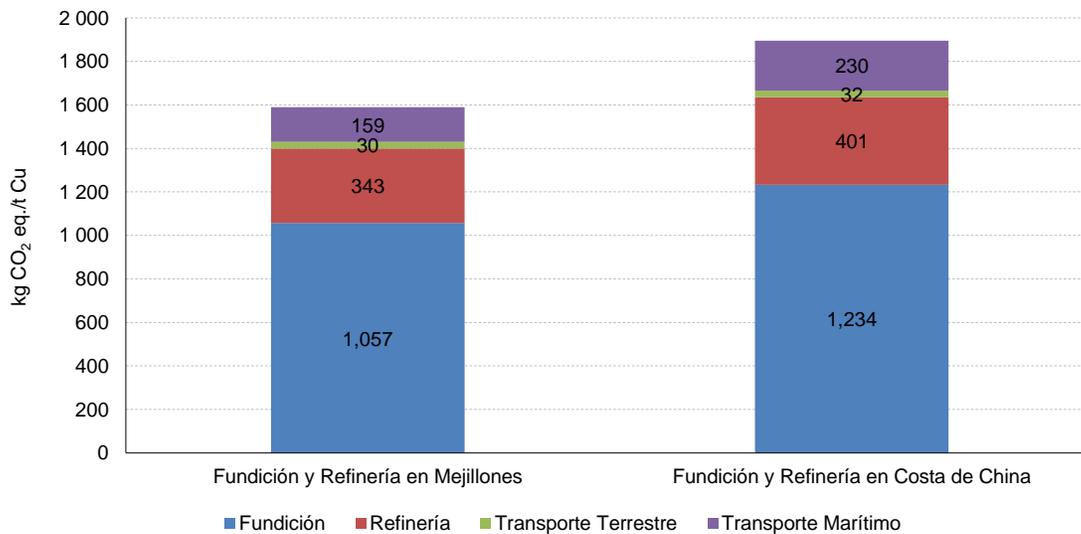
El cambio de la fuente de electricidad, desde la matriz del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) del año 2018, en el caso base, a una fuente de electricidad renovable en el caso 2, implicó una reducción de las emisiones GEI de la operación agregada Fundición y Refinería de un 52%. Si a ello se le agrega el reemplazo de combustibles tradicionales por hidrógeno (caso 3), la disminución acumulada de GEI llegó hasta un 77%, respecto a las emisiones del caso base. Los combustibles reemplazados por hidrógeno,

tanto en las fundiciones como en las refinerías, fueron gas natural, diésel y kerosene. Las diferentes proporciones en las reducciones asociadas al cambio de combustible por hidrógeno entre la fundición y en la refinería se deben a las diferentes composiciones originales de los combustibles utilizados en ambas operaciones, tanto en tipo como en cantidad.

4. Emisiones GEI de fundición refinería en Chile y en China

El gráfico 14 muestra las emisiones de GEI por tonelada de cátodo producido de una fundición refinería de cobre ubicada en Mejillones, Chile, y una segunda fundición, de igual tecnología y capacidad, ubicada cerca de Shanghái, China. El resultado es para la producción de cobre antes de contabilizar los créditos por ácido y otros productos. Esta estimación se realizó para una fundición refinería chilena con mínima emisión de GEI.

Gráfico 14
GEI de una fundición refinería ubicada en Mejillones y otra, idéntica en tecnología y capacidad de tratamiento, ubicada en las proximidades de Shanghái en China
(kg CO₂ eq./t Cu)



Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi.

Nota: No incluye las emisiones de la producción de concentrados ni del transporte de insumos.

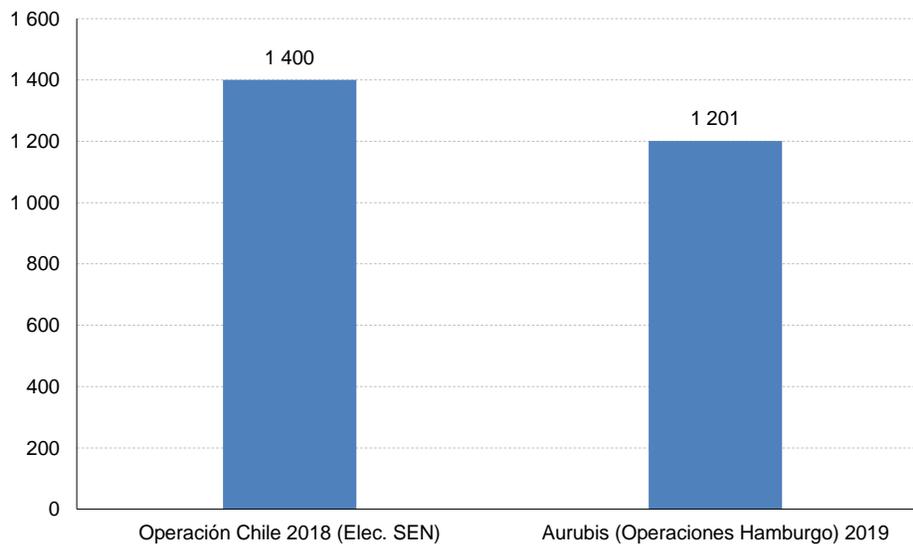
Se aprecia que los GEI emitidos por la instalación ubicada en China es 19,2% mayor que la de la instalación ubicada en Mejillones. Ello por dos motivos. El primero y más importante es que la matriz eléctrica china tiene mayor base en combustibles fósiles, por lo que la instalación ubicada en China emite 16,7% más que la instalación en Mejillones. El segundo motivo es que el transporte marítimo de concentrados es 44,5% superior en emisiones de GEI que el transporte marítimo de cátodos en términos de cobre contenido²³. Ello supone que este último se realiza en barcos con contenedores, mientras que el primero se realiza en barcos a granel.

²³ Este aumento refleja un doble efecto: en primer lugar, el tipo de barco y porcentaje de ocupación utilizados en la modelación (Figura 6.3), donde el barco a granel utilizado para transportar concentrados, con una ocupación de 53%, emite un 0,39% de las emisiones por kg de carga genérica/km de un barco a contenedores utilizado para transportar cátodos, con una ocupación de 70%; y segundo, la mayor masa que se requiere transportar en concentrados que en cátodos para trasladar 1 tonelada de cobre, equivalente a 3,7 veces para un concentrado de ley 27%. Las ocupaciones citadas son las predeterminadas en el software GaBi para dichos tipos de barcos.

5. Benchmark de emisiones GEI de fundiciones refinerías de cobre

Esta sección compara las emisiones GEI de una fundición y refinería chilena, con las GEI de la fundición refinería de Aurubis en Hamburgo. Los valores de Aurubis se obtuvieron de un informe de esta última compañía en que se reportan los valores GEI de alcance 1 y 2 (Aurubis, 2020b). El alcance 3 de esta fundición refinería fue obtenido a partir de los pocos insumos que el informe reporta, lo que puede generar una subestimación de dicho alcance. Enseguida se le restó el valor de la planta de alambroón que estaba incluida en los GEI de 229 kg CO₂/t cobre, utilizando un valor de Vega et al. (2013) y del cátodo promedio ICA (2017). También se le restó el valor de emisión de GEI (75 kg CO₂/t cobre) del procesamiento de la planta de metales nobles de Aurubis, estimado a partir de la modelación con el software GaBi de los datos del informe de Declaración de Impacto Ambiental de la Planta Recuperadora de Metales, ubicada en Mejillones, Región de Antofagasta (PRM, 2013). El gráfico 15 muestra los resultados de este cálculo. No se incluyó estimaciones de otras operaciones ya que los reportes de sustentabilidad de fundiciones en todo el mundo son extremadamente incompletos y lleva a estimar valores que están fuera de los límites de un benchmark razonable.

Gráfico 15
GEI procesos fundición y refinería para la producción de una tonelada de cobre en cátodos, para dos operaciones
(kg CO₂ eq./t Cu)



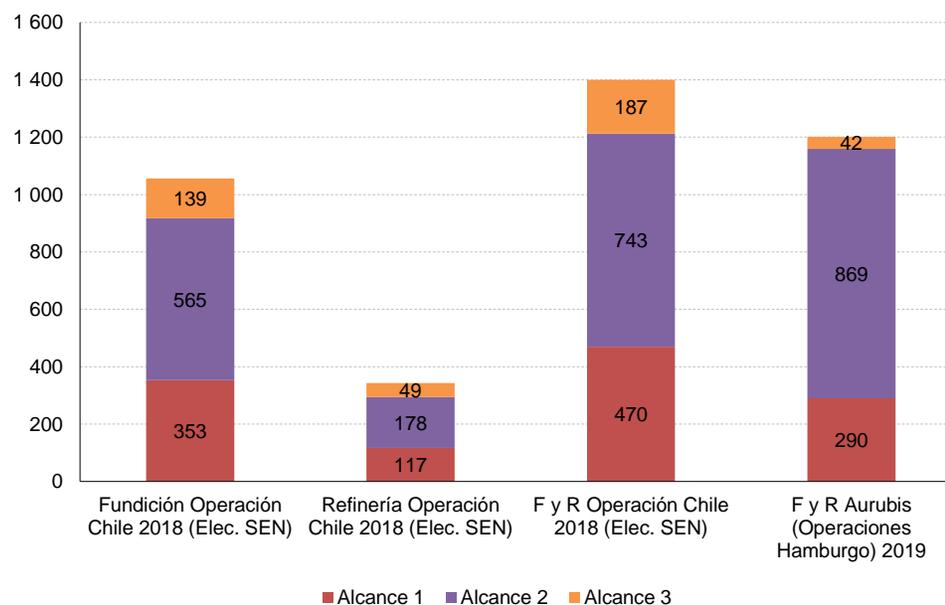
Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi e información de Aurubis (2020b).

Nota: No incluye las emisiones de la producción de concentrados ni del transporte de insumos. No se han asignado emisiones a subproductos (oro, plata, ácido sulfúrico, etc.).

6. Alcances de las emisiones de fundiciones y refinerías de cobre

El gráfico 16 muestra las emisiones de GEI de la fundición y refinería de la operación chilena, y de las fundiciones refinería chilena y de Aurubis. Se observa que los mayores valores del alcance 3 de insumos aguas arriba de estas dos fundiciones refinería son inferiores a los GEI del alcance 1 y 2. Hay que notar que en este análisis se utilizaron los insumos reportados en el cuadro 9.

Gráfico 16
GEI procesos fundición y refinería para la producción de una tonelada de cobre en cátodos,
por alcance, para dos operaciones
(kg CO₂ eq./t Cu)



Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi e información de Aurubis (2020b).

Nota: No incluye las emisiones de la producción de concentrados ni del transporte de insumos. No se han asignado emisiones a subproductos (oro, plata, ácido sulfúrico, etc.).

Cuadro 9
Insumos alcance tres de GEI para dos operaciones de fundición refinería

| Fundición y Refinería Alcance 3 GEI (kg CO ₂ eq./t Cu cátodo) | Operación Chile 2018 (Elec. SEN) | Aurubis (Operaciones Hamburgo) 2019 |
|---|-------------------------------------|---|
| Carbón | 4,3 | 3,2 |
| Diésel | 46,4 | 1,0 |
| Gas Natural | 81,4 | 29,1 |
| Sílice | 12,7 | 8,4 |
| Ácido sulfúrico | 2,9 | |
| Cal | 35,0 | |
| Soda Cáustica | 0,0 | |
| Desmoldante de ánodos | 2,2 | |
| Ladrillos refractarios | 0,1 | |
| Reactivos | 1,8 | |
| Nitrógeno | 0,1 | |
| Oxígeno | 0,2 | |
| Cola | 0,0 | |
| Total | 187 | 42 |

Fuente: Elaboración propia en base a modelaciones en software GaBi e información de Aurubis (2020b).

Nota: No incluye las emisiones de la producción de concentrados ni del transporte de insumos. No se han asignado emisiones a subproductos (oro, plata, ácido sulfúrico, etc.).

7. Discusión de la huella de carbono

El objetivo de realizar este análisis fue estimar las mínimas emisiones de GEI logrables en una fundición refinería chilena de acuerdo con la tecnología actual y considerando los procesos estudiados. Dicho mínimo establece la meta para adquisición de bonos de carbono, con objeto de lograr la carbono-neutralidad de la fundición refinería, meta que es considerada esencial para lograr un buen posicionamiento del cobre que se producirá en el futuro en los países andinos.

Una primera conclusión de estos resultados es que el alcance tres de las emisiones GEI de una fundición refinería (F-R), que incluye solo la fabricación de los insumos, sin considerar el concentrado, es menor a los alcances 1 y 2. Se observa en el gráfico 11 que la alternativa del hidrógeno para combustible para generar energía térmica es la mejor en términos de reducir el potencial de calentamiento global, el que es equivalente a la emisión de GEI.

Una segunda conclusión es que la alternativa solar CSP (gráfico 13) para suministro de la energía eléctrica, permite reducir las emisiones GEI de una F-R en 52% respecto al uso de la matriz chilena 2018. Agregando a lo anterior hidrógeno verde (de la más baja emisión GEI lograble con actual tecnología), las emisiones GEI pueden ser reducidas en 77% con respecto a la situación original. Las emisiones restantes debieran ser compensadas con bonos de carbono si el objetivo es lograr carbono-neutralidad.

Una tercera conclusión es que una F-R ubicada en Mejillones, tiene un ahorro de emisiones GEI muy importante (19,2%) con respecto a una F-R de igual tecnología ubicada en Shanghái (gráfico 14), debido al efecto transporte y al efecto de la mayor cantidad de combustibles fósiles de la matriz eléctrica china con respecto a la chilena.

Una cuarta conclusión es que el benchmark de F-R es bastante pobre a nivel global ya que los reportes de sustentabilidad y otros documentos de F-R en el mundo dan cuenta muy parcial sobre la emisión de GEI. De todas formas, es posible apreciar que los dos ejemplos de F-R analizados (Chile y Aurubis en Hamburgo) llegan a emitir valores de GEI que son comparables. Se encontró eso sí, otras fundiciones que emiten mucho más de 10% adicional de GEI que las indicadas en este estudio, lo que se debe a la matriz eléctrica de los países en cuestión y al manejo mismo de las fundiciones. Por ello, se piensa que los valores citados en el gráfico 15 representan operaciones de alta eficiencia desde la perspectiva de la huella de carbono.

Una quinta conclusión es que considerando solo los insumos de las F-R, sin incluir la huella de la producción de concentrados, el alcance dos es aún el más importante. Ello cambiará en la medida que las matrices de energía de los países vayan reduciendo la emisión de CO₂ y gases equivalentes.

De adoptarse una estrategia de exportar fundamentalmente concentrados en el futuro, el análisis realizado cuantifica algunas de las debilidades principales que ello tendría para que el cobre producido en los países andinos cumpla con los acuerdos de París.

VI. Modelo de negocios para fundiciones y refinerías

A. Introducción

Contar con una nueva capacidad de fundición y refinación (F-R) requiere crear un conjunto de condiciones para lograr atraer inversión para este negocio. Estas condiciones son abordadas en esta sección y consisten en:

- Primero crear un acuerdo entre productores de concentrados y un operador experto internacional de los procesos de fundición y refinación.
- Segundo, los negocios complementarios a la F-R deben estar alineados y contenidos en acuerdos logrados conjuntamente con la instalación de la F-R. Estos negocios son, la recuperación de metales y otros elementos contenidos en los barros anódicos, la recuperación de energía, y el uso de la economía circular para aprovechar al máximo los residuos generados por la F-R.
- Tercero, el tratamiento y disposición segura de concentrados con alto contenido de arsénico, debiera estar contenido en un acuerdo para crear un nueva F-R, la que trataría concentrados con alto contenido de arsénico. Ello involucra recurrir, posiblemente a la tostación, y la consecuente creación de calcinas. Esta debiera gestionarse de tal forma que fuesen productos registrados en las normativas de la Unión Europea y otros lugares geográficos relevantes.
- Cuarto, el negocio de una nueva F-R debiera tener una estrategia de largo plazo del mercado del ácido sulfúrico, debido a la potencial declinación del uso de este producto por la menor producción de minerales mediante la lixiviación.
- Quinto, una nueva F-R debiera explorar la creación de contratos de suministro de concentrados que acoten la volatilidad de los TCRC.

- Sexto, la estrategia de una nueva F-R debiera incluir el compromiso de utilizar energías renovables, hidrógeno verde y otras tecnologías que hagan posible lograr carbono-neutralidad en un plazo corto a medio.
- Séptimo, el Estado debe no solo expresar su interés por establecer una nueva F-R de estas características, sino participar en la creación de condiciones que faciliten la instalación y operación de este complejo industrial.

Chile posee las condiciones óptimas en América Latina para llevar adelante la instalación de una nueva fundición refinera.

B. Condiciones para desarrollar el negocio

Para ello hay que analizar de manera concreta las condiciones contractuales y las variables necesarias para estructurar un acuerdo entre los productores locales de concentrados de cobre y un operador experto internacional de los procesos de fundición y refinación. Todo bajo una estructura que asegure un suministro de material y una operación bajo altos estándares tecnológicos y socioambientales.

Un contrato comercial con los incentivos alineados para el suministro y la operación de un complejo de estas características es factible de estructurar tomando experiencias pasadas, modelos de gobernanza participativos, parámetros de negocios vinculados a los desafíos del mercado del cobre en un país que ostenta el liderazgo en la producción mundial de cobre.

Cabe preguntarnos entonces: ¿es Chile capaz de atraer la tecnología más competitiva del mundo en términos de fundición y refinación de cobre para que se instale en el país bajo un esquema que permita a esta operación recibir el suministro de concentrados garantizados en el largo plazo a términos comerciales atractivos para ambas partes?

Todo indicaría que sí. De hecho, la oferta comercial de cobre proveniente de Chile, suministrada por producción estatal y privada, tiene la reputación de ser la más confiable en el mercado. Acercar geográficamente esas puntas (producción-consumo) no debiera desarticular esta hipótesis. Por lo tanto, las respuestas debieran converger en términos de qué condiciones habilitarían los incentivos para que operadores expertos internacionales en estos procesos quieran instalarse en Chile, y, por otro lado, que los productores locales de concentrados de cobre quieran suministrar estos productos a esta nueva capacidad que potencialmente se instalaría en Chile.

Chile sigue siendo un importante polo de atracción minera mundial, y lo seguirá siendo por muchos años más. Por lo que bajo la hipótesis de integrar verticalmente en Chile la producción de cobre metálico refinado debiera ser, para cualquier operador experto en procesos de fundición y refinación, un atractivo negocio a evaluar y participar. Esto implica que, si existieran los incentivos políticos, sociales y comerciales adecuados, las condiciones para invertir en el procesamiento de concentrados de cobre en Chile de la manera más eficiente del mundo se podrían concretar.

La mineralogía de los concentrados de cobre chileno es muy interesante y atractiva para el negocio de fundición y refinación, y que incluye otros elementos de valor que van más allá de los tradicionales elementos de cobre, molibdeno, oro y plata. Es así como en los modelos de negocios de fundiciones competitivas se incluye la recuperación de elementos como paladio, telurio, selenio, vanadio, tierras raras, entre otros minerales con valor. Sobre la base de que el negocio minero del cobre es distinto al negocio de fundir concentrados y refinar ánodos, se abren miradas de negocios complementarias para cada una de estas especializaciones en la cadena de valor del cobre. Los denominados "custom smelters" (fundiciones independientes) han estructurado otro modelo, distinto al minero, pero muy valioso en lo económico y tecnológico, con el aprovechamiento de recuperación de cobre y de otros elementos mineros de valor.

Es importante, entonces, conocer los conceptos de este potencial contrato entre una inversión de miles de millones de dólares y el suministro de millones de toneladas de concentrados de cobre, como aporte al documento “Cobre refinado. Un buen negocio para Chile” (Cesco, 2020).

C. El caso de la Planta Recuperadora de Metales (PRM) en Mejillones, Chile

Un buen punto de partida es analizar un caso semejante al que se pretende proponer estructurar. Este fue el ocurrido en la década pasada en Chile, en donde se articuló un modelo que permitió atraer inversión y tecnología para permitir la integración de un segmento de la cadena de valor donde no se cumplía con la eficiencia ni sustentabilidad exigida a nivel internacional. Era el caso de los metales nobles.

Los objetivos principales que perseguía Codelco para el negocio de los metales preciosos apuntaban por una parte a darle sustentabilidad al negocio de estos subproductos, y por la otra, encontrar un socio con una visión compartida del negocio de los metales preciosos²⁴, considerando que el negocio principal de Codelco está centrado en la minería del cobre.

Fue en el año 2009, cuando el Presidente Ejecutivo de Codelco de aquella época mandata a la Corporación a que se evalúe una alternativa para el manejo, tratamiento y comercialización de los metales preciosos contenidos en los barros anódicos, buscando la incorporación de un socio estratégico. La motivación del mandato apuntaba a asegurar la comercialización en el largo plazo de oro y plata producidos por Codelco tomando en cuenta el endurecimiento de las normativas ambientales y sus efectos en la comercialización de los barros anódicos²⁵. Se sumaba a lo anterior, la reducción de las capacidades de procesamiento de barros anódicos a nivel global, la incertidumbre acerca de la continuidad productiva de la planta de metales nobles de Ventanas por temas ambientales (cerrada de manera definitiva en 2013) y la búsqueda de la optimización del valor económico para Codelco generado por la venta de metales preciosos en la forma de productos refinados.

Codelco buscó un socio operador experto, con larga trayectoria en el negocio de recuperación de metales, y experiencia comprobada en la producción de oro y plata, de modo de buscar incorporar al Joint Venture (JV) los mejores indicadores productivos y ambientales del mercado, que tuviera expectativas de rentabilidad de una compañía maquiladora/procesadora acorde con el mandato de operador que se le asignaría y estuviera dispuesto a comprometer recursos de manera creciente mientras se avanzaba en el proceso de reducción de incertidumbre durante las etapas estructuradas para adjudicar la operación de la planta. La apuesta de construir una planta recuperadora de metales preciosos en Chile, específicamente en Mejillones, de manera de permitir obtener productos líquidos comercialmente y sin restricciones a su transporte e ingreso a los mercados, se realizó bajo estándares de operación e impacto ambiental extremadamente exigentes.

La búsqueda del socio de PRM se condujo en un proceso de 3 etapas, cada una con hitos de decisión. Bajo este proceso, la primera etapa consistió en la recepción de propuestas, la generación de una lista corta y la firma de un memorándum de entendimiento con la compañía seleccionada. Esta fase analizó los principales riesgos de establecer una compañía extranjera en Chile, que en este caso fue la coreana LSNikko. Codelco puso a disposición recursos propios y externos para que la compañía

²⁴ Las ventas anuales de oro y plata de Codelco, compuestas aproximadamente por 5 toneladas de oro y 500 toneladas de plata, han promediado cerca de 400 millones de dólares por año a lo largo del tiempo. La comercialización estuvo compuesta de metal dore en Codelco Norte hasta el año 1996, como lingotes de oro y plata generados en División Ventanas hasta 2011 y en formato de barros anódicos (generados en la refinación de los cátodos de cobre) hasta el año 2016, fecha en donde se puso en marcha la operación de PRM, planta que ha sido operada por LS Nikko desde ese momento hasta la fecha.

²⁵ Los barros anódicos eran el producto de Codelco con peor clasificación de peligro según el Sistema Armonizado de Clasificación de desechos de la ONU.

seleccionada conociera la realidad en la que se estaba instalando: legislación laboral, medioambiental, proveedores, comunidades, entre otras. Por otro lado, se realizó un trabajo con las autoridades y comunidades de Mejillones para su mejor posicionamiento e inserción en el medio local, traducido en compromisos en la RCA.

La segunda etapa consistió en estudios de pre-factibilidad y factibilidad en donde se entregaron una oferta preliminar y una oferta final. Al término de la segunda etapa, se generó una oferta vinculante acotada a un riesgo propio del negocio. Las variables que generaban el riesgo eran la tarifa y otros cargos, además de fórmulas económicas.

La tercera etapa consistió en la fase de desarrollo de ingeniería de detalles, construcción y operación. Al final de la pre-factibilidad se generó una oferta preliminar de contrato. Codelco tuvo el derecho de rechazarla y terminar el proceso, sin limitar su involucramiento futuro en proyectos de la misma naturaleza. Finalmente, se concretó un contrato de maquila de barros anódicos por un período de 20 años.

Durante el proceso de búsqueda de socio se realizaron presentaciones periódicas al Presidente Ejecutivo y Directorio, manteniéndolos informados de cada uno de los pasos y obteniendo aprobaciones secuenciales relacionadas con el proceso. La selección y recomendación al Presidente Ejecutivo y Directorio fue realizada por un comité Corporativo compuesto por ejecutivos comerciales, operacionales y técnicos.

Las principales conclusiones del caso del negocio de PRM es que cumplió con los objetivos requeridos de incorporar un socio estratégico experto en la recuperación de metales preciosos, generando valor para Codelco, de acuerdo con la definición inicial que consistía en que Codelco aportaba mínimos recursos monetarios, pero adquiriría un razonable nivel de control societario. Desde el momento en que el Presidente Ejecutivo de Codelco otorgó el mandato para estudios, y la fecha de puesta en marcha de la planta PRM (2016), transcurrieron cerca de 7 años.

El caso del Joint Venture entre Codelco y LSNikko para desarrollar la Planta Recuperadora de Metales (PRM) en Mejillones es un modelo que ciertamente permite evaluar desde una perspectiva de mercado la posibilidad que tiene el país de atraer inversión, tecnología de punta y un operador experto para el desarrollo futuro de una fundición y refinería de cobre.

D. Habilitadores y restricciones del negocio

Las similitudes que motivaron y que permitieron la implementación del modelo de PRM en Chile con las que justificarían un complejo de fundición y refinación en el país, son muy semejantes.

Tal cual como en PRM, en donde Codelco no quiso llevarse el peso completo de invertir en una planta de metales nobles, hoy resulta evidente que, para todos los operadores mineros en Chile, las motivaciones de invertir en una fundición y refinería no figuran entre sus prioridades, ya que un dólar invertido en minería rinde más que un dólar invertido en fundición.

Desde la perspectiva del Estado, sin embargo, habría que analizar los precios sombra, los que incorporan ingresos y costos externos a la minería, así como ingresos y costos externos a una F-R. Es decir, ello incorpora costos y beneficios sociales que las compañías no tienen por qué considerar. La existencia de beneficios sociales cuantiosos, como los existentes al instalar una nueva F-R es una demostración de por qué es el Estado y no las compañías, sean estas privadas o estatales, el que debe adoptar la política de impulsar una iniciativa como esta.

Un suministro bien respaldado por un contrato de concentrados de cobre mitigaría, sin embargo, la necesidad de incorporar productores en la propiedad de una entidad legal dueña de una futura fundición.

Aparece otra dimensión que ha sido analizada tangencialmente por los operadores mineros. Tal como hace años el endurecimiento de las normativas ambientales y sus efectos en la comercialización de los barros anódicos fue un factor clave para el desarrollo de PRM, hoy los concentrados de cobre enfrentan presiones regulatorias importantes y crecientes. Algunos de los temas relacionados con acceso de mercados de los concentrados de cobre tienen que ver, por un lado, con la presunta corrosividad que causan en las naves a granel donde se transportan.

En esa línea, la clasificación de peligro de sustancias, en donde Chile adquirió hace varios años el compromiso ante las Naciones Unidas y la OECD de implementar el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (conocido como GHS), implicó que el año 2019 el proyecto de reglamento respectivo ingresara para su revisión por la Contraloría, y se espera que entre en vigencia en los próximos 3-4 años, situación que podría impactar la actual clasificación de algunos de los concentrados.

Además, las calcinas de cobre (concentrados tostados) no se encuentran registradas en el Sistema de Registro y Autorización de Sustancias Químicas (REACH, por sus siglas en inglés) de la Unión Europea. Esto implica que las calcinas no pueden exportarse ni acceder al mercado europeo. La extensión del proceso REACH a otras zonas geográficas consumidoras de concentrados de cobre del mundo es cosa de tiempo, siendo Corea, Japón y China los mercados con mayor avance en su adopción futura.

Tal como hace años atrás la Planta de Metales Nobles de Ventanas tuvo que cerrarse por temas ambientales, es muy probable que algunas de las fundiciones de cobre chilenas corran esa misma suerte si no mejoran sus niveles de captura de SO₂ a niveles internacionales por sobre el 99%. Las restricciones para emisiones de As debieran correr la misma suerte. El estándar de emisión en Europa para la clase I (As) aplica un nivel máximo de 0,05 mg/m³, mismo nivel aplicado como estándar de emisión en Canadá para el As. El estándar de medición en Japón en la escoria a menos de 0,01g/t. es incluso más restrictivo que Europa. Las actuales operaciones de fundición en Chile están lejos de estos niveles normativos internacionales y, para lograr llegar a estos umbrales, hay un consenso técnico que no va a ser posible realizarlo con la actual capacidad instalada de algunas de las fundiciones en el país.

E. Contrato de suministro como garantía del negocio

Generar incentivos del Estado para que las compañías mineras comprometan una alternativa para el manejo, tratamiento y comercialización de concentrados y cátodos de cobre, bajo una estructura contractual que apunte a concretar la inversión de envergadura de una fundición y refinería, además del suministro de largo plazo, es fundamental para cumplir con una visión país de integración en la cadena de valor del cobre.

Bajo esa lógica, resulta clave transparentar la visión que asumen las mineras al momento de invertir en proyectos mineros en términos de los descuentos aplicables al valor del cobre por conceptos de cargos de tratamiento y refinación de concentrados, penalidades por impurezas como el arsénico, pagables por otros elementos de valor como el oro y la plata y proyecciones de costos logísticos.

En definitiva, conocer las orientaciones comerciales de largo plazo a los cuales sus inversionistas otorgan las aprobaciones que permiten el desarrollo de un proyecto minero, y que permitirían la búsqueda por encontrar el punto de equilibrio (o bien un rango o zona de equilibrio) entre la oferta por suministrar concentrados y la demanda por procesar concentrados. Para realizar esta tarea, resulta clave conocer en detalle la estructura de un contrato comercial de concentrados de cobre, tal como fue descrito en la sección II.A.4.

F. Chile experto en tratamiento y disposición de arsénico

La oferta de arsénico contenido en los concentrados y la capacidad de procesamiento de las fundiciones condiciona el valor de mercado del As en términos de penalidades. En el caso de la oferta, varía dependiendo fundamentalmente de aspectos mineralógicos de nuestros yacimientos, pero hay casos extremos. La División Ministro Hales (DMH) de Codelco es uno de estos casos. Registra rangos de contenido de As que van desde 2%, hasta un 5% por tonelada métrica seca (TMS) de concentrados, estimándose que ha promediado niveles levemente por debajo del 3% en casi 6 años de operación. Para solucionar este problema, DMH fue diseñada con un tostador que permitiera disminuir la concentración de As en su producto comercial, denominado calcinas, que es un concentrado de cobre tostado con contenidos de As bajo el 0,3% en promedio.

Operar el tostador de DMH para tratar arsénico tiene un costo, independiente del contenido de arsénico, de 20 a 25 US\$/lb aproximadamente. Considerando su capacidad de diseño (550,000 toneladas por año con 5% As), la capacidad del tostador de reducir el nivel de As y producir calcinas equivalen a un procesamiento potencial de 27,500 toneladas de As al año, siendo la operación de mayor envergadura de este tipo en el mundo. Además, el tostador de DMH ha fijado un benchmark en el mercado para el tratamiento de altos contenidos y volúmenes de arsénico. Distintas modelaciones apuntan a que el valor del uso del tostador bajo 1,5% de As no sería rentable y que, para esos tipos de concentrados, convendría un tratamiento vía mezclas.

Las fundiciones de cobre tienen una acotada capacidad de recepción de As por restricciones tecnológicas y regulatorias. En esa línea, las penalidades de mercado del As en los concentrados de cobre varían. Un elemento clave, por su envergadura, es que el tostador de DMH mantenga su continuidad operacional. Y Chile tiene un riesgo sistémico asociado con el funcionamiento del tostador de DMH. Su detención por periodos prolongados implicaría una alta sobreoferta de As contenido en los concentrados de cobre, generando un importante desbalance de As a nivel mundial, castigando aún más, y de manera exponencial, las penalidades de este elemento en los contratos. Este evento se vio reflejado en la tardía puesta en marcha que tuvo el tostador de DMH el año 2016 y que obligó a Codelco a utilizar distintas contrapartes para realizar mezclas de concentrados de manera de llegar a contenidos que permitieran su comercialización.

Un antecedente, relacionado con el punto anterior, tiene que ver con la cantidad de otros concentrados "limpios" requeridos para realizar mezclas que permitan lograr % de As por debajo del límite máximo de 0,5% que permite acceder a China, principal mercado consumidor de concentrados con cerca de 8,6 millones de toneladas métricas finas (TMF/año) de tratamiento de cobre. Mezclar el As de un lote comercial de concentrados (10,000 TMS) con contenidos de As de 3%, requeriría de un manejo significativo en términos de concentrados y logística que hoy Chile no cuenta y que cualquier nueva fundición debe considerar en términos de infraestructura y optimización de su modelo de negocios. En esa misma línea, para diluir contenidos de As de 3% se requerirían a los menos de 6 lotes de concentrados 'limpios' con contenidos bajo 0,1%. La mezcla del As requiere una estructura de trading (compra-venta) significativa de concentrados de cobre, además de la infraestructura logística y de almacenamiento para desarrollar esta tarea.

Aunque en períodos de sobre oferta de As contenidos en concentrados de cobre, las penalidades aumentan exponencialmente en función del contenido de As, para un análisis contractual es relevante considerar los períodos de relativo equilibrio de As en el mercado, como ocurre en la actualidad. Las penalidades del As en los contratos de concentrados de cobre se pueden expresar de acuerdo con tablas de penalidades que se han ido alineando, utilizando una penalización prácticamente estándar por todos

los productores de cobre nacionales y que podrían considerarse e incorporarse como parámetros contractuales en un acuerdo futuro, considerando que Chile requiere mitigar su riesgo en términos de As²⁶.

Una fundición alimentada por concentrados "limpios" y "complejos", mezclados en la proporción adecuada según sus capacidades tecnológicas de tratamiento, forman hoy parte de los modelos de negocios de cualquier fundición moderna.

Chile tiene, posiblemente, más de la mitad de los concentrados mundiales con alto contenido de arsénico, y por ello ha desarrollado y adaptado tecnologías de frontera para tratar y disponer el arsénico en forma segura.

Considerando, entonces, los beneficios económicos para una fundición de tratar alto contenidos de arsénico de forma segura, como ya fue discutido en la sección III.A, es evidente que un nuevo complejo fundición refinería establecido en Chile considere el tratamiento de los excedentes de dichos concentrados como parte esencial del negocio. Ello constituye de hecho una ventaja de establecer una nueva fundición refinería en el país.

G. Ácido sulfúrico

La generación de ácido sulfúrico es un elemento clave a considerar en el negocio de fundición y Chile tiene una demanda por ácido asociada a la línea hidrometalúrgica de los procesos mineros, que, si bien como la demanda ha ido cayendo gradualmente en el tiempo en línea con la disponibilidad de óxidos, todo indica que el ácido seguirá siendo un suministro clave para la lixiviación futura de elementos de valor en Chile.

El análisis del mercado del ácido sulfúrico en Chile desarrollado en la sección II.C indica que, en un escenario conservador, el precio del ácido sulfúrico podría mantenerse en el rango de los 40 US\$/tonelada bastante más allá de 2030.

Este análisis parte de la base que se trata de una nueva fundición que estaría reemplazando en la práctica, la generación de ácido sulfúrico de tres fundiciones²⁷ que están actualmente en operación y que debiesen cerrar en esta década debido a exigencias ambientales.

H. Volatilidad del cargo de tratamiento y refinación.

Como fundamento de análisis, el mercado de concentrados debe estar estructuralmente en déficit, en otras palabras, no pueden sobrar los concentrados, ni faltar capacidad para su tratamiento. Los TCRC son términos volátiles en el tiempo que valorizan la capacidad de tratar y refinar en función de la oferta y demanda de concentrados. En los últimos 20 años los términos combinados de TCRC para contratos regulares anuales han variado desde cerca de 10 c/lb hasta cerca de 29 c/lb. El mercado spot ha presentado una volatilidad aún mayor, llegando a extremos de 0 c/lb y 44 c/lb en el mismo período de tiempo.

Un contrato de suministro que acote esta volatilidad y sitúe los TCRC en niveles atractivos para una fundición y las mineras es perfectamente factible de configurar bajo una mirada estratégica y de largo plazo.

En este sentido, un contrato que permita comercializar concentrados a precios de mercado (benchmark) dentro de un rango que fije un piso para momentos de déficit y un techo para momentos

²⁶ Si el Contenido de As es mayor a 0,2% hasta 0,5%: US\$ 2,5 / DMT por cada 0,1% sobre 0,2% hasta 0,5% Si el contenido de As es mayor a 0,5% hasta 1%: US\$ 5,0 / DMT por cada 0,1% sobre 0,5% hasta 1%. Si el contenido de As es mayor a 1%: US\$ 7,0 / DMT por cada 0,1% sobre 1%. Si el contenido de As es mayor a 1,5%: US\$ 12,0 / DMT por cada 0,1% sobre 1,5% hasta 2%. Concentrados sobre 2% de As se negocian caso a caso, pero fácilmente se podrían asumir penalidades de US\$ 15,0 / DMT por cada 0,1% sobre 2%.

²⁷ Las fundiciones de Ventanas, Hernán Videla Lira, y Poterillos.

de sobre oferta de concentrados permitiría generar un alineamiento de incentivos para invertir-operar una fundición acorde con la rentabilidad exigida a este tipo de negocios y suministrar concentrados en el largo plazo a esa capacidad que se instalaría en el país.

I. Energía renovable e hidrógeno verde

La abundancia de energía renovable a precios competitivos que se proyectan para el país, y la demanda urgente de la industria minera de hacer un cambio radical para incorporar la sustentabilidad como eje de su desarrollo productivo, que la conmina, entre otras cosas, a disminuir el uso de combustibles fósiles, es una oportunidad adicional para cualquier operador que quiera instalar una fundición en Chile.

Pronosticar que Chile será un país muy competitivo en términos de costo energético (país exportador), uno de los principales costos de operación de una fundición y refinería, debe incorporarse como parte del análisis y fortalezas en el proceso de generar una capacidad de fundición y refinación de última generación para Chile²⁸.

La generación de hidrógeno verde para reemplazar el uso de combustibles fósiles, tal como ya fue analizado en la sección V de este trabajo, es una posibilidad real que debiese complementar el menú de incentivos para establecer una nueva fundición refinería en el país.

J. Ubicación del complejo fundición refinería

La ubicación de una nueva fundición refinería en Chile es clave debido a varios motivos.

Primero, debe estar ubicada en un lugar con acceso a un puerto, de tal forma de poder recibir concentrados de otras partes de Chile y Perú, y con objeto de poder embarcar los productos de la fundición refinería (cátodos, ácido sulfúrico, polvos de fundición, barro anódico) de forma económica y segura.

Segundo, es tarea del Estado suministrar las condiciones de cabotaje y de construcción de puertos, que permitan lograr este objetivo, reduciendo de esta forma los costos logísticos de este negocio, los que son altos en la actualidad, debido a la escasa capacidad de puertos para realizar estas labores en Chile. Ello exige mirar no sólo la ubicación de una nueva fundición refinería, sino que la situación de otros puertos en el país desde los cuales debiera poderse recibir y enviar concentrados.

Tercero, el lugar debe contar preferencialmente con suministro de concentrados directo desde las faenas mineras que producen dichos concentrados, para reducir los costos de transporte.

Cuarto, la población de los lugares vecinos debiera aprobar anticipadamente la posibilidad de la construcción de un complejo de estas características. Es obvio que el lugar de emplazamiento tendrá costos ambientales, fundamentalmente de ocupación de territorio y construcción de un nuevo puerto o habilitación de un puerto ya existente. A cambio de ello, dicho complejo industrial representará un beneficio en términos de un mercado laboral especializado, con amplias oportunidades de capacitación de la población local para ocupar dichos puestos de trabajo.

²⁸ Según estimaciones de la Asociación para el desarrollo del Instituto de Tecnologías Limpias (ASDIT), los contratos de suministro eléctrico-fotovoltaico al 2030 debieran estar por debajo de los 20 US\$/MW/hora. Además, la producción de hidrógeno verde, a partir de las condiciones excepcionales de radiación solar del norte de Chile, podría ocurrir a costos por debajo de los 2 US\$/kg.

K. El rol del Estado

Atraer a una compañía experta en fundición y refinación de cobre a instalarse en el país requiere, además de condiciones excepcionales como las ya discutidas en esta sección, requiere del apoyo activo del Estado de Chile.

Las condiciones políticas, económicas, sociales, y ambientales del país son miradas con atención por potenciales inversionistas en Chile y una fundición refinación no constituye una excepción.

El rol del Estado en este caso debiera enfocarse no sólo en declarar su vocación por una inversión de esta naturaleza, sino que prestar su apreciable capacidad para facilitar, habilitar, e incentivar las condiciones territoriales, económicas, y otras que sean necesarias para llevar adelante este negocio. La articulación con la industria y la academia es esencial para lograr los objetivos perseguidos.

Si bien este trabajo mencionó algunas acciones y políticas que podrían ser aplicadas por el Estado para lograr instalar un complejo industrial fundición refinación de cobre, esta materia debe ser indagada en mayor profundidad, evaluando instrumentos de incentivos económicos, ambientales, territoriales, sociales, tecnológicos, y de innovación, que existen en numerosos países, algunos de los cuales podrían ser aplicables a Chile.

El entendimiento por parte del Estado, y no solo de un gobierno determinado, que llevar adelante este negocio es un imperativo estratégico en el desarrollo del país, es clave para el éxito de esta empresa.

VII. Conclusiones

Este trabajo proporciona evidencia en el sentido que la cadena de suministro del cobre refinado se encuentra amenazada en América Latina y que los países que actualmente tienen capacidad de fundición, especialmente Perú y Chile, se verían beneficiados por la instalación de una nueva fundición.

Se concluyó que Chile era el país más adecuado en América Latina para instalar una nueva fundición refinera debido al potencial cierre de tres de las siete fundiciones existentes en el curso de esta década. Las causas de estos cierres son dos. Primero el cumplimiento de las normativas ambientales por parte de las fundiciones de Ventanas y Hernán Videla Lira, y, segundo, por motivos económicos en el caso de la fundición de Potrerillos. Por ello, la instalación en Chile de una nueva fundición de las características descritas, vendría a reemplazar la capacidad de fusión que el país posee actualmente, y no constituiría un aumento de capacidad ni en Chile ni en América Latina.

Las tres vulnerabilidades identificadas en cuanto a las cadenas de suministro de cobre de mina serían abordadas, al menos parcialmente, con el establecimiento de una nueva fundición refinera en Chile.

La primera vulnerabilidad, que es la pérdida creciente de capacidad negociadora de las tarifas de tratamiento y refinación de la industria minera del cobre en América Latina, sería abordada solo en forma marginal en la práctica, debido al hecho que la capacidad de fusión no aumentaría. En el hecho, sin embargo, el efecto demostrativo de establecer una nueva fundición en América en décadas, constituiría una demostración que ello es posible, y que es considerado como estratégico en nuestros países, es decir que constituiría un hecho que puede repetirse.

La segunda vulnerabilidad, relacionada con la huella de carbono, sí sería abordada por la construcción de un nuevo complejo industrial, en cuanto a las ventajas que Chile tiene para instalar energías renovables no convencionales de muy bajo costo, y de establecer también condiciones ventajosas naturalmente para producir hidrógeno verde de bajo costo. Ambas condiciones son esenciales para lograr carbono-neutralidad en condiciones económicas ventajosas.

Una nueva instalación de fundición y refinera de cobre debiera establecerse como una planta piloto para la reducción de la huella de carbono y de otros efectos ambientales.

La tercera vulnerabilidad, que dice relación con el desarrollo científico y tecnológico de las formas de tratamiento seguro de los minerales cada vez más complejos de los yacimientos, es de mayor importancia para Chile que para otros países de la región, también sería abordada con el establecimiento de una nueva fundición refinera. Ello podría revitalizar el amplio sector académico y tecnológico relacionado con esta temática, y dar lugar a la creación de nuevas tecnologías de tratamiento.

Las condiciones que hay que crear para atraer a invertir en Chile a una empresa experta a nivel global en fundición y refinación de concentrados de cobre, fueron discutidas, y ello abarca las dimensiones regulatorias, económicas, ambientales y sociales, así como aspectos específicos de los contratos de suministro de concentrados que habría que establecer. Queda en evidencia que no es necesario que la industria minera se involucre en el financiamiento de este negocio, pero que sí que apoye mediante la suscripción de contratos de suministro de concentrados.

Finalmente, el rol del Estado en esta empresa es crucial, como habilitador e incentivador de esta inversión, en el entendido que se trata de una inversión estratégica para el desarrollo del país, y qué, por tal motivo, no puede esperarse que el mercado por sí solo resuelva este desafío.

Bibliografía

- Aurubis (2020a), Life cycle assessment iron silicate. Accessed on May 2021 in: <https://www.aurubis.com/responsibility-x/environment--energy%5B2%5D/life-cycle-assessment-iron-silicate>.
- _____ (2020b), Environmental Protection in the Aurubis Group and Consolidated Aurubis AG Environmental Statement 2020. Hamburg and Lünen Sites.
- BIR (2008). Report on the environmental benefits of recycling. Bureau of International Recycling, October 2008.
- Brosig, D., Safe, P., Randhawa, B., Russell, M., Samaniego, L.M., Puente, J.A. (2019), Environmental Emissions Management at the La Caridad Copper Smelter. Proceedings of the 58th Conference of Metallurgists Hosting Copper 2019.
- Burkhardt, J.J., Heath, G.A. and Cohen, E. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of trough and tower concentrating solar power electricity generation: Systematic review and harmonization. *Journal of Industrial Ecology*.
- Cesco (2020), Cobre refinado. Un buen negocio para Chile. Documento de trabajo desarrollado por Gustavo Lagos, Iván Valenzuela, Roberto Parra, Mauro Valdés, Jose Joaquín Jara, Juan Carlos Salas, Juan Rayo, Leandro Voisin. Centro de Estudios del Cobre y la Minería, Santiago, Chile. Mayo 2020.
- Cochilco (2020), Mercado chileno del ácido sulfúrico al año 2029. Comisión Chilena del Cobre. Santiago, Chile. Diciembre 2020.
- Comisión Presidencial Fundiciones y Refinería (2016), Documento del grupo de mercados de concentrados de cobre de la Comisión Presidencial para el futuro de las fundiciones y refinerías de Codelco y Enami. 5 de mayo 2016. Disponible en: http://www.gustavolagos.cl/uploads/1/2/4/2/12428079/mercados_de_concentrados____gl_v19__5-5-16_.pdf.
- Corema Antofagasta (2009), Resolución Exenta N° 0086/2009. Califica Ambientalmente el proyecto "Planta de Abatimiento de Arsénico y Antimonio para el Tratamiento de Polvos de Fundición y Efluentes de Refinería ". Antofagasta, 2 de marzo de 2009.
- Coursol, P., Mackey, P. J., Kapusta, J., Cardona, N. (2015), Consumption in Copper Smelting: A New Asian Horse in the Race. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society* 67(5):1066-1074. DOI: 10.1007/s11837-015-1380-1.
- Dey, A., Dev, D., y Saha, P. (2014), Use of copper slag as sustainable aggregate. Conference paper. ICSCI 2014 © ASCE India Section, Oct 17 – 18, 2014, Hitex, Hyderabad, Telangana, India.

- ECI (2021), Transport regulations by the International Maritime Organization: MARPOL Annex V and IMSBC Code. European Copper Institute. Accedido el 5-3-2021 de <https://copperalliance.eu/about-us/voluntary-initiatives/imo-marpol-ghs/>.
- _____ (2014a), Guidance on Classification of Copper Concentrates for MHB. European Copper Institute. 8 December 2014.
- _____ (2014b), Copper Concentrates. Environmental and Human Health hazard classification. Application to the assessment of substances "Harmful to the Marine Environment" (HME) as set out under the 2012 Annex V MARPOL Convention amendments. European Copper Institute. October 2014.
- Gasa, G., Lopez-Roman, A., Prieto, C., and Cabeza, L. (2021), Life Cycle Assessment (LCA) of a Concentrating Solar Power (CSP) Plant in Tower Configuration with and without Thermal Energy Storage (TES). *Sustainability* 2021, 13, 3672. <https://doi.org/10.3390/su13073672>.
- Glöser, S., Soulier, M., and Tercero Espinoza, L.A. (2013), Dynamic Analysis of Global Copper Flows. Global Stocks, Postconsumer Material Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation. *Env. Science and Technology*, 2013, 47, 6564–6572.
- Gómez, F., Guzmán, J.I., Tilton, J.E. (2007), Copper recycling and scrap availability. *Resour. Policy* 32, 183-190.
- Greenwood, N. N. and Earshaw, A. (1984), *Chemistry of the Elements* N. N. Pergamon Press, New York, NY.
- ICA (2021), From stone to stone. The circular path of iron silicate. International Copper Association. Accessed on May 2021 in: https://sustainablecopper.org/wp-content/uploads/2021/04/ICA-poster-on-iron-silicate_final.pdf.
- _____ (2020), Technical Guidance for the Classification of Copper Metal under the Globally Harmonized System for Classification and Labelling of Chemicals (GHS). Prepared by Gradient Corp. with International Copper Association (ICA). January 21, 2020.
- _____ (2013), 2013 Technical Report. The U.S. Copper-base Scrap Industry and Its By-products. Janice Jolly. International Copper Association.
- ICMM (2014), Hazard assessment of ores and concentrates for marine transport. Materials Stewardship. International Council on Mining and Metals. October 2014.
- ICSG (2020), The World Copper Factbook 2020. International Copper study Group, Lisbon. Disponible en: <https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/3046>.
- _____ (2018), Annual recyclables survey April 2018, reference period 2005 – 2016, and preliminary estimates for 2017. International Copper study Group, Lisbon.
- _____ (2010), Global Copper Scrap Research Project. International Copper study Group, Lisbon.
- Incomare (2021), Copper Market Forecasts.
- Lagos, G. y Henríquez, H. (2004), Escenarios para la oferta y demanda de cobre en el Siglo XXI, Foro en Economía de Minerías, Vol 1, pp57-80, Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Male, D. (2017), Regulatory Trends Affecting the Processing, Transport and Disposal of Copper Industry Impurities. Presentation at 1st International Seminar on Mining and Sustainable Development. Impurities: Regulatory Trends, Markets and Technologies. Don Smale, Secretary-General, ICSG. Thursday 6 April, 2017 CESCO Week, Santiago, Chile.
- Manriquez-Mujica, Juan Manuel (1997), Recuperación Integral de Metales Preciosos en la Planta de Metales Nobles de Enami Ventanas. Producción de Platino, Paladio, Rutenio y Rodio de Alta Pureza. Programa FONDEF, Proyecto N° D971048. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S., Ulgiati, S. (2018), Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* 2018, 5, 24; doi:10.3390/environments5020024.
- Menzies, John C. (2019), Complex Copper Concentrates. Cmi Capital Blog, July 28, 2019. Disponible en: <http://cmi-capital.com/blog/category/minerals-and-metals/>.
- Metall Bulletin (2020a), Facing raw material crunch, China's copper smelters lobby for blending licenses. *Fast Markets. Metall Bulletin*. August 03, 2020. London.
- _____ (2020b), Chinese customs okay copper smelters for complex concs imports – sources. *Fast Markets. Metall Bulletin*. August 11, 2020. London.
- _____ (2019), China's customs lobby smelters to impose lower arsenic threshold on copper conc imports. *Fast Markets. Metall Bulletin*. August 02, 2019. London.

- Minería UC (2021), Base de datos del Programa de Economía de Minerales, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- MMA (2015), Gobierno Regional anuncia pavimentación de calles mediante utilización de escoria como alternativa de uso en caminos. Publicado el 9 julio, 2015. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. Disponible en: <https://mma.gob.cl/gobierno-regional-anuncia-pavimentacion-de-calles-mediante-utilizacion-de-escoria-como-alternativa-de-uso-en-caminos/>.
- Nazer, A., Pavez, O., Rojas, F. y Aguilar, C. (2010), Una revisión de los usos de las escorias de cobre. Anales IBEROMET. XI/CONAMET/SAM X 2009, 2-5 noviembre 2010, Viña del Mar, Chile.
- Nazer, A., Pavez, O., Rojas, F. y Palacios, J. (2005), Uso de las escorias de cobre como agregado pétreo en hormigones. X Congreso de Control de Calidad en la Construcción - VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción. Asunción, Paraguay.
- NREL (2021), Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy. Consultado en julio de 2021 en: <http://en.openei.org/lca>.
- Parra, R., Salas, J.C. (2018), Smelting and Hydrometallurgy Treatment for Copper Sulphide Ores and Concentrates: Technologies, Challenges, and Trends. International Copper Study Group, Lisbon.
- Pavez, O., Nazer, A., Rivera, O., Salinas, M., Araya, B. (2019), Copper slag from different dumps in the Atacama Region used in mortars as partial replacement of cement. *Revista Materia*, v.24, n.1, 2019.
- Petersen, H. (2007), Elementos para la creación de un manual de buenas prácticas para instalaciones solares térmicas domiciliarias. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile.
- Peute Baustoff (2021), Quality and the environment. Peute Baustoff, The Specialist for Iron-Silicate Products. Accessed on May 2021 in: <http://www.peute.de/content/view/20/43/lang,english/index.html>.
- Pitroda, J., y Raval, A. (2019), Sustainable Construction Material-Copper Slag. A Review. *International Journal of Engineering Research*. Volume No.8, Issue Special 4, pp : 10-15. ISSN:2319-6890 (online),2347-5013(print).
- PRM (2013), Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Planta Recuperadora de Metales. Preparado por Proust Consultores. Planta Recuperadora de Metales, SpA. Abril de 2013.
- PwC (2019), Mine 2019: Resourcing the future. PwC.
- Rajeeth, T. J., Hussain Shah, A., Manzoor Makhdomi, S., Naveed Wani, A. (2020), Potential use of copper slag in mortar and concrete. A critical review. *Int. J. Adv. Res.* 8(10), 430-437. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/11869>.
- Rivera, Nilza (2021), Econometric modelling of copper recycling. Tesis de doctorado. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- SAACKE (2020), Whitepaper Hydrogen in Industry and Shipping. September 2020. Bremen, Germany.
- Schlesinger, Mark E., King, Matthew J., Sole, Kathryn C., Davenport, William G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Fifth edition. Elsevier.
- Schwartz (1995), Arsenic in Porphyry Copper Deposits: Economic Geology of a Polluting Element. *International Geology Review* January 1995(1):9-25.
- Selivanov, E., Novikov, D., Belyaev, V., Skopov, G. (2020), Arsenic in Chemical and Metallurgical Conversions of Copper-zinc Concentrates. In IV Congress "Fundamental research and applied developing of recycling and utilization processes of technogenic formations", *KnE Materials Science*, pages 446-450. DOI 10.18502/kms.v6i1.8123 <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Materials/article/view/8123>.
- Shi, C., Meyer, C., Behnood, A. (2008), Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources Conservation and Recycling*, v. 52, pp. 115-1120, 2008.
- Shiva Kumar, S., Himabindu, V. (2019), Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 2 (2019) 442-454.
- Slade, M. E. (1980), An econometric model of the U.S. Secondary Copper Industry: Recycling versus Disposal. *7(2)*, 123-141.
- Spano, C., Natali, P., Cannon, C., Greene, S., Urzúa, O., Sucre, C., Unzueta, A. (2020), Latin-America 2050: Becoming a global low-carbon metals and solutions hub, Technical Note | IDB-TN-02096, Banco Interamericano de Desarrollo, BID.

- Rui Liu, Genwen Chen and Jianxing, Yang (2020), Compositions of Cu-(Fe)-Sulfides in the 109 Reduced Granite-Related Cu Deposit, Xinjiang, Northwest China: Implications to the Characteristics of Ore-Forming Fluids. *Geofluids*, Volume 2020.
- Tan, S. (1987), *An econometric analysis of the world copper market*. World Bank, International Economics Department.
- Tilton, J.E, Guzmán, J.I. (2016), *Mineral Economics and Policy*. First Edition. Resources for the Future. RFF Press. New York.
- Tilton, J.E., Crowson, P.C.F., DeYoung, J.H., Eggert, R.G., Ericsson, M., Guzmán, J.I., Humphreys, D., Lagos, G., Maxwell, P., Radetzki, M. (2018), Public policy and future mineral supplies. *Resour. Policy* 57 (2018) 55–60, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.01.006.
- UK (2020), Greenhouse gas reporting: conversion factors 2019. UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Last updated 28 July 2020.
- UN (2019a), Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS). Eighth revised edition. United Nations.
- _____ (2019b), *Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas*. Vigésimo primera edición revisada. Naciones Unidas.
- Valencia, C. (2005), *An econometric study of the world copper industry*. Ph.D. Dissertation, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Valenzuela, Armando (2000), *Arsenic management in the metallurgical industry*. M SC Thesis, Faculté de Sciences et Génie, Université Laval.
- Wang et al. (2019), *Arsenic Challenge and Control In Zijin Copper Smelter*. *Cobre/Copper 2019*. Vancouver, 2019.
- WBMS (1994), *World Metal Statistics Yearbook 1994*. World Bureau of Metal Statistics. Ware, England.
- Wood Mackenzie (2020a), *Global concentrates long term outlook*. Q4 2020.
- _____ (2020b), *Copper Mine Composite Costs League*. Dataset 2020 Q1.
- _____ (2019), *Global Copper Smelter Supply Summary*.
- _____ (2017), *Global Copper Smelter Supply Summary*.
- _____ (2016), *Global Copper Smelter Supply Summary*.
- Zhou, H., Liu, G., Zhang, L., Zhou, C., Mian, M., Cheema, A. (2021), Strategies for arsenic pollution control from copper pyrometallurgy based on the study of arsenic sources, emission pathways and speciation characterization in copper flash smelting systems. *Environmental Pollution* 270 (2021) 116203.



En el presente estudio se evalúan las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado de los países latinoamericanos. El cobre de mina producido por América Latina aumentó del 24,1% del total mundial en 1990 al 43,8% en 2020, pero al mismo tiempo la capacidad de fusión y refinación se redujo del 21,9% al 11,2%, lo que significa que la mayor parte del cobre producido se exporta actualmente en concentrados.

La migración de la capacidad de fusión y refinación hacia China y otros países de Asia trajo consigo consecuencias que representan vulnerabilidades y a la vez oportunidades para los países latinoamericanos. Entre las mayores vulnerabilidades están que la capacidad negociadora de los cargos de tratamiento y refinación por parte de América Latina se ha visto fuertemente reducida; que ello impacta negativamente en la emisión de gases de efecto invernadero, y que se reduce la posibilidad de desarrollar ciencia y tecnología para procesar de manera sostenible los minerales y concentrados de cobre cada vez más complejos, utilizando menos energía, agua y territorio.

El estudio concluye que la construcción de nueva capacidad de fusión y refinación en América Latina aborda estas vulnerabilidades y es viable económica y tecnológicamente.

