

Análisis nueva Fundición y Refinería de Cobre en Chile

C. González Ávila

Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, estudio realizado en la empresa JRI Ingeniería junto a Francisco González Miranda.

RESUMEN: Chile con el tiempo ha disminuido su competitividad en el mundo de las fundiciones, dado que las tecnologías utilizadas actualmente no han permitido alcanzar niveles de costos de operación comparables con fundiciones que operan con tecnologías más modernas. Por otro lado, China se alza como una gran competencia, ya que, sus fundiciones operan con la última tecnología del mercado y con elevados niveles de captación de SO_2 y As . Por esta razón, este trabajo documenta el análisis de alternativas tecnológicas para una nueva FURE de concentrados de cobre en Chile, de categoría mundial, competitiva en costos y con elevados niveles de captación de SO_2 y As , superiores a los establecidos en el D28. Para lograr esto, se definieron condiciones de borde y criterios del estudio, se realizó un análisis FODA, metodología AHP, balances de masa y evaluación económica, con lo cual se obtiene que la configuración tecnológica de fusión BBR-BBC-PFE parece ser la mejor alternativa para una nueva FURE de concentrados de cobre en Chile, pero, debido a la escasa información disponible, esta alternativa representa un riesgo respecto a las otras. Es importante destacar que este trabajo es una oportunidad de negocio, desarrollada a un nivel preliminar, que requiere de estudios posteriores para confirmar la alternativa BBR-BBC-PFE como un real caso de negocio.

1. INTRODUCTION

Uno de los temas vigentes en el negocio de las fundiciones, es plantearse cómo sobrellevar los nuevos desafíos que hoy en día existen, tanto a nivel país como a nivel mundial. Por esta razón, es muy importante definir la situación actual de nuestro país en relación a este tema.

La contaminación generada en una planta pirometalúrgica es muy alta, por lo tanto, si no se adoptan las debidas precauciones, la continuidad operacional de cualquier fundición se va a ver afectada, pudiendo llegar al cierre de la planta, ya que, de los contaminantes emitidos al ambiente (material particulado, dióxido de azufre, arsénico y mercurio) producen efectos adversos crónicos y agudos sobre la salud de las personas, así como también un enorme daño al medio ambiente. Es por esto que es de suma importancia que la planta opere con los estándares más altos posibles.

Por lo anterior, para fijar los límites en las emisiones contaminantes, se promulgó en el año 2013 el Decreto N° 28 del Ministerio de Medio Ambiente (D28, 2013), una nueva norma ambiental aplicable a las fundiciones y fuentes emisoras de As en Chile. Particularmente, a finales del año 2018, la atención se concentró en el término del plazo para el cumplimiento del

D28, respecto de la captura del 95% de azufre y arsénico que generan las operaciones activas, en donde, algunas fundiciones presentaban atrasos en la fecha de cumplimiento de dicho decreto, situación que se resolvió durante el primer semestre del 2019.

También, es importante destacar que Chile es un país minero, la minería es y seguirá siendo la principal actividad productiva del país, produciendo aproximadamente 15 millones de toneladas de concentrados de cobre anualmente, de los cuales aproximadamente solo un tercio se funden en las siete fundiciones existentes en nuestro país y unos 10 millones de toneladas por año se exportan para ser fundidos y refinados principalmente en China y Japón. A mediano y largo plazo, la producción de concentrados de cobre de nuestro país aumentará con la puesta en marcha de nuevos proyectos de minerales sulfurados. Por lo tanto, si las fundiciones chilenas continúan con la pérdida de competitividad en el mercado mundial, habrá un mayor potencial impacto en el cierre de algunas fundiciones, lo que provocaría un significativo aumento de la dependencia de fundiciones de otros países, especialmente en China, para el tratamiento de nuestros concentrados de cobre. [22]

La competitividad de Chile en el mercado mundial seguirá disminuyendo, dado que se advierte en otros países el aumento en el número de fundiciones, junto con un mayor nivel tecnológico, lo cual es una gran amenaza para nuestro país. Específicamente China es el país que más sobresale, ya que, al pasar los años su participación en el mercado ha ido en aumento, pasando de una participación del 2% de la producción mundial en 1980 a una proyección para 2030 de un 43% global. Por el contrario, Chile en 1980-1990 era el país con mayor producción de cobre de fundición, con un 12%-13% a nivel global, pero en los siguientes años ha sido superado por Japón y China y actualmente se proyecta que Chile sólo representará el 5% del total para 2030. [16]

Es por todo lo anterior, que es de gran importancia mejorar la operación con nuevas tecnologías que permitan superar las cifras impuestas por el D28 para nuevas fundiciones (98% de fijación de As y S), tecnologías que permitan tener un proceso productivo eficiente, junto con una alta rentabilidad, para volver a posicionar a Chile dentro de los grandes competidores mundiales.

Esta es la razón por la que en este estudio se determinarán las tecnologías más convenientes para cada uno de los procesos, produciendo un menor impacto a las personas y al medio ambiente, para que Chile pueda situar sus fundiciones dentro de las más eficientes y productivas del mundo, con instalaciones que sean referentes en la industria, Fundiciones y Refinerías de Cobre de clase mundial.

2. ANTECEDENTES TEORICOS

2.1 ¿Por qué fundir?

El cobre está íntimamente asociado al desarrollo de los países, como también, hay que considerar que las reservas de cobre son mayoritariamente sulfuros, y ante la ausencia de tecnologías hidrometalúrgicas probadas a gran escala para su procesamiento que sean una real alternativa técnico-económica, se hace necesario continuar operando con tecnologías pirometalúrgicas.

2.2 Descripción general del proceso pirometalúrgico

En una fundición de concentrados de cobre, es posible distinguir cuatro procesos principales.

Estos corresponden a: Secado, Fusión, Conversión, Refinación y Moldeo y Limpieza de Escorias. En la etapa de moldeo se producen ánodos, los cuales se alimentan a la etapa de Electro-refinación, donde se producen los Cátodos de alta pureza y un Barro Anódico que se trata en la Planta de Metales Nobles. Entre otras actividades relevantes del proceso se destacan: la captación y manejo de gases y la planta de ácido.

2.3 Decreto 28, 2013

Norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. Para este análisis, el artículo 8 es el más relevante a estudiar, el cual estipula (solo lo relevante para este estudio) que las fuentes emisoras nuevas, deben cumplir con un porcentaje de captura y fijación del azufre (S) y del arsénico (As) igual o superior a un 98% y que las plantas de ácido deben emitir una concentración de SO₂ inferior o igual a 200 ppm.

Tecnologías para fundir concentrado:

DESCRIPCIÓN	BBR	FSF		ISA	CT	S-Furnace (Mitsubishi)
		INCO	OUTOKUMPU			
Concentrado	Húmedo	Seco	Seco	Húmedo	Seco	Seco
%Enriquecimiento O ₂	72-75	95	45-80	50-65	34-38	~55
%Cu mata/MB	~70	55-60	55-70	~60	73-75	60-68
%Cu escoria	2-3	1-2	1-2	0,7	8-12	0,7-0,9

Tabla 2.1. Principales características de las tecnologías para fundir concentrado.

BBR: Bottom Blowing Reactor

FSF: Flash Smelting Furnace

ISA: IsaSmelt Furnace

CT: Convertidor Teniente

S-Furnace; Tecnología Mitsubishi

Tecnologías de conversión:

DESCRIPCIÓN	BBC	FCF	CPS	C-Furnace (Mitsubishi)
Mata o MB	60% fundido 40% sólido	Granulada	Líquida	Granulada
%Cu blíster	~98	~98	~98	~98
%Cu escoria	8-12	14-18	>30	15

Tabla 2.2. Principales características de las tecnologías conversión.

BBC: Bottom Blowing Converter

FCF: Flash Converting Furnace

CPS: Convertidor Peirce Smith

C-Furnace; Tecnología Mitsubishi

3. CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL ANALISIS

Meta a alcanzar: Nueva FURE para concentrados de cobre en Chile.

Condiciones de borde:

1. Cumplir con D28 para nuevas Fundiciones o superar las cifras.
2. Cumplimiento estándares de Seguridad y Salud Ocupacional.
3. Configuraciones de Fusión-Conversion con las tecnologías presentadas en los antecedentes teóricos.
4. Consolidación tecnológica, es decir, configuraciones tecnológicas ya implementadas y probadas en el mercado mundial.
5. Configuraciones tecnológicas estándares de refinería, manejo de gases y PA.
6. Horizonte planificación 25 años.
7. Capacidad de Fundición de 1.500.000 tpa.

3.1 Criterios cualitativos para evaluar las alternativas de configuraciones tecnológicas

1. Cumplimiento normativo: Cumplimiento de la norma D28 para nuevas Fundiciones.
2. Layout: Espacios o disposición de los equipos, es decir, el que presente una mayor facilidad de implementación.
3. Plazo de ejecución: En relación al plazo para llevar a cabo el proyecto.
4. Operatividad: Facilidad de operación, coordinación y conocimiento de la tecnología.
5. Eficiencia Energética: Potencial de recuperación de energía global.
6. Productividad: Disponibilidad y uso de mano de obra.
7. Suministros críticos: En base a requerimientos de agua y energía eléctrica.
8. Recuperación metalúrgica: Alternativa que produce una menor pérdida de Cu en el sistema.

3.2 Criterios cuantitativos para evaluar las alternativas de configuraciones tecnológicas:

1. Costo de Inversión, se estima un CAPEX para cada alternativa tecnológica.
2. Costo de Operación, se estima un OPEX para cada alternativa tecnológica.

3. Valor Actual Neto, se realiza el cálculo del VAN con una tasa de descuento del 6% en un horizonte de 25 años para el tratamiento y maquila del concentrado.

3.3 Descripción del proceso:

El presente trabajo considera una nueva FURE para concentrados de cobre en Chile para la producción de cátodos de cobre, más el beneficio del barro anódico, para procesar y recuperar los contenidos de Oro, Plata, Paladio y Platino, como también la venta del ácido sulfúrico y el sulfato de cobre. Para esto se deben considerar los siguientes aspectos generales asociados a la operación.

- Se considera una nueva fundición y refinería en Chile, que debe tratar 1.500.000 toneladas al año de concentrado de Cobre.
- El balance de masa se considera a partir del ingreso de concentrado al horno de fusión.
- El balance de masa se realiza a partir de 5 elementos del concentrado fresco: Cu , S , As , Ag y Au . El resto es denominado como "otros".
- Las alternativas de configuraciones tecnológicas de fusión y conversión de este balance tienen Caldera, Precipitador Electroestático, Planta de Ácido de doble contacto y Tratamiento de Gases de Cola (condición de borde numero 5).
- Planta de Flotación de escorias para tratar las escorias de fusión, excepto las tecnologías S-Furnace (Mitsubishi) e ISA, que utilizan un Horno Eléctrico para tratar la escoria producida.
- Debido a la escasa información con respecto de algunas tecnologías, se realiza el balance de masa con coeficientes de distribución de hornos parecidos en funcionamiento al que se está estudiando, como, por ejemplo, para los casos del BBR-BBC y Mitsubishi, se utilizan coeficientes de distribución del CT y CPS, y del FSF y FCF respectivamente, pero con las características propias del horno en estudio.
- La escoria de conversión retorna al horno de fusión (criterio para realizar el balance).
- El cobre blíster producido por el horno de conversión correspondiente, es enviado al horno anódico (estándar) para producir ánodos de cobre.

- La sangría de los elementos es por canaletas, excepto cuando la escoria va a la planta de flotación de escorias o cuando la escoria va a botadero, en estos casos va a enfriamiento en ollas (criterio para realizar el balance).
- Los ánodos de cobre son enviados a la Refinería electrolítica (estándar) para producir cátodos de cobre.
- La escoria producida de los Hornos de Ánodos, se retorna al horno de conversión (criterio para realizar el balance).
- Los ánodos de cobre antes de entrar a electro refinación, son enviados a la máquina preparadora de ánodos. Los ánodos rechazados retornan a los Hornos de Ánodos (criterio para realizar el balance).
- Para la refinación electrolítica se define una cantidad de celdas armónicamente distribuidas y conectadas.
- El barro anódico o PRRC (Precipitado Refinería Rico en Cobre), es tratado mediante lixiviación (primera etapa en la Planta de Metales Nobles) para disminuir su cantidad de cobre, cuyo producto es llamado Barro Anódico Descubrizado (BAD) o PRD (Precipitado Refinería Descubrizado), el cual se dirige a la Planta de Metales Nobles para recuperar el Oro y Plata. Es conocido que el PRD contiene otros metales de interes, sin embargo no fue considerado para efectos de balance preliminar.
- Con el cobre recuperado de la lixiviación se produce Sulfato de cobre.
- El Scrap (restos de ánodos) de la Refinería Electrolítica, se retorna a los Hornos de Ánodos (criterio para realizar el balance).

4. ANALISIS, EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis screening tecnológico:

A partir de las tecnologías de Fusión y Conversión, presentes en los antecedentes teóricos, se realiza una combinatoria de pares tecnológicos Fusión-Conversión (alternativas de configuraciones tecnológicas), obteniendo en total 13 posibles alternativas.

Alternativas	CONFIGURACIONES TECNOLÓGICAS	
	Fusión	Conversión
1	CT	CPS
2	ISA	CPS
3	FSF	CPS
4	BBR	CPS
5	CT	FCF
6	ISA	FCF
7	FSF	FCF
8	BBR	FCF
9	CT	BBC
10	ISA	BBC
11	FSF	BBC
12	BBR	BBC
13	S-FURNACE	C-FURNACE

Tabla 4.1. Alternativas de configuraciones tecnológicas de Fusión y Conversión.

Algunas de las 13 alternativas de configuraciones tecnológicas de la Tabla 4.1, no cumplen con la condición de borde número 4, por lo tanto, las alternativas disminuyen a 7.

Alternativas	CONFIGURACIONES TECNOLÓGICAS	
	Fusión	Conversión
1	CT	CPS
2	ISA	CPS
3	FSF	CPS
4	BBR	CPS
5	FSF	FCF
6	BBR	BBC
7	S-FURNACE	C-FURNACE

Tabla 4.2. Configuraciones tecnológicas.

4.2 Análisis jerárquico AHP:

Luego de realizar el análisis FODA, se procede a realizar la metodología AHP. Esta metodología fue desarrollada por Thomas L. Saaty. El método AHP (Analytic Hierarchy Process) permite construir un modelo jerárquico de una manera eficiente y gráfica, organizando la información con respecto de un problema.

Una vez definidos los criterios y las condiciones de borde, se procede a realizar la evaluación por 5 expertos en el área de la Pirometalurgia de las Fundiciones.

Este método utiliza comparaciones pareadas para establecer medidas de prioridad o preferencias tanto para los criterios como para las alternativas de decisión, en donde el nivel de

importancia que el experto considere conveniente para el criterio o alternativa, será verificado por números (escala de Saaty), los cuales serán reemplazados en una matriz de Excel con una fuerte base matemática, de la cual se obtiene una matriz resultante que representa las preferencias de los expertos con respecto a los criterios y alternativas estudiados. La preferencia de una alternativa sobre la otra, va a depender del criterio que se esté evaluando, ya que va dependiendo de las preferencias de los expertos por una alternativa en específico con respecto al criterio a analizar, por lo tanto, se tendrán preferencias por una configuración para cierto criterio y preferencias por otra configuración en otro criterio. Entonces, para obtener la preferencia global de los expertos por las configuraciones tecnológicas, se deben contrastar con las preferencias que los mismos expertos le atribuyeron a cada uno de los criterios evaluados, obteniendo de esta forma, la preferencia global.



Figura 4.3. Preferencia global de los expertos por las configuraciones tecnológicas de fusión.

Finalmente, se obtiene que la alternativa FSF-FCF es la configuración tecnológica más adecuada, según los expertos, para una nueva FURE de concentrados de cobre en Chile, bajo las condiciones de borde y criterios cualitativos presentado. Pero, para el siguiente análisis cuantitativo, se evaluarán las tres mejores alternativas de configuración tecnológica, obtenidas según las preferencias de los expertos, y se analizarán bajo un balance de masa general y una evaluación económica.

4.3 Balance de masa:

Para las tres mejores alternativas, se definieron una serie de criterios para calcular el balance de masa en la fundición y en la refinera electrolítica. A continuación, se presentan los principales resultados.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
Recuperación Cu [%]	98,91	98,77	98,59

Tabla 4.4. Recuperaciones de Cu por alternativa de configuración tecnológica.

En la Tabla 4.4 se presentan las recuperaciones de cobre, la cual representa la cantidad de cobre que se logró recuperar del concentrado. En este caso, la alternativa que presentó una mayor recuperación de cobre es la FSF-FCF-PFE.

Por otro lado, el tamaño del sistema de manejo de gases dependerá de la cantidad de gases producidos por las tecnologías de fusión y conversión correspondientes, lo cual está estrechamente relacionado con el enriquecimiento de oxígeno ingresado a cada horno o reactor.

Descripción		FSF-FCF	BBR-BBC	MITSUBISHI
Total gases a PA	Gases evacuados de los procesos [Nm ³ /h]	135.499	153.470	173.966
	SO ₂ en gases [Nm ³ /h]	40.619	40.556	40.538
	SO ₂ en gases [%]	30	26	23

Tabla 4.5. Gases provenientes de fusión y conversión.

La alternativa FSF-FCF es la que produce en total el menor volumen de gases y una mayor concentración de SO₂, los cuales van dirigidos a la planta de ácido. El sistema de manejo de gases de esta alternativa sería el más pequeño respecto a las otras dos alternativas. Por otra parte, el sistema de manejo de gases de la alternativa Mitsubishi, sería el más grande en comparación con las otras dos alternativas.

A medida que avanza el proceso de fundición en términos operacionales, el producto fundido es sangrado y transportado en ollas (en algunos casos enfriado) para ser cargado a la próxima tecnología, pero esto provoca que se liberen gases a la atmosfera que contienen azufre y arsénico que son difíciles de capturar, razón por la cual las tres configuraciones tecnológicas estudiadas tienen un mecanismo de transporte mediante canaletas (criterio), las cuales disminuyen en gran medida las emisiones de gases.

También, se tienen las emisiones del Horno de Ánodos y del Horno de Limpieza de Escoria (caso Mitsubishi), las cuales no pueden ser tratadas de la misma forma que los gases de fusión y conversión, por lo tanto, son liberadas a

la atmósfera, pero este es un criterio, ya que hoy en día hay abatimiento de estos gases (se considera fuera del alcance de este trabajo). Por otro lado, se tienen las emisiones de la planta de ácido (gases de cola), los que son tratados para disminuir la cantidad de azufre y así liberarlos por la chimenea.

Entonces, es muy importante para la fundición mantener estas emisiones lo más bajo posible, ya que, los elementos más contaminantes son el azufre y el arsénico. Es por todo lo anterior que la fijación del azufre y arsénico, deben mantenerse en los niveles establecidos por el D28.

Emisiones	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
Fijación S [%]	99,36	99,26	99,20
Emisión S [tph]	0,38	0,43	0,47

Tabla 4.6. Fijación y emisión de S.

Las tres alternativas de configuración tecnológica superan lo establecido en el D28 en cuanto a la fijación/captura, pero la alternativa que tiene una mayor fijación de azufre es la FSF-FCF, es decir, es la que menos azufre libera al ambiente.

Emisiones	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
Fijación As [%]	98,63	99,11	98,15
Emisión As [tph]	0,02	0,01	0,03

Tabla 4.7. Fijación y emisión de As.

Las tres alternativas de configuración tecnológica superan lo establecido en el D28 en cuanto a la fijación/captura de azufre y arsénico, pero la alternativa que tiene una mayor fijación de arsénico es la BBR-BBC, es decir, es la que menos arsénico libera al ambiente, basados en los coeficientes de partición utilizados.

En la tabla 4.8, se entregan los balances de masa resumidos de las tres configuraciones tecnológicas.

Productos	FSF-FCF	BBR-BBC	MITSUBISHI
Ánodos [tpa]	550.173	549.267	548.045
Cu [tpa]	548.247	547.344	546.127
As [ppm]	1.843	1.615	2.060
Ag [ppm]	263,03	268,61	263,73
Au [ppm]	3,40	3,47	3,41
Cátodos [tpa]	447.243	446.506	445.513
Cu [tpa]	447.198	446.462	445.468
PRD [tpa]	962,42	960,83	958,70
Cu [tpa]	23,73	23,69	23,64
Ag [tpa]	119,94	122,90	120,04
Au [tpa]	1,54	1,58	1,55
Cu sulfato de Cu [tpa]	450,86	450,12	449,12
Ácido sulfúrico [tpa]	1.483.617	1.481.288	1.480.640

Tabla 4.8. Producción anual FURE.

La producción de ánodos es muy parecida en las tres alternativas, siendo superior levemente en la alternativa FSF-FCF. La cantidad de cobre en los ánodos es mayor en esta alternativa, lo cual está relacionado con una recuperación mayor de cobre.

La cantidad de oro y la plata en los ánodos de la alternativa BBR-BBC son mayores en comparación a las otras dos alternativas, es decir, hubo mayor recuperación de estas en la fundición.

Los cátodos y scrap (15% ánodos) producidos son similares en las tres alternativas, pero la tecnología FSF-FCF produce una cantidad levemente superior en comparación a las otras.

La alternativa FSF-FCF es la que contiene levemente una menor cantidad de Ag y Au en el PRD. En cambio, la alternativa BBR-BBC es la que contiene mayor cantidad Ag y Au en el PRD. Esto está relacionado con la recuperación que se tiene de estas especies para cada configuración tecnológica.

La alternativa FSF-FCF es la que produce mayor sulfato de cobre y ácido sulfúrico, debido a que la tecnología genera una mayor cantidad de ánodos y posee una mejor captura de S.

4.4 CAPEX:

Para el calculo del CAPEX, se han establecido las mismas bases de estimación de costos de inversión para las tres alternativas. En la Tabla 4.9 se muestra en forma resumida el CAPEX para cada configuración tecnológica de fundición indicada y para una refinaria con tecnología definida, que incluye planta de metales nobles y tratamiento de electrolito.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
COSTOS DIRECTOS US\$			
Suministro	1.360.923.324	1.152.487.376	1.085.916.451
Transporte	52.893.199	44.792.196	42.204.872
Construcción y Montaje	411.954.537	348.860.509	328.709.341
Total Costo Directo	1.825.771.060	1.546.362.895	1.439.975.736
COSTOS INDIRECTOS US\$			
Ingeniería	273.865.659	231.921.012	218.524.600
Puesta en Marcha	54.773.132	46.384.202	43.704.920
Costos del Dueño	109.546.264	92.768.405	87.409.840
Total Costos Indirectos	438.185.054	371.073.619	349.639.359
Sub Total	2.263.956.114	1.917.213.700	1.806.470.024
Contingencias (30%)	679.186.834	575.164.110	541.941.007
Total Inversión	2.943.142.948	2.492.377.810	2.348.411.031

Tabla 4.9. CAPEX por alternativas.

En la Tabla 4.9 se presentan los costos de inversión de cada una de las alternativas de configuraciones tecnológicas para un escenario de procesamiento de concentrados de cobre de 1.500.000 tpa. Es importante destacar que la tecnología Mitsubishi se divide en dos líneas de procesamiento.

La alternativa FSF-FCF es la que requiere una mayor inversión, mientras que la alternativa Mitsubishi es la de menor inversión, por el uso de un HELE en lugar de PFE.

4.5 OPEX:

Para el cálculo del OPEX, se han establecido las mismas bases de estimación de costos de operación para las tres alternativas. En la Tabla 4.10. se muestra en forma resumida el OPEX para cada configuración tecnológica.

OPEX FUNDICIÓN			
Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
	Costo (US\$/año)	Costo (US\$/año)	Costo (US\$/año)
Mano de Obra	46.350.572	45.481.080	50.162.956
Mantenimiento	34.813.062	34.806.702	34.706.936
Consumibles	55.538.822	55.971.507	66.362.492
Combustible	21.428.591	10.597.380	21.820.846
Energía Eléctrica	32.483.440	32.483.440	46.359.938
Contratistas	16.222.700	15.918.378	17.557.035
Contingencia	10.886.168	10.276.762	12.472.116
Total Costos	217.723.355	205.535.250	249.442.319

Tabla 4.10. OPEX por alternativas.

TOTAL	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
US\$/t seca de concentrado	145	137	166
cUS\$/lb Ánodos	18	17	21

Tabla 4.11. OPEX unitario fundición.

Cabe señalar que el costo de operación es directo y no considera créditos por ácido sulfúrico y/o producción de energía eléctrica.

La alternativa Mitsubishi es la que presenta mayor costo en su operación, ya que hay que tener en cuenta que se tienen dos líneas de procesamiento.

Por otro lado, se tiene la alternativa BBR-BBC, la cual presenta un menor costo de operación en comparación con las otras dos alternativas.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
	Costo (US\$/año)	Costo (US\$/año)	Costo (US\$/año)
Mano de Obra	11.437.154	11.437.154	11.437.154
Mantenimiento	2.617.464	2.613.152	2.607.339
Consumibles	10.427.466	10.413.195	10.393.956
Combustible	571.353	570.412	569.143
Energía Eléctrica	18.900.528	18.869.391	18.827.416
Contratistas	6.320.532	6.320.532	6.320.532
Contingencia	2.513.725	2.511.192	2.507.777
Total Costos	52.788.223	52.735.029	52.663.319

Tabla 4.12. OPEX por alternativas en la refinera electrolítica.

TOTAL	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
cUS\$/lb Cátodos	5,35	5,36	5,36

Tabla 4.13. OPEX en la refinera electrolítica.

No existen elementos que indiquen mayor diferencia de costos asociados a la refinera, considerando que se definió igual tecnología para cualquier configuración de fundición. Cabe señalar que no fue evaluada la producción de vapor o energía eléctrica en fundición, lo cual podría ser un elemento diferenciador.

4.6 Evaluación económica:

Para el análisis realizado a las alternativas de configuración tecnológica, se establecieron dos modelos negocio, uno de ingresos por concepto de compra de concentrados, con posterior venta de Cátodos de cobre grado A, ácido sulfúrico y productos valiosos de la PMN, y otro modelo de ingresos por concepto de maquila de concentrado hasta llevarlos a Cátodos grado A.

Todo esto se realizó con bases de estimación para cada escenario proyectado.

Cabe destacar que el producto de la PMN definido en balances de masa, es granalla de plata, lingotes de oro, sin embargo, para efectos de cálculo de ingreso, se consideró venta P_d y P_t contenido en el PRD, de acuerdo características de los concentrados tratados y deducción metalúrgica típica de mercado.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
Ingresos Cátodos de ER kUS\$/a	3.049.802	3.044.778	3.038.005
Ingresos Cu PMN kUS\$/a	3.191	3.186	3.179
Ingresos Ag PMN kUS\$/a	77.002	78.899	77.063
Ingresos Au PMN kUS\$/a	71.058	72.438	71.186
Ingresos P_d PMN kUS\$/a	144.492	144.254	143.933
Ingresos P_t PMN kUS\$/a	22.498	22.461	22.411
Ingresos Ácido Sulfúrico kUS\$/a	50.443	50.364	50.342
Costo Concentrado de Cu kUS\$/a	-2.830.382	-2.830.382	-2.830.382
INGRESOS TOTALES kUS\$/a	588.104	585.996	575.735

Tabla 4.14. Ingresos por compra de concentrado.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
Ingresos por cargos y premios kUS\$/a	641.114	641.048	640.958
Ingresos recuperación metalúrgica Cu kUS\$/a	71.895	67.661	61.644
Ingresos recuperación metalúrgica Ag kUS\$/a	1.115	1.610	1.299
Ingresos recuperación metalúrgica Au kUS\$/a	599	612	855
Ingresos recuperación metalúrgica Pb y Pt kUS\$/a	3.583	3.577	3.567
Ingresos Ácido Sulfúrico kUS\$/a	50.443	50.364	50.342
Ingreso por sulfato de cobre kUS\$/a	3.032	3.027	3.020
INGRESOS TOTALES kUS\$/a	771.780	767.897	761.687

Tabla 4.15. Ingresos por maquila de concentrado.

Los ingresos por maquila de concentrado son mayores que si se comprara concentrado, ya que, el precio por la compra de concentrado es alto, es decir, sin mayores penalidades por impurezas.

Para la evaluación económica de los escenarios con compra de concentrado y con maquilación de este, se consideró lo expuesto en

los puntos anteriores, es decir CAPEX, OPEX e ingresos, además de una tasa de descuento de un 8% y periodo de evaluación de 25 años. Con esto se construyó la evaluación económica para una fundición y refinación competitivas con altos estándares de productividad y rentabilidad con foco en el cumplimiento medio ambiental.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
VAN [KUS\$] antes del impuesto	68.193	484.757	201.271
VAN [KUS\$] después del impuesto	-462.102	-168.912	-290.921
IVAN antes del impuesto	0,03	0,26	0,11
IVAN después del impuesto	-0,21	-0,09	-0,16

Tabla 4.16. VAN e IVAN en escenario por compra de concentrado.

Si se comprara concentrado, la alternativa que podría utilizarse sería la BBR-BBC-PFE, ya que, es la que tiene un VAN mayor y un IVAN positivo.

Descripción	FSF-FCF-PFE	BBR-BBC-PFE	MITSUBISHI-HELE
VAN [KUS\$] antes del impuesto	1.402.617	1.806.282	1.552.222
VAN [KUS\$] después del impuesto	210.014	470.510	373.248
IVAN antes del impuesto	0,63	0,95	0,87
IVAN después del impuesto	0,09	0,25	0,21

Tabla 4.17. VAN e IVAN en escenario por maquila de concentrado.

Como maquilación de concentrado, las tres alternativas son rentables, destacando la configuración BBR-BBC-PFE, ya que su VAN e IVAN, es el mayor de los tres.

Ahora haciendo una comparación de las tecnologías se tiene:

La configuración tecnológica doble Flash es la que produce el menor volumen de gases en los hornos de fusión- conversión en comparación con las otras dos alternativas, por lo tanto, el sistema de manejo de gases será más pequeño. Es la más alta en la recuperación de cobre y en su fijación de azufre y de arsénico. Por otro lado, los costos de inversión son los más altos con respecto a las otras dos alternativas. Pero, por el contrario, está en segundo lugar en gastos operacionales.

La tecnología Bottom Blowing fue la segunda mejor en términos de fijación de azufre y arsénico, como también en términos de recuperación. Los costos de inversión son más bajos que la tecnología Flash, pero superior a la alternativa Mitsubishi. Los costos de operación son los más bajos de las tres alternativas.

En la alternativa Mitsubishi las fijaciones de azufre y arsénico fueron las más bajas, pero no de manera considerable. Esto se debe a que tiene un HELE, que disminuye la fijación de azufre y arsénico, pero estas son suplidas por su baja emisión cuando se traspasa el material fundido de un horno a otro, ya que, es un proceso en cascada. La recuperación también es la menor, pero no de manera considerable. Los costos de inversión de esta tecnología son los más bajos, pero con los costos de operación más altos, ya que, son dos líneas de operación las requeridas.

Es importante destacar que la alternativa de configuración tecnológica BBR-BBC, no es muy conocida y este análisis se hizo con los aspectos generales que de ella se tiene, ya que es una tecnología China relativamente nueva, por lo tanto, se debe corroborar con mayor evidencia empírica de que cumplirá lo descrito, por medio de estudios posteriores.

CONCLUSIONES

Es menester preocuparse que una nueva FURE de concentrados de cobre en Chile sea lo más eficiente, productiva y rentable, con la mejor tecnología en el mercado, es por esto que para tomar esta decisión, hay que realizar varios estudios previos.

En este estudio, el método AHP logró ser una herramienta muy útil para priorizar las alternativas tecnológicas, ya que, es un método multivariable, con el cual se obtuvo que las tres mejores alternativas, según los expertos que evaluaron, son la FSF-FCF-PFE, BBR-BBC-PFE y Mitsubishi-HELE.

A partir del balance de masa se obtuvo que las tres alternativas de configuración tecnológica cumplían con el D28, hasta superaban estas cifras, como también, alcanzaban altas recuperaciones de cobre. De este análisis se concluye que la mejor alternativa en términos de análisis técnico es la FSF-FCF-PFE.

Luego, al estimar el CAPEX y OPEX, se logró vislumbrar los costos que involucraría invertir y operar en una nueva fundición, con cada una de las alternativas, concluyendo que la alternativa Mitsubishi-HELE, es la que

involucraría un menor costo de inversión, mientras que la alternativa BBR-BBC-PFE es la que involucraría un menor costo de operación.

Al determinar los ingresos entre las alternativas de compra y maquila de concentrados, se concluye que la alternativa económicamente más rentable es la maquilación de concentrado.

Finalmente, al realizar la evaluación económica para las tres mejores alternativas, se obtiene que la alternativa de fusión BBR-BBC-PFE parece ser la mejor alternativa, ya que, logró ser la alternativa más rentable, como también cumplir con todas las condiciones de borde de este estudio. Esta tecnología tiene un alto potencial, pero esto está basado en la escasa información disponible, debido a que hay pocas fundiciones en el mundo con esta tecnología y de las cuales se dispone muy poca información, por lo tanto, esto representa un riesgo al optar por esta alternativa respecto a las otras consideradas, por lo que una decisión de invertir en esta tecnología, requerirá estudios técnico-económicos muy detallados. Cabe señalar que el estudio, no estudio la recuperación de calor y posterior transformación en energía eléctrica, esto podría mejorar los indicadores económicos presentados.

Chile es un país minero y al tener las reservas de cobre más grandes del mundo, es estratégico tener una fundición de clase mundial, que trate nuestros concentrados y no aumente nuestras vulnerabilidades frente al mercado (TC/RC). El tener una fundición, podría proliferar en la producción de materiales y/o industrias derivados del cátodo (ver nano partículas u otros), como también nos podría desmarcar de la paradoja de la “maldición de los minerales”, la cual postula que frente a una alta concentración de recursos no renovables, se inhibe la creación de nuevas industrias intensivas en conocimiento / tecnología, generando una marcada tendencia a ser mono productores, lo cual a largo plazo, implica un menor crecimiento país.

Es importante destacar que una nueva fundición, permitirá superar largamente las cifras de fijación indicadas en el D28 o sus futuras modificaciones, dándole un giro a la mirada de la población hacia las actuales fundiciones. Cabe destacar que si en el corto o mediano plazo, las emisiones no se minimizan, cambiando la percepción de la población, las fundiciones con población circundante, podrían verse sujetas a procesos de cierre. Por otra parte, para las fundiciones que logren solucionar la

problemática del D28 inicial, en el mediano y largo plazo, inexorablemente esta normativa será más exigente.

RECOMENDACIONES:

- Para la realización de una nueva FURE, no sola la rentabilidad debe ser alta, sino que los estándares medio ambientales deben ser patrón en la industria. En el presente estudio, se muestra que esta actividad puede ser atractiva para los inversionistas y mejorable, al considerar créditos posibles de obtener a través de la generación de electricidad.
- Una nueva FURE debe poseer una alta productividad, capaz de procesar al menos 1.500 kta de concentrados, la cual, según este análisis, la mejor alternativa parece ser la que trabaje con tecnología doble Bottom Blowing con planta de flotación de escorias, siendo una fundición y refinación con tecnología moderna, de alta eficiencia metalúrgica.
- Hay que tener en cuenta que, con el tiempo, en Chile, las fundiciones se han ganado una mala reputación, por su gran daño al medio ambiente y a la salud de las personas. Por lo tanto, aunque se desee instalar una nueva FURE con altos estándares de control ambiental, capturando niveles de SO_2 y As superiores al 98%, encontrar un lugar en donde instalarla (preferentemente en el norte del país) será muy difícil, por la gran oposición ciudadana para su instalación. Lo que obligará a los dueños de esta fundición a invertir bastante dinero en una fuerte campaña comunicacional.
- Implementar una fundición puede ser vista de forma estratégica, ya que, podría haber una integración vertical hacia adelante, en donde se podría producir materias primas o productos finales asociados a la producción de cátodos, que serían vendidos a todo el mundo, además de disminuir nuestras vulnerabilidades al monopsonio incipiente en el tratamiento de concentrados.
- Por otra parte, ¿Por qué tenemos que comprar el producto final a otro país con precios más elevados y con nuestros propios recursos? Con esto, se generaría una mayor actividad económica en el

lugar que se instale esta fundición, ya sea por esta misma o bien por una nueva industria asociada. Se debe además considerar que se generará un mayor desarrollo económico para el país, lo que se traduce en una mayor recaudación fiscal.

- Para este estudio se consideró que el ácido sulfúrico producido se vende en su totalidad, es decir, se estudió con el criterio que habría mercado para vender el ácido sulfúrico producido, localmente. Pero, es necesario observar y estudiar el comportamiento del mercado del ácido sulfúrico, ya que, es muy probable que el mercado no sea el mismo, por la escasez de minerales oxidados y proyectos en los cuales se pueda utilizar este insumo.
- Es recomendable explorar en fases posteriores, la generación de energía eléctrica o de vapor para disminuir los costos de operación indicados, pudiendo mejorar los indicadores económicos mostrados y apalancar potenciales decisiones de inversión.
- Es importante destacar que este trabajo es una oportunidad de negocio, desarrollada a un nivel preliminar o de perfil, pero que requiere estudios posteriores de ingeniería para confirmar la alternativa BBR-BBC-PFE, como un real caso de negocio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa JRI Ingeniería por su constante orientación y apoyo.

REFERENCIAS

- [1] AGUILAR, Julio A. Metalurgia extractiva del cobre (Pirometalurgia e hidrometalurgia). DOCPLAYER [en línea]. [s.f.]. [Fecha de consulta: 11 octubre 2019]. Disponible en: <https://docplayer.es/10212014-Metalurgia-extractiva-del-cobre-pirometalurgia-e-hidrometalurgia-julio-alberto-aguilar-schafer.html>
- [2] CASTILLO Dintrans, Emilio, CANTALLOPTS Araya, Jorge. COCHILCO. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Tecnologías en fundiciones de cobre [en línea]. Chile: COCHILCO, 2015. [Fecha de consulta: 25 octubre 2019]. Disponible en: https://www.cochilco.cl/Listado%20Tematico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf
- [3] China ENFI Engineering Corporation. SKS Copper Smelting Technology [PDF]. [s.l.]: China ENFI Engineering Corporation, [s.f.]. 48 p.

4. [4] CIFUENTES, Gerardo. Teoría y Práctica de la Electrometalurgia. Chile: 2012. Capítulo 6. Sistemas electroquímicos forzados. pp. 153-262.
5. [5] CORDERO, Francisco J. Metalurgia del cobre. SlidePlayer [en línea]. 2016. [Fecha de consulta: 15 octubre 2019]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/10615468/>
6. [6] Decreto 28. Establece norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico. Diario Oficial de la República de Chile. Santiago, 12 de diciembre de 2013.
7. [7] DEPARTAMENTO de ingeniería metalúrgica [en línea]. Chile: Universidad de Santiago de Chile, [s.f.]. Capítulo 13. Pirometalurgia del Cobre. [Fecha de consulta: 10 octubre 2019]. Disponible en: <https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo13.pdf>
8. [8] ECHEVERRÍA Izquierdo Montajes. Rueda Twin, Codelco: Nuevo sistema de moldeo. CONSTRUCCIÓN MINERA & Energía [en línea]. Junio 2013. [Fecha de consulta: 20 octubre 2019]. Disponible en: <https://www.construccionminera.cl/rueda-twin-codelco-nuevo-sistema-de-moldeo/#.Xwz4AChKjIU>
9. [9] FREDES, Andrea. Metalurgia extractiva del cobre [diapositivas]. [s.l.]: [s.e.], [s.f.]. 89 diapositivas, col. + texto.
10. [10] GONZÁLEZ Miranda, Francisco Javier. Análisis valor estratégico de las fundiciones chilenas. Memoria para optar al título de Magister en Gestión y Dirección de Empresas Versión Industria Minera. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2014. 79 p.
11. [11] GONZÁLEZ Miranda, Francisco Javier. Optimización de recursos hídricos, tratamiento y reutilización. Valparaíso: Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, 2007. 162 p.
12. [12] GONZÁLEZ, Noé. AHP: Un método para fortalecer la toma de decisiones en SST. Prevenblog [en línea]. Abril 2019. [Fecha de consulta: 12 noviembre 2019]. Disponible en: <https://prevenblog.com/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/>
13. [13] GUARDA Pfeffer, Nicolas Germán. Efecto del enfriamiento controlado en el consumo de energía y la recuperación de valiosos en el procesamiento de escorias de fusión de cobre. Tesis para optar al título de Ingeniero civil de minas y grado de Magíster en Metalurgia Extractiva. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015. 263 p.
14. [14] Información Centro de Documentación de JRI.
15. [15] MORENO, Ignacio. Subsecretario de Minería. Industria de Fundiciones de Cobre [en línea]. Santiago: 2016. [Fecha de consulta: 5 noviembre 2019]. Disponible en: <http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2017/proyectos/01105-01130.pdf>
16. [16] RAMÍREZ, Juan Pablo. ¿Cuál es la situación de las fundiciones en Chile? Minería Chilena [en línea]. Febrero 2019. [Fecha de consulta: 20 octubre 2019]. Disponible en: <https://www.mch.cl/reportajes/la-situacion-las-fundiciones-chile/>
17. [17] ROMÁN, Alejandro. Tecnología Flash Outotec. Minería Chilena [en línea]. Octubre 2010. [Fecha de consulta: 10 octubre 2019]. Disponible en: <https://www.mch.cl/reportajes/tecnologia-flash-outotec/>
18. [18] SCHLESINGER, Mark, KING, Matthew, SOLE, Kathryn, DAVENPORT, William. Extractive Metallurgy of Copper. 5^{ta} edición. Inglaterra: Elsevier, 2011. 455 p.
19. [19] TOSKANO Hurtado, Gerard Bruno. El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores: aplicación en la selección del proveedor para la Empresa Gráfica Comercial MyE S.R.L. [en línea]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Matemáticas, 2005. Capítulo 3. Proceso de análisis Jerárquico (AHP). [Fecha de consulta: 10 noviembre 2019]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basis/toskano_hg/cap3.PDF
20. [20] U.S. Department of Labor Bureau of Labor Statistic. US inflation calculator [en línea]. [Fecha de consulta: 6 enero 2020]. Disponible en: <https://www.usinflationcalculator.com/inflation/consumer-price-index-and-annual-percent-changes-from-1913-to-2008/>
21. [21] VOCES Mineras. Fundiciones: vías de solución frente a sus múltiples desafíos. Voces Mineras [en línea]. Julio 2019. [Fecha de consulta: 5 octubre 2019]. Disponible en: <https://vmm.cl/fundiciones-vias-de-solucion-frente-a-sus-multiples-desafios/>
22. [22] Voces Mineras. Hacia una Política Nacional de Fundiciones; Resumen de Conclusiones y Propuestas. Voces Mineras [en línea]. Agosto 2018. [Fecha de consulta: 5 octubre 2019]. Disponible en: <https://vmm.cl/hacia-una-politica-nacional-de-fundiciones-resumen-de-conclusiones-y-propuestas/>
23. [23] WANG, Qin-meng, GUO, Xue-yi, TIAN, Qinghua. Copper smelting mechanism in oxygen bottom-blown Furnace [en línea]. China: Elsevier, 2017. [Fecha de consulta: 11 octubre 2019]. Disponible en: http://www.ysxbcn.com/down/2017/04_en/27-p0946.pdf
24. glosario
25. FURE: Fusión y Refinería.
26. FODA: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.
27. AHP: Analytic Hierarchy Process, o en español, denominado análisis jerárquico.
28. PRRC: Precipitado Refinería Rico en Cobre.
29. PRD: Precipitado Refinería Descubrizado.
30. BAD: Barro Anódico Descubrizado. Es lo mismo que PRD.
31. PMN: Planta Metales Nobles.
32. HELE: Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias.
33. HLE: Horno de limpieza de Escorias.
34. PFE: Planta de Flotación de Escorias.
35. HA: Horno Anódico.
36. PA: Planta de Ácido Sulfúrico.
37. CT: Convertidor Teniente.
38. CPS: Convertidor Peirce Smith.
39. ISA: Horno Isasmelt.
40. FSF: Fusion smelting Flash, horno de Fusión Flash.
41. BBR: Bottom Blowing Reactor, horno de fusión de soplado de fondo.
42. S-Furnace: Horno de fusión de la alternativa MITSUBISHI.

46. C-Furnace: Horno de conversión de la alternativa MITSUBISHI.
47. FCF: Fusion Converting Flash, horno de Conversión Flash.
48. BBC: Bottom Blowing Converter. Horno de conversión de soplado de fondo.