

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Dr. Roberto Parra Figueroa

ESTUDIO TÉCNICO - ECONÓMICO PARA UN PROCESO “ZERO WASTE” EN EL PROCESAMIENTO DE ESCORIAS DE COBRE PARA LA PRODUCCIÓN DE ARRABIO Y CEMENTO PORTLAND



CLAUDIA VERÓNICA SALINAS CANDIA

Informe de Memoria de Título
para optar al título de

Ingeniera Civil Metalúrgica

Abril 2020

Agradecimientos

Al Dios de toda gracia sea la gloria y honra y por medio de El agradezco a quienes fueron parte importante de mi proceso formativo. Mis padres Luis y Verónica que estuvieron orando incansablemente para que sus logros fueran el piso de los míos. A mi hermanito quien con su pasión por la tecnología informática creo un programa que colaboró al desarrollo de mi tesis. A mi familia que con paciencia percibieron este proceso. Mi madrina quien me acogió cuando lo necesite y dispuso de su hogar mientras realizaba mi práctica profesional. Mi comunidad de fe (1° Iglesia Metodista de Coronel) quien me respaldó y afirmó en el camino. Mis ángeles, el primero Daniel que fue mi complemento y sumo color a mi vida y el segundo mi tío Hugo que cayó literalmente del cielo e hizo redimir la forma en que veía mi carrera. Un tremendo profesional, mi profesor guía Roberto Parra quien siempre fue un aporte y velo por mi seguridad en los tiempos de crisis social. Ricardo Ponce mi jefe en ENAMI quien tuvo la voluntad de guiarme y ayudarme siempre que se lo pedí. A los auxiliares del Tecnológico Mecánico que con su mayor generosidad siempre me brindaron un saludo amable. A la unidad de salud de la DISE especialmente a cada uno de los genios que me atendieron. A mis amigas de la vida. A mis compañeros de carrera que se dieron el tiempo de conocerme. Al cuerpo docente y administrativo del DIMET. Finalmente, a Filippo por su compañía. GRACIAS.

Resumen

Este estudio es una propuesta orientada a mejorar la competitividad de las fundiciones chilenas, donde existe un desafío perentorio de optimizar integralmente la cadena de fundición y refinación. La propuesta se basa en incorporar, con este fin, los conceptos de economía circular para una industria sin residuos.

El proyecto tiene como objetivo definir las condiciones operacionales y la viabilidad técnica para un proceso “Zero Waste”, en el cual se utilizarán escorias de cobre para producir arrabio considerando la reducción del FeO_x y la escorificación del SiO_2 , principales componentes de las escorias de descarte de la producción primaria de cobre a partir de concentrados. La escoria generada a partir de la escorificación de la SiO_2 pasa a una etapa de ajuste químico para formar un residuo comercializable, en este caso cemento Portland o un aditivo del mismo.

Los resultados obtenidos son promisorios para avanzar en el análisis de este nuevo concepto ecológico, disminuyendo índices de contaminación por emanación de CO_2 , promoviendo el desarrollo de un encadenamiento productivo y responder particularmente a la demanda creciente a nivel nacional de cemento. Al mismo tiempo se identifican sinergias con las mismas acerías que comprarían el arrabio, usando sus escorias como fundentes para la etapa de reducción o componentes del cemento Portland.

Abstract

This study is a proposal to improve the competitiveness of Chilean smelters that have a peremptory challenge to fully optimize their operations. The proposal is based on this purpose by the concepts of the circular economy for an industry without wastes.

The project aims to define the operational conditions and technical feasibility for a “Zero Waste” process, in which copper slags will be used to produce pig iron considering the reduction of FeO_x and the slagging of SiO_2 , main components of waste slag of primary copper production from concentrates. The slag generated from the slagging of the SiO_2 goes through a chemical adjustment stage to form a marketable residue, in this case, Portland cement or an additive thereof.

The results obtained are promising to advance in the analysis of this new ecological concept, reducing pollution rates due to the emission of CO_2 , promoting the development of a production chain and particularly responding to the growing demand at the national level for cement. At the same time, it identifies synergies with the same mini-mills that would buy the pig iron, using its slags as fluxes for the reduction stage or as components of Portland cement.



Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Generalidades.....	1
1.2.	Objetivos.....	3
1.2.1.	Objetivo General	3
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	3
2.	Marco Teórico y revisión bibliográfica.....	4
2.1.	Valorización de escorias	4
2.2.	Procesos y físico química de la reducción de FeO_x para la producción de Fe y cinética de reducción del FeO_x	7
2.3.	Normativa y reglamentación nacional sobre escorias y residuos	10
2.3.1.	Escorias.....	10
2.3.2.	Clinker.....	12
2.4.	Reactores	14
2.4.1.	Alto horno.....	15
2.4.1.1.	Partes de un alto horno.....	15
2.4.2.	Horno de Arco Eléctrico	16
2.4.2.1.	Partes del horno eléctrico	16
2.4.3.	Horno tipo COREX	17
2.4.3.1.	Proceso COREX.....	18
3.	Descripción del proceso “Zero waste” en desarrollo	19
3.1.	Composición Escoria de cobre.....	20
3.2.	Composición Escoria de acería	21
3.2.1.	Composición de escorias de acería de la empresa AZA	21
3.3.	Cemento Portland y su composición	22
3.4.	Reductores y Fundentes	23
3.4.1.	Reductores	23
3.4.2.	Fundentes.....	23
3.5.	Balance de materia y energía	28
3.5.1.	Balance de Masa.....	29
3.5.1.1.	Balance de masa escoria de cobre	29
3.5.1.2.	Balance de masa, mezcla de escoria de cobre y hierro.	30
3.5.2.	Balance de Energía	32
3.5.2.1.	Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente	32
3.5.2.2.	Caso B: Escoria de cobre con fundente.....	33
3.5.2.3.	Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente	33

3.5.2.4. Caso D: Escoria de cobre y hierro con fundentes	34
3.6. Resumen de parámetros de proceso para las alternativas propuestas	36
4. Estudio Técnico Económico	38
4.1. Antecedentes generales de las fundiciones en Chile	38
4.1.1. Fundición Hernán Videla Lira	40
4.1.2. Fundición Ventanas	42
4.2. Escenarios Técnicos	44
4.2.1. Producción de Aditivo Portland	44
4.2.1.1. Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente	44
4.2.1.2. Caso B: Escoria de cobre con fundente	45
4.2.1.3. Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente	45
4.2.1.4. Caso D: Escoria de cobre y hierro con fundentes	46
4.2.2. Producción de Cemento Portland	46
4.2.2.1. Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente	47
4.2.2.2. Caso B: Escoria de cobre con fundente	47
4.2.2.3. Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente	48
4.2.2.4. Caso D: Escorias de Cobre y Hierro con fundente	49
4.3. Industria del cemento	49
4.3.1. Panorama internacional de la industria del cemento	50
4.3.1.1. Clinker de cemento portland	52
4.3.2. Panorama Latinoamericano de la industria del cemento	53
4.3.3. Panorama nacional de la industria del cemento	55
4.4. Mercado del Arrabio	56
4.5. Estimación OPEX para el proceso	58
4.5.1. Costos Operacionales	58
4.5.2. Gastos Administrativos	59
4.5.3. Consumo energético	60
4.5.4. Transporte de escorias de la empresa Aza	61
4.6. Estimación CAPEX para el proceso	61
4.6.1. Costo de equipos	62
4.6.2. Costos de Inversión	63
4.7. Modelo de negocios	64
4.7.1. Flujos de caja	65
4.7.1.1. Flujos de cajas producción Aditivo de Cemento Portland	65
4.7.1.2. Flujos de cajas producción Cemento Portland	67
4.7.2. Resultado financiero	70
5. Resultados y Discusiones	71

6. Conclusiones y Recomendaciones	72
7. Biografía	73
Anexos	80
A. Comparación de la rapidez de reducción de FeO y condiciones experimentales	80
B. Patentes relacionadas con el proyecto	82
C. Coque	83
D. Estimación de Costos de inversión	84
E. Cal	84
F. Potencia del horno eléctrico	85
G. Estimación de costo y capacidad del Horno Eléctrico	85
H. Transporte de escorias de acería	86
I. Resumen de costos de insumos	87
J. Escoria Granallada	88



Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del proceso (Elaboración propia).....	2
Figura 2. Proceso convencional de fundiciones de cobre y proceso con tratamiento secundario de escorias (Elaboración propia).....	4
Figura 3. Hoja de Ruta FICEM, hacia una economía baja en carbono	13
Figura 4. Alto Horno ^[81]	16
Figura 5. Horno Eléctrico ^[82]	17
Figura 6. Esquema del proceso COREX (Cuba de reducción y Unidad de fusión y gasificación) ^[83] ..	18
Figura 7. Composición inicial de la escoria primaria de Cobre $T_f = 1500^\circ\text{C}$ (Elaboración propia).	25
Figura 8. Composición adaptada para obtener escoria secundaria $T_f = 1400^\circ\text{C}$, correspondiente al “Caso A” (Elaboración propia).....	25
Figura 9. Composición adaptada para obtener escoria secundaria $T_f = 1400^\circ\text{C}$ correspondiente al “Caso B” (Elaboración propia).....	26
Figura 10. Composición escoria acería de hierro Gerdau Aza (Elaboración propia).	27
Figura 11. Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente $T_f = 1380^\circ\text{C}$, correspondiente al “Caso C” (Elaboración propia).	27
Figura 12. Escoria de cobre y hierro con fundentes. $T_f = 1400^\circ\text{C}$, correspondiente al “caso D” (Elaboración propia).....	28
Figura 13. Comparación entre escorias y la composición del cemento ^[67]	29
Figura 14. Diagrama de procesos fundición Hernán Videla Lira ^[69]	41
Figura 15. Diagrama de bloques de procesos FHVL ^[69]	41
Figura 16. Diagrama de procesos fundición Ventana ^[71]	43
Figura 17. Diagrama de procesos Caso A, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).	45
Figura 18. Diagrama de procesos Caso B, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).	45
Figura 19. Diagrama de procesos Caso C, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).	46
Figura 20. Diagrama de procesos Caso D, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).	46
Figura 21. Diagrama de procesos Caso A, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).	47
Figura 22. Diagrama de procesos Caso B, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).	48
Figura 23. Diagrama de procesos Caso C, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).	48

Figura 24. Diagrama de procesos Caso D, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia)	49
Figura 25. Consumo y Producción de Cemento y PIB del Mundo (2006 - 2018) ^[73]	50
Figura 26. Exportadores de arrabio a nivel mundial ^[77]	56
Figura 27. Importadores de arrabio a nivel mundial ^[77]	57
Figura 28. Modelo económico de casos a evaluar (Elaboración Propia)	64
Figura 30. Estimación de la potencia del Horno eléctrico.....	85
Figura 31. Descripción de camiones, para traslado de escorias de acería ^[83]	87



Índice de Tablas

Tabla 1. Interacciones en las interfaces durante la reducción directa de escorias de cobre.	9
Tabla 2. Composición Química del Clinker (% en masa) ^[60]	12
Tabla 3. Principales indicadores y trayectorias del Road Map CSI 2018 a nivel mundial (Cement sustainability Initiative).	14
Tabla 4. Composición química de las escorias industriales de cobre ^[63]	20
Tabla 5. Composición química de las escorias de producción de acero en una mini mills ^[64]	21
Tabla 6. Composición de Escorias de hierro en Gerdau Aza ^[65]	22
Tabla 7. Composición química del cemento Portland ^[66]	23
Tabla 8. Balance de Masa escoria de cobre	30
Tabla 9. Balance de escorias de cobre y hierro.	31
Tabla 10. Balance de Energía Caso A.....	32
Tabla 11. Balance de Energía Caso B.....	33
Tabla 12. Balance de Energía Caso C.....	34
Tabla 13. Balance de Energía Caso D.....	35
Tabla 14. Resumen de parámetros en el proceso de producción de aditivo Portland.....	36
Tabla 15. Resumen de parámetros en el proceso de producción de cemento Portland	37
Tabla 16. Margen Bruto del negocio de fundiciones a nivel mundial 2017 ^[68]	38
Tabla 17. Residuos masivos mineros período 2015 - 2017 por faena en ENAMI ^[70]	42
Tabla 18. Generación de residuos mineros masivos 2018 (miles de toneladas) CODELCO ^[72]	43
Tabla 19. Ranking de Consumo de Cemento (en Millones de Toneladas) ^[73]	51
Tabla 20. Ranking de Producción de Cemento (en Millones de Toneladas) ^[73]	51
Tabla 21. Exportación de cemento y Clinker ^[73]	52
Tabla 22. Importación de cemento y Clinker ^[73]	53
Tabla 23. Producción de cemento en Latinoamérica (miles de toneladas) ^[74]	53
Tabla 24. Consumo de cemento en Latinoamérica (miles de toneladas) ^[74]	54
Tabla 25. Utilidades e ingresos de las principales Cementeras de Chile entre los periodos 2017 y 2018. ^[75]	55
Tabla 26. Producción Chilena de cemento y Clinker. ^[76]	56
Tabla 27. Exportación e importación de arrabio ^[78]	57
Tabla 28. Ingresos y Egresos Operacionales para la producción de aditivo de Cemento Portland (en dólares).....	58
Tabla 29. Ingresos y Egresos Operacionales para la producción de Cemento Portland (en dólares)	59
Tabla 30. Gastos administrativos	60
Tabla 31. Consumo energético para la producción de aditivo de cemento Portland	60
Tabla 32. Consumo energético para la producción de cemento Portland	61
Tabla 33. Transporte de escorias de acería.....	61

Tabla 34. Costos de equipos para la producción de aditivo de cemento Portland	62
Tabla 35. Costos de equipos para la producción de Cemento Portland	62
Tabla 36. Costos de inversión para Aditivo Portland	63
Tabla 37. Costos de inversión para Cemento Portland.....	63
Tabla 38. Flujo de caja caso A para la producción de Aditivo de cemento Portland	66
Tabla 39. Flujo de caja caso B para la producción de Aditivo de cemento Portland	66
Tabla 40. Flujo de caja caso C para la producción de Aditivo de cemento Portland	67
Tabla 41. Flujo de caja caso D para la producción de Aditivo de cemento Portland	67
Tabla 42. Flujo de caja caso A para la producción Cemento Portland	68
Tabla 43. Flujo de caja caso B para la producción Cemento Portland	68
Tabla 44. Flujo de caja caso C para la producción Cemento Portland	69
Tabla 45. Flujo de caja caso D para la producción Cemento Portland.....	69
Tabla 46. Índices de rentabilidad para producción de aditivo Portland.	70
Tabla 47. Índices de rentabilidad para la producción Cemento Portland	70
Tabla 48. Velocidad de reacción del FeOx.....	80
Tabla 49. Parámetros técnicos y económicos de cada carbón coque.	83
Tabla 50. Precios internacionales del carbón coque. ^[78]	83
Tabla 51. Estimación de costos de inversión	84
Tabla 52. Estimación de costos Horno Eléctrico.	86
Tabla 53. Resumen de costos de insumos ^[78]	87



Nomenclatura

°C: Grados Celsius.

T: Temperatura.

m: Metros.

m³: metros cúbicos

ton: toneladas

%p: Porcentaje en peso.

kg: Kilogramo.

H: Entalpía.

c/lb Cu: Centavo por cada libra de cobre.

USD/Ton: Dólar por cada tonelada.

PM: Peso Molecular

Kmol: Kilo mol

KWh: Kilo watts hora



1. Introducción

1.1. Generalidades

Los desafíos científicos y tecnológicos asociados a la valorización de pasivos ambientales para convertirlos en productos útiles de uso masivo representan un tema relevante para el desarrollo de proyectos enfocados en potenciar el concepto de economía circular. Este estudio, parte de un proyecto más amplio que asociará a diferentes actores nacionales e internacionales, busca aportar en este enfoque y asociar la producción de escorias de cobre en el proceso de tratamiento de concentrado con la generación de insumos para la industria siderúrgica y muy posiblemente también productos de valor para las cementeras. En efecto, este proyecto busca específicamente proponer una tecnología a ser integrada en los procesos piro-metalúrgicos de producción primaria de cobre. Se analizarán fundamentos físico-químicos y económicos para tratar la escoria de descarte de una fundición de cobre para producir arrabio y un producto de valor para la industria cementera.

Este concepto tecnológico presenta desafíos importantes. La escoria final de una fundición de cobre representa la materia prima para el proceso y éste es un material complejo. La transformación propuesta involucra fenómenos difíciles de estudiar en forma experimental pues estos ocurren bajo condiciones extremas, con temperaturas muy superiores a 1300 °C. De esto surge la necesidad de plantear un diseño de proceso adecuado basado en el conocimiento de la fisicoquímica de alta temperatura tomando diferente información bibliográfica antes de pasar a un diseño de validación experimental.

Este proceso se espera que impacte positivamente en la competitividad de las fundiciones chilenas al transformar la escoria (actualmente un pasivo ambiental) en dos productos comerciales, y ambos de uso masivo: arrabio y aditivos para la industria del cemento o directamente Cemento Portland. La Figura 1 muestra un esquema del proceso con sus etapas las cuales serán descritas y analizadas en este documento. A partir de este análisis se propondrá un diseño y evaluación técnico- económica.

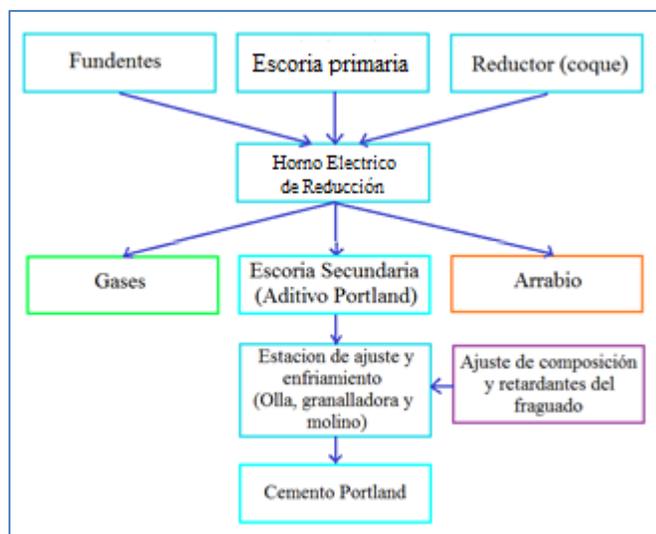


Figura 1. Diagrama del proceso (Elaboración propia).

La revisión del estado del arte muestra una considerable y detallada información sobre la reducción del FeO_x . Se ha establecido que el rendimiento del proceso de reducción y la rapidez con la que se lleve a cabo dependerán fuertemente de las condiciones bajo las cuales se conduzca el proceso y es por esto que en un diseño experimental debe contemplar el uso de distintos agentes reductores (C , CO y CH_4), estudiando primero la reducción en escorias sintéticas preparadas en laboratorio, para que de manera controlada se determine cuál de ellos conduce los mejores resultados. Este conocimiento será extendido al uso de escorias de cobre de descarte industriales para que sea posible elaborar un modelo técnico y evaluar de manera más precisa su potencial aplicación a escala industrial.

En este estudio se recurrirá al uso de softwares termodinámicos (HSC 6.0, Factsage®) para explorar teóricamente las opciones operacionales para que la reducción se lleve a cabo de manera efectiva, es decir, que se separe la fase metálica (arrabio) y la escoria secundaria generada como resultado del proceso (aditivo para cemento Portland). Las condiciones operacionales que se establezcan teóricamente estarán sujetas a la generación de una “escoria” fundida que cuya composición permita ser utilizada posteriormente como aditivo para la elaboración de cemento Portland, así como obtener una fase metálica de hierro de pureza suficiente para ser utilizado como materia prima en procesos productivos del acero, objetivo central de esta propuesta de proceso.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Definir la viabilidad técnica y condiciones operacionales para un proceso de producción de arrabio a partir de las escorias de descarte que considera la reducción del FeO_x disuelto en la escoria y la escorificación del SiO_2 para producir un aditivo para cementos Portland, o materia prima para el cemento en forma directa. Esta información permitirá realizar una evaluación técnico- económica preliminar.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar un modelo de balance de masa y energía para el proceso de reducción.
- Determinar composición objetivo a obtener que cumpla con los requerimientos para ser la base producción de cemento Portland y las condiciones fisicoquímicas para su obtención.
- Elaborar un modelo técnico económico para evaluar potencialidades de aplicación del proceso en desarrollo.

2. Marco Teórico y revisión bibliográfica

2.1. Valorización de escorias

En la actualidad, existe la tendencia global para que industrias de transformación (manufactureras) operen bajo un régimen sin residuos o “Zero Waste Industry”. Respecto de la industria extractiva de metales, ésta genera residuos tales como relaves, ripsos de lixiviación y escorias de fundición, los cuales son desechados confinándolos en terrenos cercanos a la operación de la planta en donde fueron generados. La Figura 2 muestra un resumen de los principales esquemas productivos asociados a la generación de pasivos en el procesamiento de concentrados de cobre por la vía piro metalúrgica.

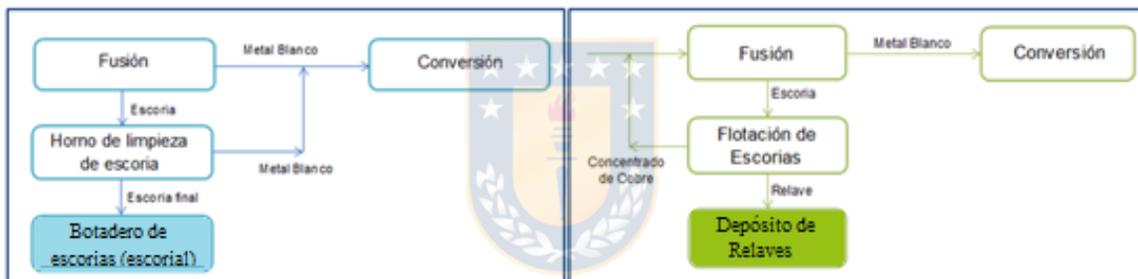


Figura 2. Proceso convencional de fundiciones de cobre y proceso con tratamiento secundario de escorias (Elaboración propia).

Durante muchos años las escorias han sido objeto de constante investigación con el fin de ser tratadas y/o utilizadas, basándose principalmente en los siguientes conceptos:

- Las escorias de descarte contienen una cantidad considerable de metales valiosos que pueden ser recuperados mediante procesos físicos y químicos adecuados.
- Para algunas aplicaciones de obras civiles, las escorias poseen propiedades mecánicas similares o mejores que los materiales a los cuales se quiere reemplazar.
- Algunas escorias contienen cantidades significativas de especies químicas consideradas peligrosas y su eventual liberación representa un daño potencial al ambiente.

En la industria siderúrgica las escorias han sido utilizadas para distintos fines, transformándose en una actividad altamente redituable. En el año 2000, se estima que en los Estados Unidos fueron utilizadas 14 millones de toneladas de escorias ferrosas, principalmente en la industria de la construcción ^[4].

En Chile, las escorias provenientes de las fundiciones de cobre son las más relevantes. Se sabe que entre el 80% y 90% del cobre producido se da como resultado del tratamiento Piro metalúrgico de concentrados sulfurados de cobre y se estima que por cada tonelada de cobre metálico que se produce, se generan 2.2 toneladas de escoria ^[5-8], lo que representa una producción anual de 30 millones de toneladas de este residuo a nivel mundial, de las cuales 3.3 millones se producen en Chile ^[9]. En contraste con lo que se presentó respecto de la industria siderúrgica, la utilización de las escorias de cobre aún es una actividad incipiente y la mayor parte es descargada y almacenada en botaderos. Tomando en cuenta que una escoria típica de cobre contiene entre 25 y 50% de Fe ^[1, 5, 7, 10- 21] (el resto compuesta por SiO₂, Al₂O₃, Cu y otros elementos menores), se han propuesto diversas tecnologías para extraer el hierro y otros metales valiosos como Mo, Ni y Co con el fin de mejorar la competitividad de las fundiciones nacionales e intentar tener la menor cantidad de residuos ^[22-27].

La flotación de escorias de cobre se basa en los mismos principios que la flotación de las menas sulfuradas de cobre. Esto implica que solo el cobre metálico y los minerales sulfurados pueden ser flotados de manera efectiva y no es aplicable para la recuperación de elementos que se encuentran en su forma oxidada como Co, Ni y Fe, además de una fracción del Cu que también está oxidada ^[1].

En lixiviación de escorias de cobre, los agentes lixiviantes tradicionales empleados han sido el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, cloruro férrico, amoníaco y cianuro (prácticamente en desuso), entre otros. Para incrementar la eficiencia de lixiviación, se ha recurrido a prácticas como la adición de H₂O₂ (tratamiento de escorias de latón), lixiviación a presión (escorias de convertidor de Cu) y en sistemas Cl₂/Cl⁻ (escorias de hornos flash y de hornos de reverbero) ^[1]. La lixiviación directa está asociada a un elevado consumo de ácido, con una alta disolución de hierro y co-disolución de silicatos, dificultando el tratamiento posterior de las soluciones ^[27]. Se ha identificado también que, la recuperación de Mo desde las escorias de cobre resulta prácticamente imposible debido a que forma compuestos oxidados tipo espinela, los cuales resultan fuertemente insolubles. Para

solucionar esto, se ha propuesto un proceso adicional de tostación oxidativa para promover la disolución de cobre y molibdeno e inhibir la disolución de hierro y sílice (debido a la conversión de la fayalita en hematita y sílice libre los cuales permanecen en el residuo sólido) ^[24, 26, 27]. De manera general los procesos hidrometalúrgicos para el procesamiento de escorias se hace inviable y a la fecha no hay propuestas que hayan madurado.

También se ha estudiado la recuperación de hierro y remoción de elementos peligrosos de una escoria de cobre mediante un método de reducción aluminotérmica. Como resultado del estudio, se logró establecer una relación Al/FeO que condujo a la recuperación máxima de Fe adecuado para ser utilizado como materia prima en la producción de acero. La escoria secundaria producida a partir de este proceso fue caracterizada identificando la presencia de espinela ($MgO \cdot Al_2O_3$) y olivina ($MgO \cdot SiO_2$) que podría ser utilizada para la producción de nuevos materiales funcionales. Bajo las condiciones a las que se llevó el estudio, los investigadores reportaron una alta volatilización de los elementos peligrosos (70-99%) ^[19].

En años recientes, se han publicado un número importante de trabajos relacionados con la reducción directa de escorias de cobre para recuperar hierro metálico combinando el proceso con etapas de separación magnética ^[5, 7, 9, 16, 21]. Se propone el uso de carbón y coque como agente reductor además de aditivos que promueven la migración de partículas de hierro hacia la fase metálica y disminuye la energía de activación de las reacciones de reducción. En todos ellos se describe al producto metálico como adecuado para ser utilizado para producir acero, sin embargo en ninguno se identifica algún uso para la SiO_2 asociada a la escoria inicial ni a posibles escorias secundarias generadas. Adicional a esto, otra importante característica diferenciadora del proceso en estudio es el uso de la escoria fundida y no el tratamiento de escorias de descarte.

A partir del año 2004 en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción (DIMET) se desarrolló un extenso estudio del cual se han publicado una serie de artículos relacionados con la reducción de escorias de cobre con el fin de recuperar hierro y otros elementos menores ^[12, 14, 18, 20, 22- 28]. La tecnología propuesta se basa en la reducción directa de la fayalita contenida en la escoria fundida mediante carbón y ajustando la composición de la escoria que se genera para que esta permanezca fundida a la temperatura de operación. En los estudios se sugiere que el carbón debe ser alimentado en exceso para lograr recuperaciones de hierro adecuadas ^[12]. Determinó que se requería llevar a cabo la reducción de escorias en dos etapas: una

relacionada con la recuperación de cobre y otra para reducir los óxidos de hierro, para garantizar la producción de hierro con bajo contenido de cobre.

Como parte inicial de este estudio, se realizó una extensa búsqueda de procesos sujetos a protección intelectual relacionados con la producción de arrabio desde escorias metalúrgicas, similares a las que se propone en el actual proyecto. Las bases de datos de patentes y resultados de procesos y conocimientos protegidos se listan en el Anexo B. Las bases de datos consultadas fueron: Inapi, Organización mundial de propiedad intelectual (WIPO), oficina europea de patentes (EPO), Free Patents online, Patent Storm, Google Patents y en la Base de datos de Patentes de los Estados Unidos (UPSTO).

El concepto, conocimiento y tecnología que se pretende desarrollar como resultado de este proyecto aún no han sido registrados, por lo tanto, el “Estudio técnico-económico para un proceso “Zero Waste” en el procesamiento de escorias de cobre para la producción de arrabio” se puede considerar como una investigación científica tecnológica original.



2.2. Procesos y físico química de la reducción de FeO_x para la producción de Fe y cinética de reducción del FeO_x

La propuesta tecnológica en estudio se basa en la reducción directa de escorias de cobre fundidas mediante agentes reductores, por ejemplo, carbón sólido o coque. Conforme proceda el proceso de reducción en el sistema se formarán dos fases fundidas, una fase de escoria secundaria representada por el sistema $\text{FeO}_x \cdot \text{SiO}_2$ y otros óxidos menores (Al_2O_3 , CaO , MgO , etc.) que estará en contacto con una fase metálica compuesta principalmente por Fe que se saturará en C (arrabio).

Las reacciones de reducción que se llevarán a cabo durante el proceso son:

- Reacciones sólido-líquido o reducción directa



- Reacciones gas-líquido o reducción indirecta



que se acopla con la reacción de Boudouard,



- Reducción de FeO_x con C disuelto en Fe líquido,



la cual ocurre en la interfase escoria-metal.

La producción de gas CO y CO_2 en el sistema causa la espumación de la escoria y su volumen dependerá de la cantidad de gas que se genere. El fenómeno de espumación es muy importante para el análisis de la fusión reductora pues como resultado el sistema estará compuesto de tres zonas importantes: el baño metálico, una zona de escoria densa y la zona de espuma ^[29-30]. La forma en que se establecen los límites de las dos últimas es un aspecto poco entendido y se encuentra aún bajo discusión en la literatura. Asimismo, la espuma tiene efectos considerables sobre la dinámica del proceso de reducción. Desde el punto de vista químico, una buena parte de las reacciones se llevan a cabo directamente en la espuma (reducción indirecta); incluso la espuma funciona como una barrera química para evitar la re-oxidación de la fase metálica y como una barrera térmica que evita el enfriamiento del sistema ^[29-30].

Dado que el presente trabajo pretende establecer las condiciones operacionales que permitan generar adecuadamente arrabio a partir de la reducción directa de escorias fundidas de cobre, es necesario llevar a cabo un estudio cinético para investigar la rapidez específica con la que se llevan a cabo las reacciones de reducción, así como la caracterización de la espuma asociada a esta escoria. A continuación, se presentan los fundamentos teóricos y experimentales en los que se basarán, en un principio, estos estudios que, si bien no se abordarán en este análisis, permitirán establecer las condiciones en las cuales el proceso operará.

Durante la reducción de FeO_x , las interacciones entre las fases presentes en el sistema se vuelven complejas dado que es un sistema que evoluciona fuertemente con el tiempo, no solo respecto de la composición sino también en el número de fases que se forman. Al inicio, existe solo una interfase, es decir, solamente existe la interacción entre el carbón y la escoria, pero a medida que procede el proceso de reducción aparecen dos fases adicionales, la fase gaseosa y la fase metálica, además de las dos anteriores, lo que significa seis posibles interacciones asociadas en

los seis procesos químicos distintos que se describen en la Tabla 1, considerando que el proceso se opere en forma batch.

Tabla 1. Interacciones en las interfaces durante la reducción directa de escorias de cobre.

Interfase	Fenómeno de interfase	Especie transferida
Escoria-gas	Reducción indirecta	O
Escoria-metal	Reducción de FeO por C disuelto	Fe
Gas-metal	Reacción de O disuelto en el metal	O
Gas-carbón	Reacción de Boudouard	O
Escoria-carbón	Reducción directa	Fe O
Metal-carbón	Disolución de C en el Fe	C

La determinación de cada contribución permitiría cuantificar el flujo total de cada una de las especies. Sin embargo, dado el comportamiento dinámico del sistema, la cuantificación de todas estas contribuciones es una tarea casi imposible de realizar. A pesar de las dificultades intrínsecas del sistema, en algunos estudios ha sido posible analizar la cinética global o macro cinética, representada por $J_{\text{FeO},t}$ (en términos de la tasa específica de moles de FeO reducidos por unidad de área y unidad de tiempo, $\text{mol FeO}/\text{mm}^2 \text{ s}$) con el fin de determinar cuáles podrían ser las etapas limitantes durante la reducción. Estos datos contribuirán a la concepción y al diseño de los reactores en donde se lleve a cabo el proceso de reducción de escorias de cobre, pues al determinar las etapas controlantes de la cinética global y su relación con las condiciones fisicoquímicas del sistema se podrá determinar el tiempo para procesar una determinada cantidad de escoria y el dimensionamiento de la planta completa. Esta información es relevante para el diseño del reactor y llegar a tener un control más eficaz del proceso cuando éste opere.

En cada interfase, la rapidez, $j_{hk}(i,t)$, puede estar gobernada por alguna de las tres etapas siguientes (donde j representa el flujo molar de la especie i , h y k representan interfaces del sistema y t el tiempo). Esta formulación propone que las etapas de control del proceso pueden ser las siguientes:

- El transporte de masa en la fase gaseosa.
- Transporte de masa en el líquido.
- Una de las reacciones químicas: reducción directa, reducción indirecta o la reacción de Boudouard.

Los estudios encontrados en la literatura muestran diferentes conclusiones sobre este tema, sin que haya un consenso en la etapa controlante que realmente determina la reducción del FeO_x disuelto en una escoria. En el Anexo A del presente trabajo se presenta una tabla comparativa de las velocidades específicas de reducción de FeO_x reportadas por diversos autores. Los resultados mostrados en el Anexo A muestran una dispersión relativamente grande de la tasa de reducción de FeO por $\langle C \rangle$, sin embargo se puede precisar que se alcanzó una rapidez máxima de reducción del orden de 10^{-6} ($\text{mol FeO}/\text{mm}^2 \text{ s}$) y dependiendo de la composición del baño y las condiciones experimentales, esta tasa se sitúa entre 10^{-7} y 10^{-8} . La revisión bibliográfica sobre este tema muestra que dependerá de la composición del líquido, de las características del agente reductor y sobre todo de las condiciones experimentales más que de las condiciones intrínsecas de la reducción. Además, de acuerdo a los estudios consultados, el principal mecanismo de control se relaciona con el transporte en la fase escoria o con el transporte en la fase gaseosa.

2.3. Normativa y reglamentación nacional sobre escorias y residuos

2.3.1. Escorias

Las escorias generadas durante la operación de las fundiciones de cobre son consideradas como pasivos ambientales, pues de acuerdo a la definición establecida por SERNAGEOMIN, estos pasivos incluyen los residuos que se producen como resultado de la actividad minera. Siendo las fundiciones una operación asociada a la minería las escorias caen entonces en esta definición que puede al menos ser cuestionada si se plantea que las fundiciones de cobre no son el último eslabón de las operaciones mineras sino que el primero de la manufactura. En este contexto, en Chile no

existen normativas específicas que regulen el tratamiento y la disposición de las escorias de fundición, sino que se aplica la definición del SERNAGEOMIN.

Por otro lado, se ha observado un endurecimiento de las normas que rigen la actividad minera y de operaciones extractivas asociadas a la producción de metales. Esta condición claramente indica que estos residuos pudieran verse afectados por normativas similares a las que rigen otros pasivos ambientales mineros como son los relaves o las que rigen el cierre de faenas mineras. Dichas normas serían: la ley 19.300 de las Bases Generales del Medio Ambiente y que en el decreto 95 establece el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental; decreto 132 sobre el Reglamento de Seguridad Minera, decreto 248 sobre el Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves y la Ley 20.551 que Regula el cierre y las instalaciones de Faenas Mineras ^[79]. A nivel internacional, las escorias han sido excluidas de la lista de residuos peligrosos, incluso, la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (USEPA) estableció las bases para que las escorias fueran finalmente clasificadas como residuos No Peligrosos ^[11]. De igual forma, diferentes asociaciones industriales en Estados Unidos, Europa y Japón han definido las escorias como un co-producto del proceso siderúrgico, es decir el proceso productivo está focalizado tanto en la comercialización del acero como en el de la escoria, la cual se usa en diferentes aplicaciones, siendo las principales en el uso en obras civiles, pero también como fertilizantes ^[80].

Por otro lado, existen también estudios que cuestionan la estabilidad química de las escorias y han demostrado la posibilidad de que especies químicas puedan ser lixiviadas y por lo tanto transferidas a las fuentes naturales de agua ^[11]. Este tema resulta relevante para la propuesta de desarrollo, pero no será tratado en este informe, el cual está centrado exclusivamente en la evaluación técnica de la nueva propuesta tecnológica.

Finalmente, en cuanto al valor de la escoria de Cobre, por ser un valor de desecho o inutilizado hasta el momento, es difícil poder determinar su valor monetario de comercialización. Una buena aproximación, la da un reportaje realizado por la revista Minería Chilena (2012), donde publica información de un proceso de licitación pública de cerca de 30 millones de toneladas de relaves, ripios y escorias, provenientes de las instalaciones de la planta Matta y la fundición Hernán Videla Lira. ENAMI con este proceso, esperaba recuperar cerca de un dólar por cada tonelada.

2.3.2. Clinker

El Clinker es el componente principal del Cemento Portland. Esta es una mezcla mineralógica cuyos componentes esenciales son los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición Química del Clinker (% en masa) ^[60]

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	46 - 79	61
Silicato bicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	5 - 30	15
Ferroatuminato tetracálcico	$4\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$	4 - 16	8
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 - 18	12
Cal libre	CaO	C	0,1 - 4	1
Oxido de magnesio libre	MgO	M	0,7 - 1,5	1,5

La producción convencional de cemento tiene serios efectos medioambientales. Los principales son los siguientes:

- Emisiones de contaminantes al aire (monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas muy finas) dependiendo del tipo de combustible (carbón, petróleo o gas natural) y proceso empleado durante la calcinación en el horno (combustión). Es ésta la principal fuente de contaminación y dado la muy alta huella de carbono que tiene el proceso de producción el Clinker un importante objetivo a nivel internacional es disminuir la huella de carbono en este proceso.
- Durante la operación de la planta hay emisiones fugitivas de polvo y gases además de los que se emiten por la chimenea, que incluyen exposición de niveles más altos de plomo, cadmio, arsénico y mercurio, de un total de 19 metales pesados encontrados comúnmente en las emisiones a la atmósfera (como cromo hexavalente, plata, selenio, bario, berilio y antimonio).
- Se producen nuevos contaminantes, especialmente productos de combustión incompleta (PCI).

Dado las condiciones antes mencionadas existen acuerdos internacionales que buscan reducir las emisiones de CO₂ y la Federación Interamericana del Cemento (FICEM), en conjunto con el instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), han trazado la hoja de ruta Chile- FICEM: “Hacia una economía baja en carbono” para la producción de cemento en Chile, donde se espera la mitigación de estos efectos (Figura 3).



Figura 3. Hoja de Ruta FICEM, hacia una economía baja en carbono

Elaboración propia del Roadmap CSI 2018 [61]

En la Tabla 3 se señalan las proyecciones al año 2020, 2040 y 2050 de los principales indicadores relacionados a la industria global de cemento:

Tabla 3. Principales indicadores y trayectorias del Road Map CSI 2018 a nivel mundial (Cement sustainability Initiative).

Indicadores de la Industria Global del Cemento -Roadmap CSI 2018 -	Visión Roadmap CSI 2018 Caso de baja Variabilidad		
	2030	2040	2050
Producción Cemento (Mt/año)	4250	4429	4682
Factor Clinker a Cemento	0,64	0,63	0,60
Intensidad de Energía Térmica del Clinker (Gj/t clinker)	3,3	3,2	3,1
Intensidad de Electricidad del Cemento (GkWh/t cement)	87	83	79
Uso de Combustibles Alternativos (Porcentaje de consumo de energía térmica)	17,5	25,1	30,0
Intensidad Directa de CO2 en el Proceso del cemento (tCO2/t cement)	0,33	0,30	0,24
Intensidad de Energía Directa de CO2 en el Proceso de cemento (tCO2/t cement)	0,19	0,16	0,13
Total Intensidad Directa de CO2 en el cemento (tCO2/t cement)	0,52	0,46	0,37

Elaboración propia del Roadmap CSI 2018 ^[61]

Estos indicadores muestran en forma precisa que hay una importante preocupación global y nacional sobre la problemática medioambiental, en el que la huella energética global, así como la producción de residuos y/o contaminantes debe disminuir de acuerdo a las metas propuestas, a lo cual este proyecto efectivamente responde. Por otro lado, se manifiesta un alza en la producción de cemento por lo que entrar al mercado de la industria aportando cemento Portland o Clinker contribuye positivamente a la evaluación económica del proyecto.

2.4. Reactores

En este apartado se describe de manera sucinta los reactores que permiten la reducción del FeO_x para producir arrabio (Alto horno y reactor COREX) y el horno eléctrico utilizado para la producción de acero. Estas alternativas, o un concepto combinado son:

2.4.1. Alto horno

Un alto horno es un horno especial en el que tienen lugar la reducción y fusión de los minerales oxidados de hierro (ver Figura 4). La transformación química produce hierro fundido saturado en carbono llamado arrabio.

El reactor está constituido por dos troncos en forma de cono unidos por sus bases mayores. Mide de 30 a 70 metros de alto y de 9 a 14 metros de diámetro; su capacidad de producción puede variar entre 500 y 2000 toneladas diarias.

2.4.1.1. Partes de un alto horno

- **Cuba:** tiene forma troncónica y constituye la parte superior del alto horno; por la zona más estrecha y alta de la cuba (llamada tragante) se introduce la carga. La carga la componen el mineral de hierro: magnetita, limonita, siderita o hematita; combustible, que generalmente es carbón de coque y fundente, principalmente piedra caliza o arcilla.
- **Etalaje:** Está separada de la cuba por la zona más ancha de esta última parte, llamada vientre. El volumen del etalaje es mucho menor que el de la cuba. La temperatura de la carga es muy alta (1500 °C) y es aquí donde el mineral de hierro termina la reducción en hierro. La parte final del etalaje es más estrecha.
- **Crisol:** Bajo el etalaje se encuentra el crisol, donde se va depositando el arrabio líquido. Por un agujero, llamado bigotera o piquera de escoria, se extrae la escoria, que se aprovecha para hacer cementos y fertilizantes. Por un orificio practicado en la parte baja del mismo, denominada piquera de arrabio sale el hierro líquido, llamado arrabio, el cual se conduce hasta unos depósitos llamados cucharas. Así, el producto final del alto horno se llama arrabio, también llamado hierro colado o hierro de primera fusión.

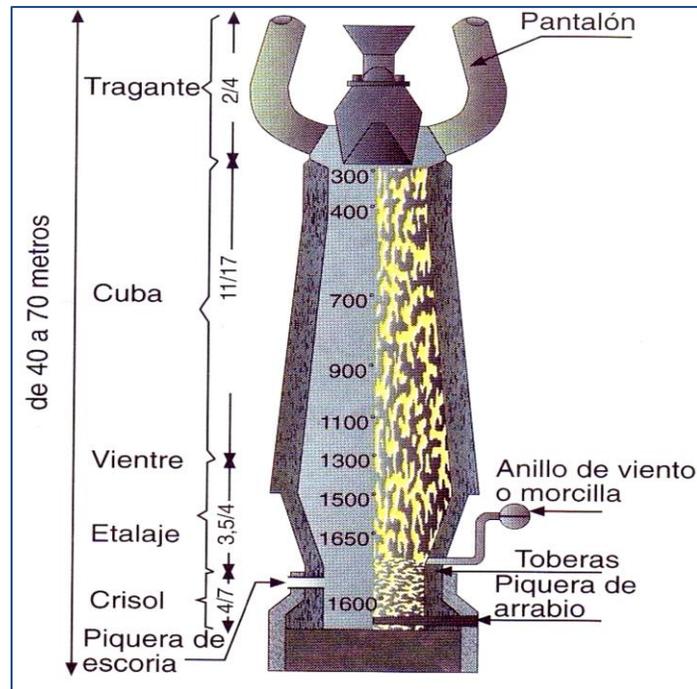


Figura 4. Alto Horno ^[81].

2.4.2. Horno de Arco Eléctrico

Como su nombre lo indica, estos hornos funcionan con el calor que desprende un arco eléctrico (ver Figura 5). Hay dos tipos: los de calefacción por arco indirecto y los por arco directo. En los del primer tipo, los electrodos se colocan encima del material a fundir, y los materiales se funden por el calor del arco excitado. En los hornos de calefacción directos, la fusión se logra a partir del arco entre los electrodos en el baño metálico.

2.4.2.1. Partes del horno eléctrico

- Caja: construida de chapas gruesas de acero.
- Revestimiento: en los hornos ácidos, de ladrillos Dinas; en los básicos, con ladrillos de magnesita.
- Bóveda móvil: se cubre con ladrillos Dinas (hechos mayoritariamente de sílice).
- Patines: tienen forma de arco y ayudan a la descarga del horno.
- Piquera: canal para la salida del material fundido.

- Transmisión eléctrica o hidráulica: mueve el horno hacia una posición horizontal para facilitar la descarga.
- Electrodo: son móviles, y elaborados de grafito o carbono.
- Transformador: suministra la corriente necesaria a los electrodos.
- Barras colectoras: llevan la corriente del transformador a los electrodos.

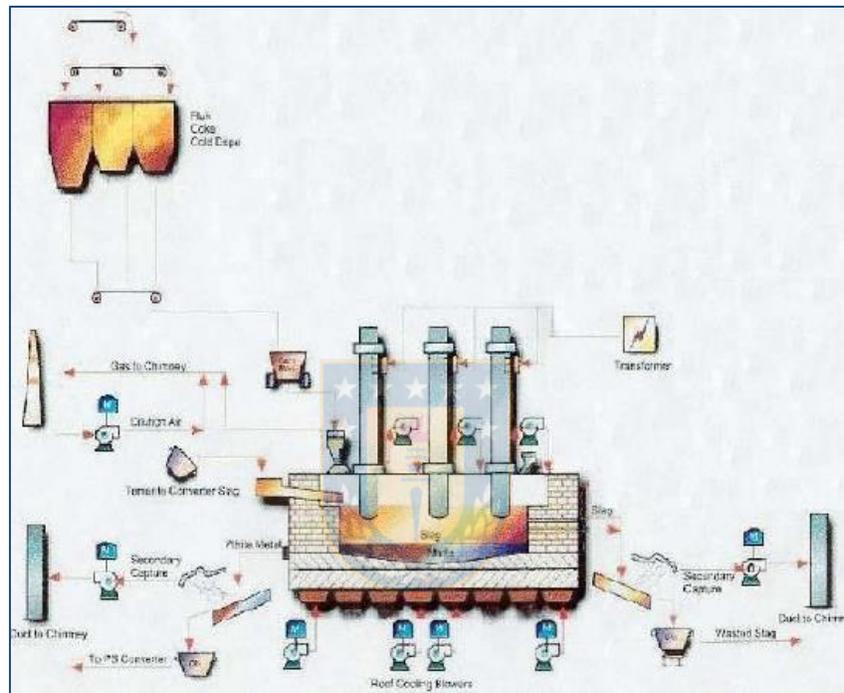


Figura 5. Horno Eléctrico [82].

2.4.3. Horno tipo COREX

El horno tipo COREX es la única tecnología de fusión reductora que se ha posicionado en varias plantas (ver Figura 6). Presenta la ventaja de la insensibilidad al contenido de álcalis de los minerales. Sin embargo, no ha logrado liberarse totalmente del coque, el que ha debido usarse en la unidad de fusión y desgasificación para asegurar la permeabilidad.

2.4.3.1. Proceso COREX

Las plantas COREX constan de dos reactores: la cuba de reducción, situada en la parte superior y la unidad de fusión y gasificación, por debajo de la cuba.

- Cuba de reducción: Aquí se cargan continuamente pellets, mineral calibrado y fundentes. Se inyecta lateralmente el gas reductor a 850 °C. El gas se mueve en contra corriente hacia la parte superior de la cuba y sale a 250 °C. Los metálicos se reducen, logrando una metalización del 75% o más ^[62].
- Unidad de Fusión y gasificación: El hierro esponja caliente, junto con los fundentes parcialmente calcinados, entran a este dispositivo a unos 800 °C. En esta unidad se inyecta oxígeno y carbón no coquizable mediante toberas, además de coque por gravedad. El carbón se gasifica, formando CO. El semicoque remanente de este proceso debe tener resistencia suficiente como para sostener la permeabilidad de la carga. La temperatura del domo, mantenida entre 1500 y 1100 °C, asegura el craqueo de los volátiles que se liberan del carbón. El gas que sale de esta unidad se enfría a 850 °C mediante la adición de gas de enfriamiento, antes de ser inyectado en la cuba de reducción.

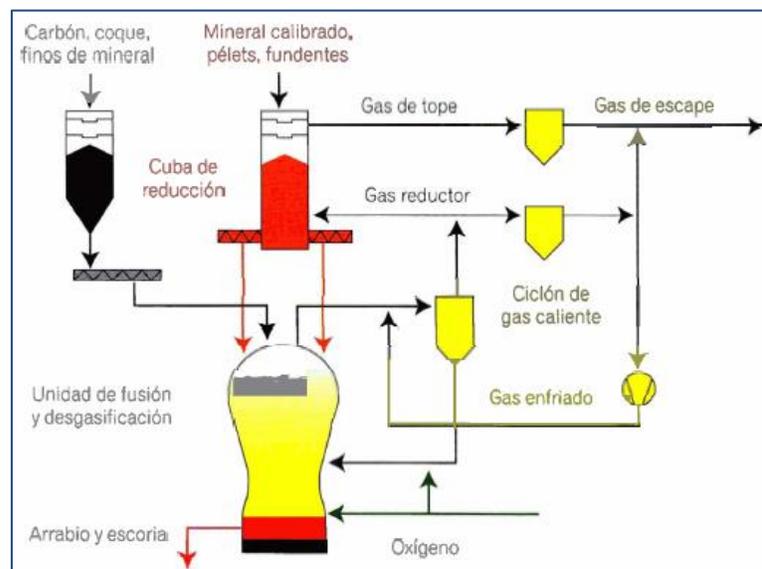


Figura 6. Esquema del proceso COREX (Cuba de reducción y Unidad de fusión y gasificación) ^[83].

3. Descripción del proceso “Zero waste” en desarrollo

El proceso de producción de arrabio en alto horno, así como las diferentes propuestas de fusión reductora realizada entre los años 80' y 90', terminan con una reducción con coque o carbón de una mezcla líquida donde el Fe se encuentra a la forma de FeO_x disuelto en una fase fundida del tipo $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$. En el caso del proceso propuesto, se tomará la escoria fundida que va a descarte en una fundición de concentrados, la cual se puede representar simplificada por una mezcla $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2$ con presencia de una serie de otros óxidos menores. Esta escoria será reducida con carbón como reductor para producir Fe metálico donde el SiO_2 será escorificado para llegar en una primera aproximación a una composición equivalente a la de una escoria de alto horno que se usa como aditivo para el cemento portland, maximizando su valor comercial. Esta etapa de escorificación abre la posibilidad de modificar la composición para llegar directamente a la producción de Clinker, lo que significaría un importante aporte para disminuir la huella energética de este proceso industrial, acorde a lo discutido en el capítulo anterior.

Tomando las escorias finales de una fundición de cobre, la tecnología propuesta se puede establecer en el siguiente esquema productivo de cuatro etapas:

1. Traspaso en caliente: La salida de la escoria de cobre desde el horno de tratamiento de escoria (eléctrico o basculante tipo Teniente) con destino a botadero proviene de un proceso que se realiza a 1300°C aproximadamente. Este calor sensible es de valor al proceso pues minimiza el consumo energético del proceso global. En la tecnología propuesta la escoria será transferida al horno eléctrico.
2. Reducción de FeO_x : La adición de un reductor como el carbón ayuda a descomponer la fayalita, reducción de magnetita y wustita en hierro metálico, promoviendo la separación de fases, donde se realiza la formación de arrabio.
3. Formación de escoria: La incorporación de fundentes a la escoria como CaO favorece la formación de escorias secundarias, el cual es la base para la producción del aditivo de cemento Portland.

4. Estación de ajuste químico y enfriamiento: Se dispone la escoria secundaria en una olla, donde se pueden agregar los componentes finales para buscar los componentes del Clinker y proponer la producción de Cemento Portland. Globalmente, los aditivos que se deben considerar son: CaSO_4 , K_2O , Na_2O , yeso en una cantidad entre 2 y 3% para evitar el fraguado. Esta etapa se debe realizar en parte, directamente en la escoria fundida, la cual deberá seguir un enfriamiento controlado para garantizar la precipitación a la solidificación de las especies indicadas en la Tabla 2. En esta fase, se considera también la mezcla de estos aditivos durante las etapas de disminución de tamaño del producto, por lo que el empleo de una granalladora (Ver Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) hace que el onsumo de energía en el molino final disminuya y sea más fácil trabajar el cemento en polvo.

3.1. Composición Escoria de cobre

A continuación, en la Tabla 4 se muestra la composición típica de la escoria de cobre, perteneciente a los registros de ENAMI, siendo esta rica en FeO y SiO_2 .

Tabla 4. Composición química de las escorias industriales de cobre ^[63].

Componente	%
FeO	45.0-55.0
SiO ₂	25.0-35.0
Fe ₃ O ₄	<10.0
Al ₂ O ₃	<5.0
CaO	1.0-5.0
MgO	1.0-2.0
Cr ₂ O ₃	<1.0
Cu	<1.0

3.2. Composición Escoria de acería

Con el objetivo de maximizar los indicadores de sustentabilidad del proceso en estudio (huella ecológica y minimización global de pasivos) se analizó la posibilidad usar como fundente las escorias de una Mini Mills que genera escorias con la composición que se muestra en la Tabla 5. La propuesta es incorporar una proporción de escoria de hierro en conjunto con la de cobre, obteniendo los mismos resultados teóricos, y con mayores expectativas ya que la composición de esta se asemeja de mejor manera a la del Cemento Portland. Esto impacta positivamente en el modelo de negocios donde se detallará este posible escenario. Esta opción abre también la posibilidad de usar escorias de una acería local, como es el caso de la empresa AZA.

Tabla 5. Composición química de las escorias de producción de acero en una mini mills ^[64].

Composición química	Rango (%)	Valor medio (%)
FeO	7.0- 35.0	25
Fe ₂ O ₃	11.0- 40.0	25
CaO	23.0- 32.0	25
CaO libre	0.0- 4.0	2
SiO ₂	8.0- 15.0	11
Al ₂ O ₃	3.5- 7.0	5
MgO	4.8- 6.6	5
MnO	2.5-4.5	4

3.2.1. Composición de escorias de acería de la empresa AZA

En el marco de esta optimización medioambiental se consideró evaluar el uso de las escorias de la empresa AZA, empresa con un marcado sello de sostenibilidad en sus operaciones y que participa del desarrollo de este proyecto en la perspectiva de usar el arrabio producido, así como para minimizar su generación de residuos. La Tabla 6 muestra la composición de esta escoria.

Tabla 6. Composición de Escorias de hierro en Gerdau Aza ^[65].

Componente	%
SiO ₂	23.59
Al ₂ O ₃	21.40
Fe ₂ O ₃	19.24
CaO	16.99
MgO	12.18
MnO	3.53
Cr ₂ O ₃	1.74
TiO ₂	0.63
SO ₃	0.33
K ₂ O	0.18
V ₂ O ₅	0.06
SrO	0.04
CuO	0.02
ZnO	0.02
ZrO ₂	0.02
NbC	0.01

3.3. Cemento Portland y su composición

El Cemento Portland es un alúmino-silicato de calcio, patentado por Joseph Aspdin en 1824, y denominado Portland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300 °C) de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3 m de diámetro y 100 m de largo. El material obtenido denominado "Clinker" se muele finalmente adicionándole de 2% a 3% de sulfato de calcio (como sulfato de calcio di-hidratado, hemi-hidratado, anhidro o una mezcla entre ellos para evitar que fragüe instantáneamente).

Para que maximice su potencial económico y con las características de "Zero Waste" la escoria producida en este proceso debe tener una composición lo más aproximada posible al cemento Portland, para ser vendido como aditivo. Para esto se trabajó con la siguiente composición:

Tabla 7. Composición química del cemento Portland ^[66].

Componente	%
CaO	64.0
SiO ₂	21.0
Al ₂ O ₃	5.5
Fe ₂ O ₃	4.5
MgO	2.4
Sulfatos	1.6
Otros	1.0

3.4. Reductores y Fundentes

3.4.1. Reductores

Los reductores son los reactivos que garantizarán la reducción de los óxidos de hierro (Fe₃O₄ y FeO_x) para la obtención de arrabio desde la escoria primaria de cobre. En la evaluación que se presenta en este estudio se decidió la utilización de coque. Los otros reductores gaseosos como el CH₄, CO y H₂ son complejos de manipular debido a que su estado gaseoso requiere de equipo de almacenaje y aumenta los costos de inversión.

3.4.2. Fundentes

Los fundentes, como su nombre lo precisan, son aditivos que ayudan a bajar la temperatura de fusión de la mezcla. En este caso el objetivo es bajar la temperatura de fusión de la mezcla rica en SiO₂ para que pueda estar completamente fundida dentro del horno. El sistema inicial parte con la escoria primaria de cobre completamente fundida, la que sufre una pérdida de calor al ser trasladada a un horno de reducción (en el traspaso en caliente), donde el principal objetivo es conseguir una separación de fases (entre escoria y arrabio) mediante la adición de un reductor

haciendo sangrar arrabio. Durante el proceso de reducción se forma la escoria secundaria, sin hierro, mediante un ajuste químico para llevarla a una composición tan cercana como posible del Clinker de Cemento Portland. Luego, trabajando en una fase completamente fundida pasa a una estación de enfriamiento.

Una primera simplificación muy representativa del sistema global es analizar diagrama ternario de CaO , Al_2O_3 y SiO_2 , trabajar con una mezcla de fundentes que nos permitiera trabajar a una menor temperatura, en donde la mezcla se presente fundida. En la Figura 7 se muestra el diagrama ternario con una composición de $\text{SiO}_2 = 85.2\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.5\%$ y $\text{CaO} = 4.2\%$ que corresponde a la representación de la mezcla de la escoria primaria de cobre una vez se han reducido los óxidos de Fe. Se estima que temperatura de la mezcla es aproximadamente a $1300\text{ }^\circ\text{C}$ cuando se tiene los óxidos de Fe, sin embargo, sin éstos la temperatura liquidus es del orden de los $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Luego, en la Figura 8 y Figura 9 se muestran las composiciones finales después de la adición de fundente ($90\% \text{CaO} - 10\% \text{Al}_2\text{O}_3$) para cambiar la composición y tener una mezcla fundida a $1400\text{ }^\circ\text{C}$. La diferencia entre ambas opciones (caso A y B) es la proporción de fundente a agregar, lo cual que será evaluado posteriormente, para encontrar el escenario más rentable dado que si bien en un caso se debe agregar mayor cantidad, quizás la composición final sea más atractiva para el tipo de producto producido.

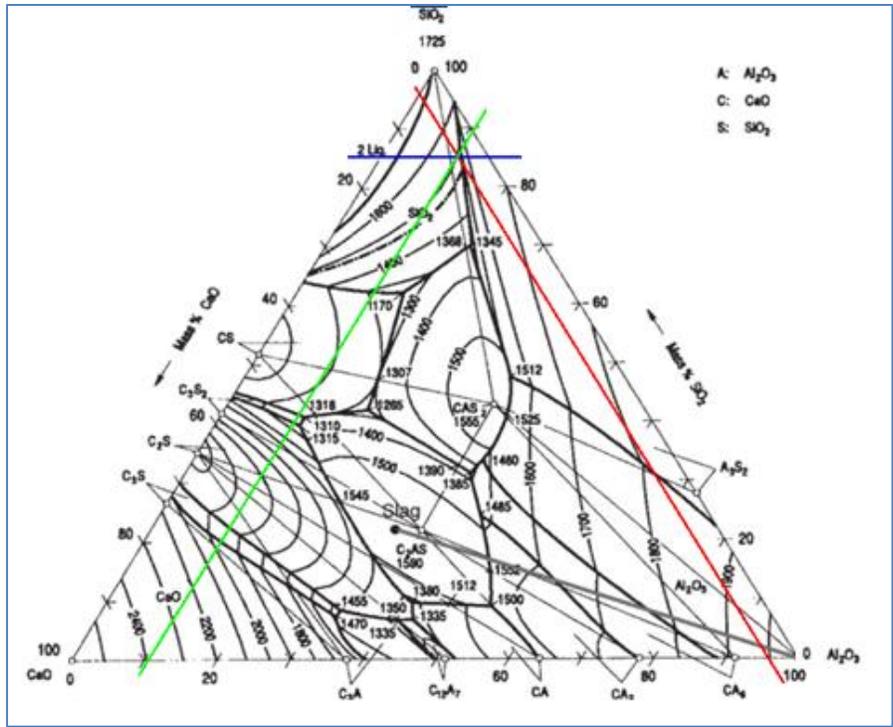


Figura 7. Composición inicial de la escoria primaria de Cobre $T_f = 1500^\circ\text{C}$ (Elaboración propia).

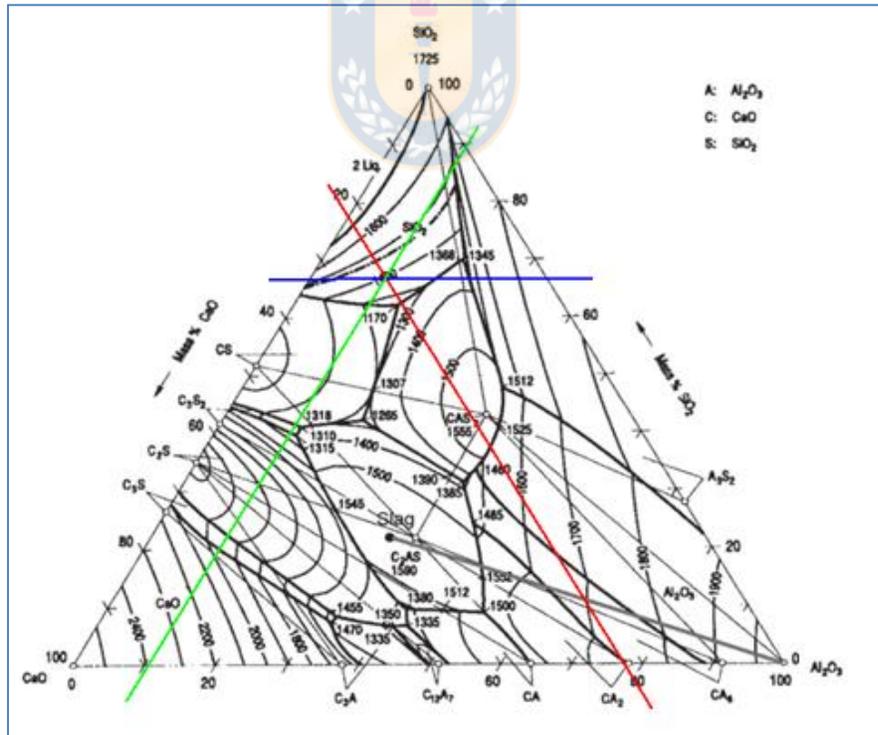


Figura 8. Composición adaptada para obtener escoria secundaria $T_f = 1400^\circ\text{C}$, correspondiente al "Caso A" (Elaboración propia).

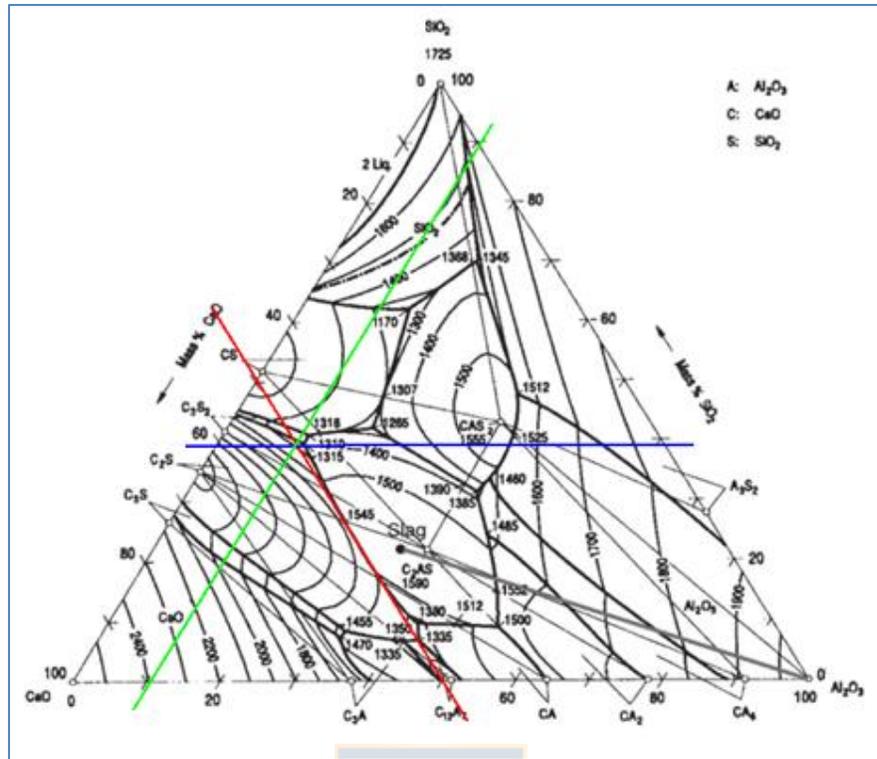


Figura 9. Composición adaptada para obtener escoria secundaria $T_f = 1400^\circ C$ correspondiente al "Caso B" (Elaboración propia).

La propuesta también contempla el uso de escoria de acería (AZA) cuya composición se muestra en la Figura 10. Esta escoria de hierro será utilizada en el "Caso C" como único fundente y en el "Caso D" como fundente adicional cuyas composiciones finales se muestran en las Figura 11 y Figura 12, respectivamente.

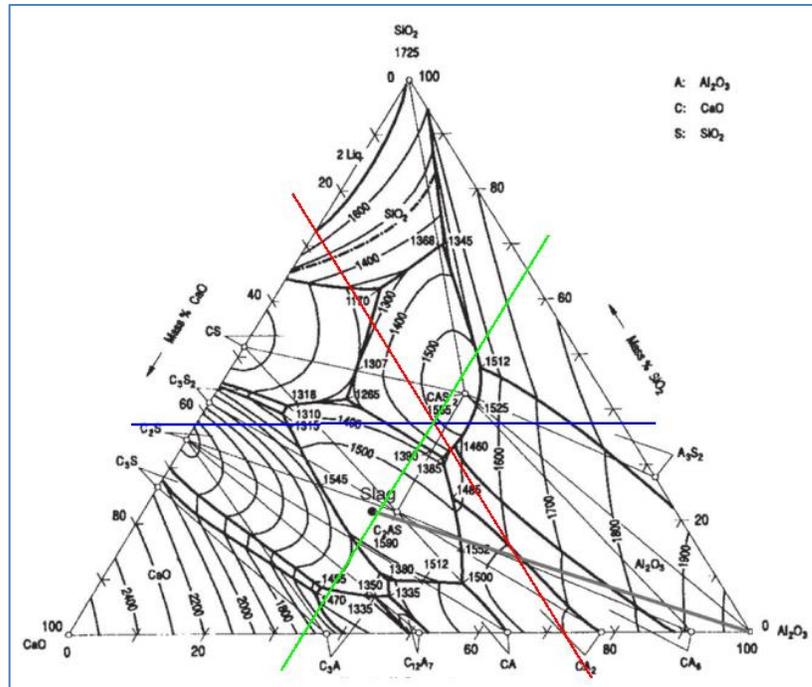


Figura 10. Composición escoria acería de hierro Gerdau Aza (Elaboración propia).

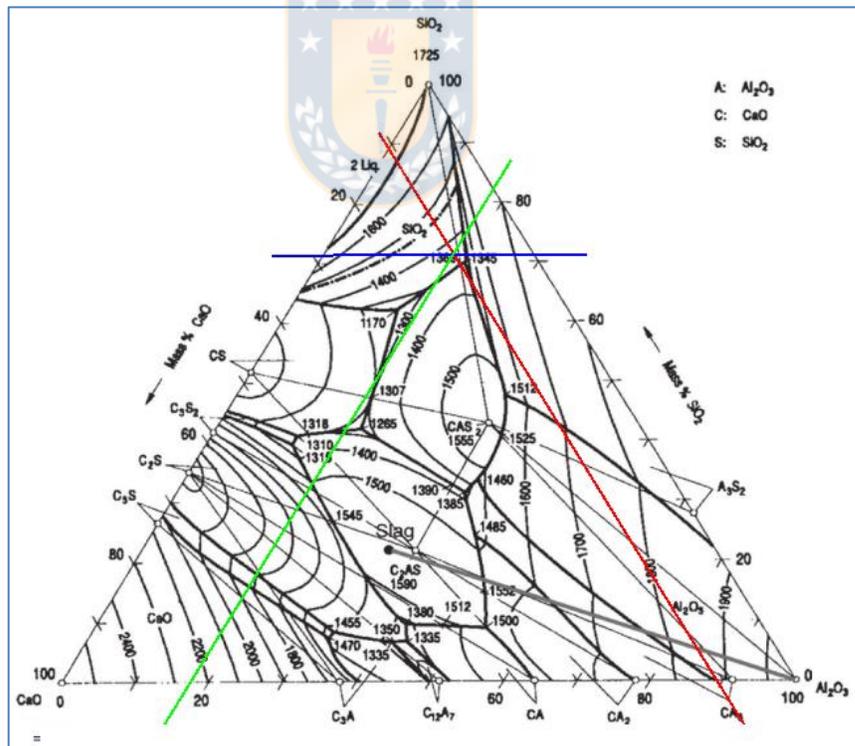


Figura 11. Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente $T_f = 1380^\circ C$, correspondiente al "Caso C" (Elaboración propia).

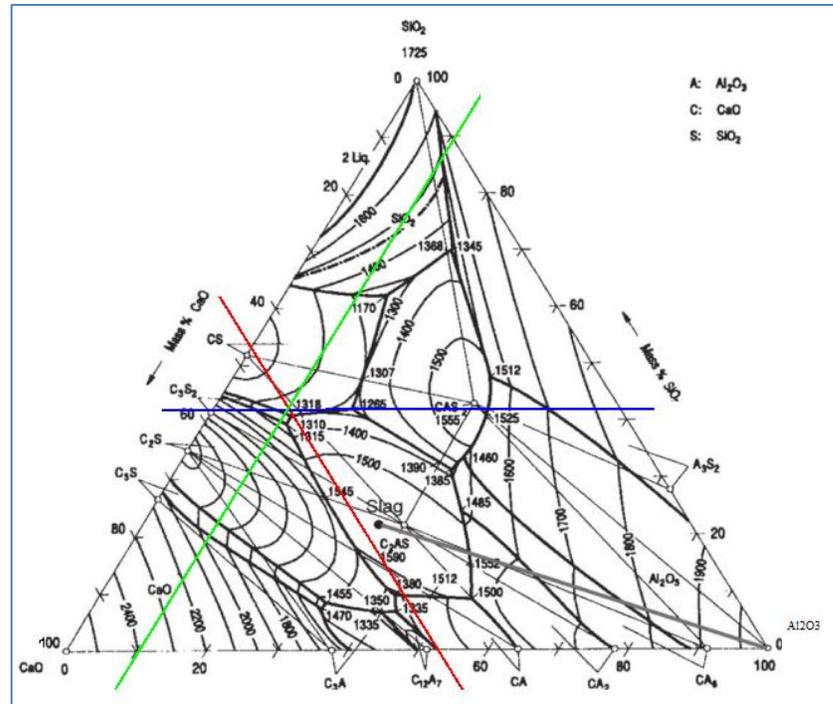


Figura 12. Escoria de cobre y hierro con fundentes. $T_f = 1400^\circ\text{C}$, correspondiente al “caso D” (Elaboración propia).

3.5. Balance de materia y energía

De la Figura 13 es fácilmente comprensible que la producción de cemento Portland a partir de escoria de cobre reducida no es difícil. En efecto, la composición de la escoria primaria reducida se alinea con la composición 90% CaO – 10% Al_2O_3 pasando precisamente por la zona de la composición del cemento portland. De igual forma vemos que la escoria de acerías se ubica también en esa misma línea, por lo que se podrá contar con este insumo como fundente y aditivo a la escoria secundaria producida durante la reducción.

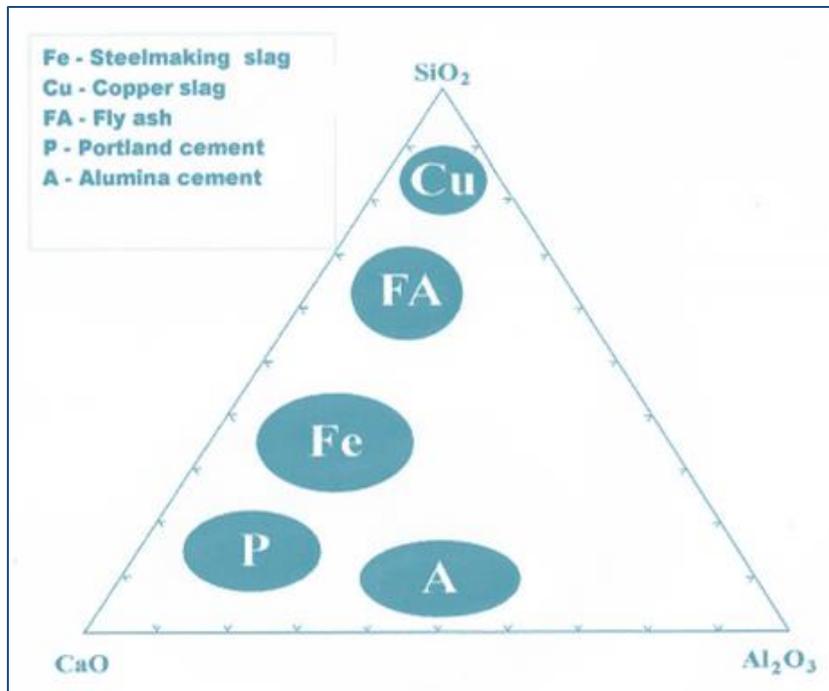


Figura 13. Comparación entre escorias y la composición del cemento ^[67].

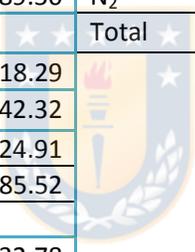
3.5.1. Balance de Masa

El balance de masa elaborado para este estudio se realizó con la ayuda de una planilla Excel y del software HCSC con el fin de analizar las condiciones en el que las escorias de cobre puedan utilizarse como un subproducto de valor comercial y no seguir siendo un producto de descarte.

3.5.1.1. Balance de masa escoria de cobre

En la Tabla 8 se reporta la escoria de cobre a utilizar, añadiendo un reductor (coque) y fundentes para obtener la composición de Cemento Portland. Este balance másico es válido para el análisis de los casos A y B.

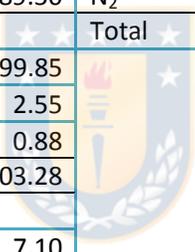
Tabla 8. Balance de Masa escoria de cobre

ENTRADAS	%	kg	SALIDAS	%	kg
Escoria de cobre			Arrabio		
Fe ₃ O ₄	5.60	56.00	Fe	96.20	410.79
FeO	53.54	535.40	C	3.80	16.23
SiO ₂	30.63	306.30	Total	100.00	427.02
CaO	1.52	15.20	A. Portland		
MgO	1.01	10.10	CaO	64.0	933.49
Cr ₂ O ₃	0.03	0.30	SiO ₂	21.0	306.30
Al ₂ O ₃	3.79	37.90	Al ₂ O ₃	5.50	80.22
Cu	0.85	8.50	Fe ₂ O ₃	4.50	65.64
Pb	0.06	0.60	MgO	2.40	35.01
Zn	2.18	21.80	Sulfatos	1.60	23.34
S	0.68	6.80	Otros	1.00	14.59
Cl	0.10	1.00	Total	100.00	1458.59
Sb	0.01	0.10	Gases		
Total	100.00	1000.00	CO	24.07	82.93
Reductor			CO ₂	40.12	138.21
C	100.00	89.50	N ₂	35.80	123.33
Fundentes			Total	100.00	344.47
CaO	93.20	918.29			
Al ₂ O ₃	4.30	42.32			
MgO	2.50	24.91			
Total	100.00	985.52			
Otros					
O ₂	21.00	32.78			
N ₂	79.00	123.33			
Total	100.00	156.11			

3.5.1.2. Balance de masa, mezcla de escoria de cobre y hierro.

Este balance se llevó a cabo con una mezcla de 81% de escorias de cobre y 19% de escorias de hierro, para incorporar esta última como un aporte a la composición objetivo final. Este análisis es válido para el estudio de los casos C y D.

Tabla 9. Balance de escorias de cobre y hierro.

ENTRADAS	%	kg	SALIDAS	%	kg
Escoria de cobre			Arrabio		
Fe ₃ O ₄	5.60	56.00	Fe	96.20	436.38
FeO	53.54	535.41	C	3.80	17.24
SiO ₂	30.63	306.29	Total	100.00	453.62
CaO	1.52	15.20	A. Portland		
MgO	1.01	10.10	CaO	64.0	1054.89
Cr ₂ O ₃	0.03	0.30	SiO ₂	21.0	346.14
Al ₂ O ₃	3.79	37.90	Al ₂ O ₃	5.50	90.65
Cu	0.85	8.50	Fe ₂ O ₃	4.50	74.17
Pb	0.06	0.60	MgO	2.40	39.56
Zn	2.18	21.80	Sulfatos	1.60	26.37
S	0.68	6.80	Otros	1.00	16.48
Cl	0.10	1.00	Total	100.00	1648.27
Sb	0.01	0.10	Gases		
Total	100.00	1000.00	CO	34.06	81.78
Reductor			CO ₂	56.77	136.30
C	100.00	89.50	N ₂	9.17	26.70
Fundentes			Total	100.00	244.78
CaO	99.66	999.85			
Al ₂ O ₃	0.25	2.55			
MgO	0.09	0.88			
Total	100.00	1003.28			
Otros					
O ₂	21.00	7.10			
N ₂	79.00	26.70			
Total	100.00	33.80			
Escoria de Hierro					
SiO ₂	23.59	55.32			
Al ₂ O ₃	21.40	50.21			
Fe ₂ O ₃	19.24	45.13			
CaO	16.99	39.84			
MgO	12.18	28.58			
MnO	3.53	8.29			
Cr ₂ O ₃	1.74	4.07			
TiO ₂	0.63	1.49			
SO ₃	0.33	0.78			
K ₂ O	0.18	0.43			
V ₂ O ₅	0.06	0.14			
SrO	0.04	0.10			
CuO	0.02	0.06			
ZnO	0.02	0.05			
ZrO ₂	0.02	0.05			
NbC	0.01	0.03			
Total	100.00	243.56			

3.5.2. Balance de Energía

Los balances de energía se realizaron con el software de HCSC, estos representan los casos A, B, C y D tomando en cuenta la termodinámica de las reacciones consideradas dentro del horno eléctrico. Esto quiere decir, que el análisis es válido tanto para la realización de aditivo como de cemento Portland. El reductor utilizado es coque representado en las tablas como "C" y es el mismo que se consideró en el aporte energético. Se le llamo de esa forma porque es adicional al coque requerido estequiométricamente y contribuye energéticamente.

3.5.2.1. Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente

Este caso propone agregar una proporción de fundentes Al_2O_3 10.5%p y CaO 89.5%p correspondiente al 21.4% de la masa de óxidos sin hierro de la escoria primaria de cobre.

Tabla 10. Balance de Energía Caso A

ENTRADAS	kg	T(°C)	H	SALIDAS	kg	T(°C)	H
Óxidos de Fe				Arrabio			
Fe_3O_4	56.00	1300	-49.51	Fe	410.79	1400	93.31
FeO	535.41	1300	-343.95	C	16.23	1400	8.86
Óxidos sin Fe				Portland			
SiO_2	306.30	1300	-1002.00	SiO_2	306.30	1400	-993.07
Al_2O_3	37.90	1300	-135.35	Al_2O_3	48.17	1400	-170.54
CaO	15.20	1300	-36.95	CaO	102.78	1400	-247.52
MgO	10.10	1300	-32.26	MgO	10.10	1400	-31.94
Cr_2O_3	0.30	1300	-0.46	Fe_2O_3	65.64	1400	-61.61
Fundentes				Gases			
Al_2O_3	10.27	25	-40.36	CO	82.93	1400	-20.98
CaO	87.58	25	-236.98	CO_2	138.21	1400	-109.16
Reductor				N ₂			
C	89.50	25	0	Aporte energético			
Gases				CO	110.41	1400	-61.76
O ₂	32.78	25	0	CO_2	184.01	1400	-321.38
N ₂	123.33	25	0				
Aporte energético							
C	97.56	25	0				
O ₂	98.43	25	0				
N ₂	370.29	25	0				

3.5.2.2. Caso B: Escoria de cobre con fundente

Este caso propone agregar una proporción de fundentes Al_2O_3 10.0%p y CaO 90.0%p correspondiente al 53.6% de la masa de óxidos sin hierro de la escoria primaria de cobre.

Tabla 11. Balance de Energía Caso B

ENTRADAS	kg	T(°C)	H	SALIDAS	kg	T(°C)	H
Óxidos de Fe				Arrabio			
Fe_3O_4	56.00	1300	-49.51	Fe	410.79	1400	93.31
FeO	535.41	1300	-343.95	C	16.23	1400	8.86
Óxidos sin Fe				Portland			
SiO_2	306.30	1300	-1002.00	SiO_2	306.30	1400	-993.07
Al_2O_3	37.90	1300	-135.35	Al_2O_3	79.42	1400	-281.13
CaO	15.20	1300	-36.95	CaO	388.85	1400	-936.46
MgO	10.10	1300	-32.26	MgO	10.10	1400	-31.94
Cr_2O_3	0.30	1300	-0.46	Fe_2O_3	65.64	1400	-61.61
Fundentes				Gases			
Al_2O_3	41.52	25	-163.08	CO	82.93	1400	-20.98
CaO	373.65	25	-1011.09	CO_2	138.21	1400	-109.16
Reductor				N_2	587.64	1400	37.95
C	89.50	25	0	Aporte energético			
Gases				CO	138.44	1400	-77.45
O_2	32.78	25	0	CO_2	230.74	1400	-402.98
N_2	123.33	25	0				
Aporte energético							
C	122.33	25	0				
O_2	123.47	25	0				
N_2	464.31	25	0				

3.5.2.3. Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente

Este caso se propone agregar escoria de acería como fundente para cambiar la composición inicial de la escoria de cobre a una nueva que posee un punto de fusión igual a los 1380 °C aproximadamente.

Tabla 12. Balance de Energía Caso C

ENTRADAS	kg	T(°C)	H	SALIDAS	kg	T(°C)	H
Óxidos de Fe de la escoria de Cu				Arrabio			
Fe ₃ O ₄	56.00	1300	-49.51	Fe	436.38	1400	99.12
FeO	535.40	1300	-343.95	C	17.24	1400	9.41
Óxidos de Fe de la escoria de Fe				Portland			
Fe ₂ O ₃	45.13	25	-55.59	SiO ₂	361.61	1400	-1172.41
Óxidos sin Fe de la escoria de Cobre				Al ₂ O ₃			
SiO ₂	306.29	1300	-1001.98	CaO	55.04	1400	-132.56
Al ₂ O ₃	37.90	1300	-135.35	MgO	38.68	1400	-122.32
CaO	15.20	1300	-36.95	Fe ₂ O ₃	74.17	1400	-69.62
MgO	10.10	1300	-32.26	Gases			
Cr ₂ O ₃	0.30	1300	-0.46	CO	81.78	1400	-20.98
Óxidos sin Fe de la escoria de Hierro				CO ₂	110.50	1400	-109.16
SiO ₂	55.32	25	-200.44	N ₂	505.26	1400	37.95
Al ₂ O ₃	50.21	25	-197.21	Aporte Energético			
CaO	39.84	25	-107.81	CO	142.69	1400	-79.82
MgO	28.58	25	-101.96	CO ₂	237.82	1400	-415.35
MnO	8.29	25	-10.76				
Cr ₂ O ₃	4.07	25	-7.26				
TiO ₂	1.49	25	-4.20				
SO ₃	0.78	25	-0.92				
K ₂ O	0.43	25	-0.39				
V ₂ O ₅	0.14	25	-0.28				
SrO	0.10	25	-0.13				
CuO	0.06	25	-0.03				
ZnO	0.05	25	-0.06				
ZrO ₂	0.05	25	-0.11				
NbC	0.03	25	-0.01				
Reductor							
C	89.50	25	0				
Gases							
O ₂	7.10	25	0				
N ₂	26.70	25	0				
Aporte energético							
C	126.09	25	0				
O ₂	127.21	25	0				
N ₂	478.56	25	0				

3.5.2.4. Caso D: Escoria de cobre y hierro con fundentes

Este caso propone agregar de fundente CaO 100%p correspondiente al 40.7% de la masa de óxidos sin hierro de la escoria primaria de cobre y escoria de acería.

Tabla 13. Balance de Energía Caso D

ENTRADAS	kg	T(°C)	H	SALIDAS	kg	T(°C)	H
Óxidos de Fe de la escoria de Cu				Arrabio			
Fe ₃ O ₄	56.00	1300	-49.51	Fe	436.38	1400	99.12
FeO	535.40	1300	-343.95	C	17.24	1400	9.41
Óxidos de Fe de la escoria de Fe				Portland			
Fe ₂ O ₃	45.13	25	-55.59	SiO ₂	361.61	1400	-1172.41
Óxidos sin Fe de la escoria de Cobre				Al ₂ O ₃			
SiO ₂	306.29	1300	-1001.98	CaO	401.48	1400	-966.87
Al ₂ O ₃	37.90	1300	-135.35	MgO	38.68	1400	-122.32
CaO	15.20	1300	-36.95	Fe ₂ O ₃	74.17	1400	-69.62
MgO	10.10	1300	-32.26	Gases			
Cr ₂ O ₃	0.30	1300	-0.46	CO	81.78	1400	-20.98
Óxidos sin Fe de la escoria de Hierro				CO ₂			
SiO ₂	55.32	25	-200.44	N ₂	604.94	1400	37.95
Al ₂ O ₃	50.21	25	-197.21	Aporte Energético			
CaO	39.84	25	-107.81	CO	172.41	1400	-96.45
MgO	28.58	25	-101.96	CO ₂	287.35	1400	-501.86
MnO	8.29	25	-10.76				
Cr ₂ O ₃	4.07	25	-7.26				
TiO ₂	1.49	25	-4.20				
SO ₃	0.78	25	-0.92				
K ₂ O	0.43	25	-0.39				
V ₂ O ₅	0.14	25	-0.28				
SrO	0.10	25	-0.13				
CuO	0.06	25	-0.03				
ZnO	0.05	25	-0.06				
ZrO ₂	0.05	25	-0.11				
NbC	0.03	25	-0.01				
Reductor							
C	89.50	25	0				
Gases							
O ₂	7.10	25	0				
N ₂	26.70	25	0				
Fundentes							
Al ₂ O ₃	0	25	0				
CaO	346.44	25	-937.45				
Aporte energético							
C	152.35	25	0				
O ₂	153.71	25	0				
N ₂	578.24	25	0				

3.6. Resumen de parámetros de proceso para las alternativas propuestas

En la Tabla 14 y Tabla 15 se muestra un resumen de los insumos requeridos para cálculos basados en una tonelada de escoria de cobre sobre las distintas alternativas para producir aditivo como cemento Portland respectivamente. Para un análisis más claro, se detalla por etapas el proceso, siendo E1 los reactivos que entran al horno eléctrico, E2 los productos salientes del mismo y E3 que es una etapa en donde se realiza un ajuste químico para la obtención final del producto.

Tabla 14. Resumen de parámetros en el proceso de producción de aditivo Portland

	Aditivo			
	A	B	C	D
E1: Escoria Cu	1.000	1.000	1.000	1.000
E1: Escoria Fe	0.000	0.000	0.235	0.235
E1: Coque	0.187	0.212	0.216	0.242
E1: CaO	0.088	0.374	0.000	0.346
E1: Al ₂ O ₃	0.010	0.042	0.000	0.000
E1: O ₂	0.131	0.156	0.134	0.161
E1: N ₂	0.494	0.588	0.505	0.605
E2: N ₂	0.494	0.588	0.505	0.605
E2: CO	0.083	0.083	0.082	0.082
E2: CO ₂	0.138	0.138	0.136	0.136
E2: arrabio	0.427	0.427	0.454	0.454
E2: Escoria secundaria	0.533	0.850	0.618	0.964
E3: CaO	0	0	0	0
E3: Al ₂ O ₃	0	0	0	0
E3: MgO	0	0	0	0
E3: Aditivo Portland	0.533	0.850	0.618	0.964

Tabla 15. Resumen de parámetros en el proceso de producción de cemento Portland

	Cemento			
	A	B	C	D
E1: Escoria Cu	1.000	1.000	1.000	1.000
E1: Escoria Fe	0.000	0.000	0.235	0.235
E1: Coque	0.187	0.212	0.216	0.242
E1: CaO	0.088	0.374	0.000	0.346
E1: Al ₂ O ₃	0.010	0.042	0.000	0.000
E1: O ₂	0.131	0.156	0.134	0.161
E1: N ₂	0.494	0.588	0.505	0.605
E2: N ₂	0.494	0.588	0.505	0.605
E2: CO	0.083	0.083	0.082	0.082
E2: CO ₂	0.138	0.138	0.136	0.136
E2: arrabio	0.427	0.427	0.454	0.454
E2: Escoria secundaria	0.533	0.850	0.618	0.964
E3: CaO	0.831	0.545	1.000	0.653
E3: Al ₂ O ₃	0.032	0.800	0.003	0.003
E3: MgO	0.025	0.025	0.001	0.001
E3: Cemento Portland	1.444	2.243	1.647	1.647



4. Estudio Técnico Económico

La presente memoria de título busca establecer los parámetros base del tratamiento de escoria por la vía “Zero Waste”, para esto se analizaron los componentes de la misma para generar co-productos de tipo comerciables. La evaluación comercial se realizó en un horizonte de 10 años considerando que se alcanzaban los objetivos y se logran poner en el mercado los productos del proceso. Se consideró una tasa de descuento de 10%, considerando que la planta estará en funcionamiento 350 días/año para la fundición Hernán Videla Lira perteneciente a ENAMI y extensible a otras fundiciones. Finalmente cabe mencionar que las estimaciones de costos se realizaron para un dólar equivalente a 780 pesos chilenos.

4.1. Antecedentes generales de las fundiciones en Chile

El encadenamiento productivo de los procesos extractivos está definido según la secuencia clásica que comienza con la explotación minera y termina con una etapa que para muchos metales bases es una etapa piro-metalúrgica para producir finalmente un metal refinado. En el caso del cobre sobre el 80% de la producción mundial corresponde actualmente a recursos de sulfuros que son procesados en fundiciones de concentrado ^[68].

Chile tiene hoy siete fundiciones operando, las que en el contexto internacional no están bien posicionadas respecto de diferentes indicadores de competitividad. A modo de ilustración, y siendo uno de los más importantes, en la tabla siguiente se entrega el margen bruto del negocio de las fundiciones a nivel mundial.

Tabla 16. Margen Bruto del negocio de fundiciones a nivel mundial 2017 ^[68].

FUNDICIONES	COSTO DIRECTO	INGRESO TOTAL	MARGEN DE CAJA
	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)
China	12.9	28.6	19.3
Mundo	23.5	27.0	12.2
Chile	39.9	22.3	-4.6

Para Chile, este parámetro si bien se ha mantenido desde el año 2013 (-4.6 c/lb Cu) es impensable que el negocio se siga sustentando financieramente si no hay definiciones sobre la gestión que busquen revertir esta condición.

Esta situación está claramente identificada en el Road Map Tecnológico ^[68] desarrollado en la Corporación Alta Ley donde Fundición y Refinería se han identificado y cuantificado los siguientes desafíos que buscan mejorar la competitividad de las fundiciones nacionales:

- 1 Aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería
- 2 Disminuir el impacto medioambiental
- 3 Mejorar las condiciones laborales

Entre diferentes opciones, el aporte del proyecto de I&D precompetitivo es sin duda dar una alternativa para revertir las condiciones que determinan los resultados reportados en la Tabla 16.

Esta propuesta busca por lo tanto aportar a mejorar la competitividad de las fundiciones, especialmente pensando en las fundiciones nacionales, transformando la escoria, pasivo ambiental, en dos productos comerciales, y ambos de uso masivo como es el arrabio y aditivos para la industria del cemento.

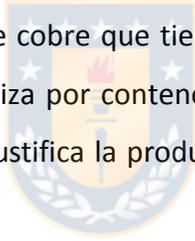
Como ya se precisó en los capítulos anteriores, el concepto de proceso a validar se basa en analogías con el proceso siderúrgico de la producción de arrabio, ya sea de un alto horno en la estructura de una siderúrgica integrada o mediante el concepto de fusión reductora, como es el caso del proceso COREX, proceso que alcanzó la madurez tecnológica y comercial acorde al desarrollo de la propuesta de diferentes procesos de fusión reductora desarrollados en todo el mundo entre la década de los '70 y '80. Los procesos de fusión reductora producen arrabio a niveles de producción menores que el tamaño de un alto horno y no requieren coque, pudiendo usar carbón de diferentes calidades.

Como se precisará adelante, es plausible estimar que el beneficio marginal de estas potenciales ventas puede llegar a ser del orden de 60 US\$/ton (10.8 c/lb Cu), lo cual se debe destinar a la depreciación de la inversión y gastos de comercialización. Estas condiciones permitirían reposicionar a las fundiciones en al menos el segundo cuartil de competitividad a nivel internacional.

La evaluación técnico-económica se realizará en un marco de directo interés en la fundición que actualmente opera un horno eléctrico como etapa de procesamiento de escorias: Fundición Hernán Videla Lira de ENAMI y se puede extender a otras fundiciones como la fundición Ventanas de CODELCO.

4.1.1. Fundición Hernán Videla Lira

La fundición Hernán Videla Lira (FHVL) perteneciente a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), se encuentra ubicada en la localidad de Paipote, aproximadamente a 8 km de la ciudad de Copiapó, en la Tercera Región. ENAMI tiene por objeto fomentar el desarrollo de la minería de la pequeña y mediana escala brindando los servicios requeridos para acceder al mercado de metales refinados en condiciones de competitividad. La Figura 14 nos habla del origen de nuestra materia prima que es la escoria final de cobre que tiene como destino el botadero. Esta escoria, como se ve en la Figura 15, se caracteriza por contener un alto porcentaje de hierro (entre 20 y 50%) condición que para la propuesta justifica la producción de arrabio, lo que se desarrollará en detalle en el modelo económico.



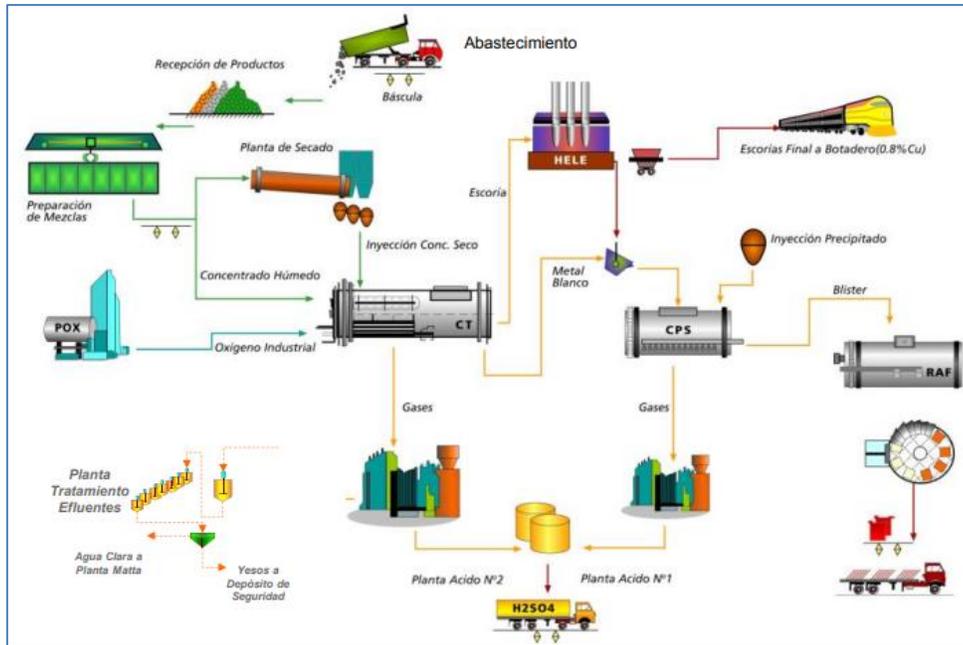


Figura 14. Diagrama de procesos fundición Hernán Videla Lira [69].

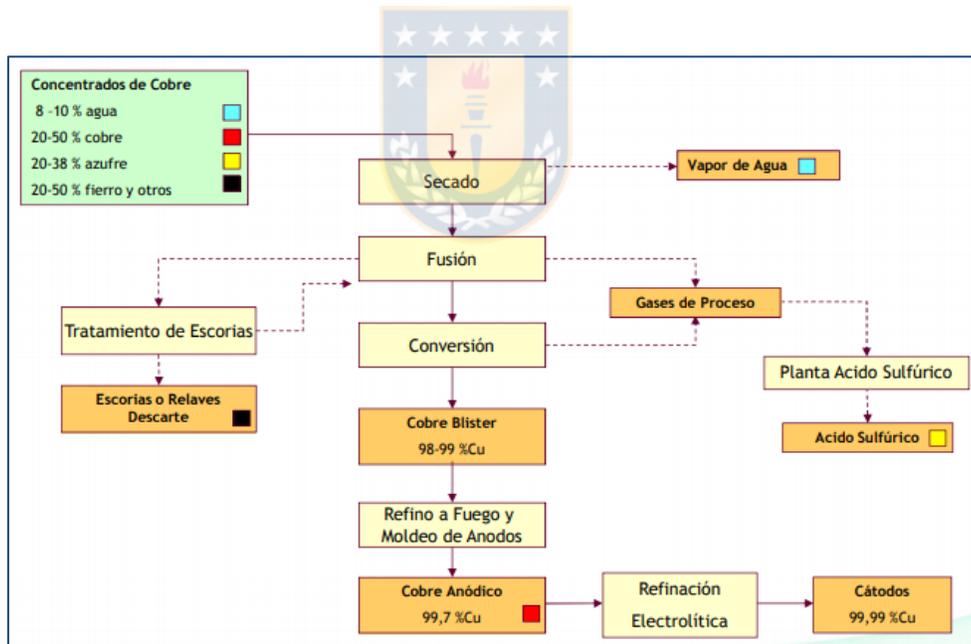


Figura 15. Diagrama de bloques de procesos FHVL [69].

La fundición Hernán Videla Lira, es el lugar en el cual se realizó el estudio de la evaluación económica a considerar dentro de esta propuesta. En la Tabla 17 se observa parte del reporte de sustentabilidad de ENAMI (2017) que da cuenta de la producción anual de toneladas de escorias producidas.

Tabla 17. Residuos masivos mineros período 2015 - 2017 por faena en ENAMI ^[70].

Faena	Relaves (TMS/año)	Escorias (Ton/año)	Estériles (Ton/año)	Ripios de lixiviación (Ton/año)
Planta José A. Moreno (Taltal)	***	***	***	98.339
Planta Osvaldo Martínez (El Salado)	***	***	***	447.486
Planta Manuel A. Matta (Copiapó)	562.769	***	***	173.972
Planta Vallenar	107.294	***	***	94.712
Planta Delta (Ovalle)	611.378	***	51.192	***
Fundición HVL	***	164.015	***	***
Planta Ovalle	***	***	***	***
TOTAL AÑO 2017	1.281.441	164.015	51.192	814.509
TOTAL AÑO 2016	1.310.382	165.407	104.328	1.010.134
TOTAL AÑO 2015	1.628.103	157.511	123.623	1.259.564

***No aplica



4.1.2. Fundición Ventanas

Codelco división Ventanas es una fundición y refinería en donde se procesan los concentrados de cobre para producir principalmente ánodos y cátodos. Este producto está considerado entre los tres mejores a nivel mundial y alcanza una pureza de 99,99%, entregando de esta manera, mayor valor agregado al principal recurso minero del país.

División Ventanas tiene una capacidad anual de producción de 420.000 toneladas en su fundición, 400.000 toneladas en su refinería y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico. Junto a ello, en división Ventanas se produce ácido sulfúrico y sus operaciones se encuentran ubicadas en la zona costera de la región de Valparaíso, específicamente en la comuna de Puchuncaví. El 50% del abastecimiento proviene de los concentrados de los pequeños y medianos mineros desde la IV hasta la VI región, y la otra mitad proviene de la Gran Minería (Divisiones Andina, Teniente y Anglo American).

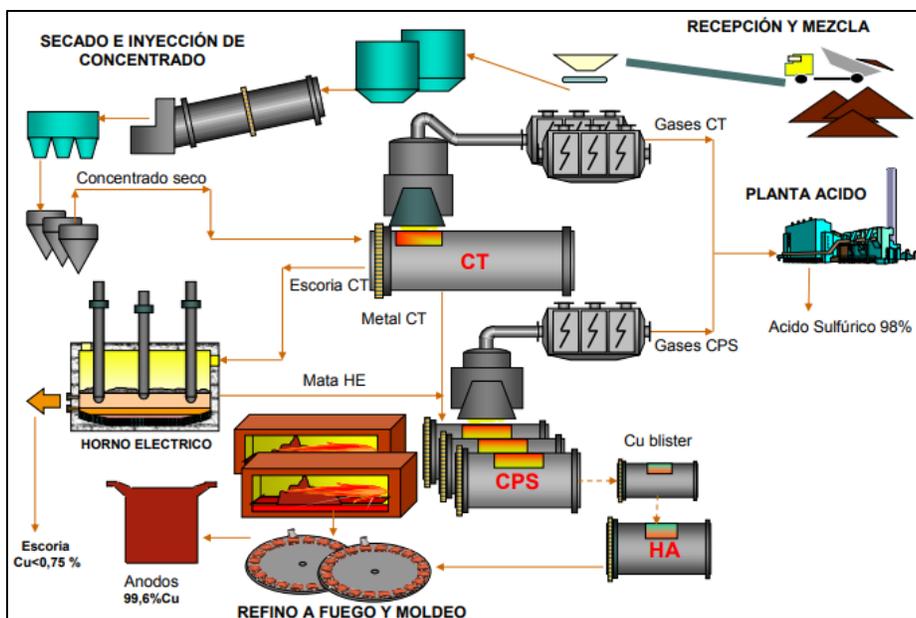


Figura 16. Diagrama de procesos fundición Ventana ^[71].

Para la realización de la evaluación económica se tomarán como referencia la cantidad de escorias de cobre que produce la división Ventana de CODELCO, esto se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Generación de residuos mineros masivos 2018 (miles de toneladas) CODELCO ^[72].

DIVISIÓN	RELAVES	ESCORIA	ESTÉRILES	MINERALES DE BAJA LEY	RIPIOS DE LIXIVIACIÓN
Radomiro Tomic	NA	NA	132.087	0	0
Chuquicamata	61.156	16	54.475	3.291	20.358
Ministro Hales	19.142	NA	108.190	0	0
Gabriela Mistral	NA	NA	11.630	0	13.375
Salvador	9.938	NA	8.403	894	3.409
Ventanas	NA	243	NA	NA	NA
Andina	28.563	NA	25.625	NA	NA
El Teniente	73.776	92	2.101	NA	NA

4.2. Escenarios Técnicos

Se considera evaluar la tecnología en dos tipos de escenarios. El primero buscará comercializar la escoria producida después de la reducción como aditivo para cemento Portland, tomando como base las características químicas de las escorias de alto horno y el modelo de comercialización que han puesto en práctica entre una siderúrgica integrada y las cementeras. El segundo corresponde a producir Clinker y/o Cemento Portland. En este caso la escoria producida tendrá una etapa de ajuste adicional para llegar efectivamente a las características físicas y químicas del cemento Portland. Esto considera para la evaluación económica del proceso aumentar los costos de inversión para producir un producto de mayor precio de venta.

Para cada uno de estos casos se evaluarán diferentes escenarios en los cuales se usarán distintas proporciones de fundentes y/o la escoria de la producción de aceros en un horno eléctrico.



4.2.1. Producción de Aditivo Portland

4.2.1.1. Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente

En el Caso A (como se muestra en la Figura 17), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y una cantidad mínima de fundente (caso que ayuda a economizar en gastos de fundentes, pero hace que el ajuste químico necesite más energía al agregar los componentes finales) para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez producir una escoria en Cemento Portland.

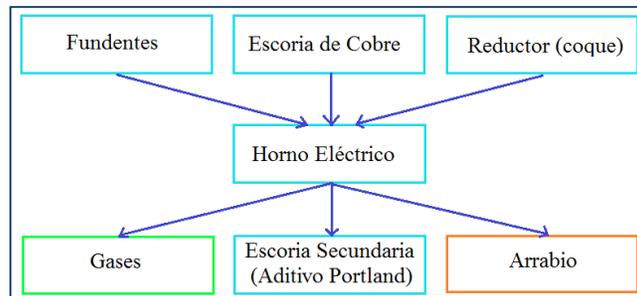


Figura 17. Diagrama de procesos Caso A, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).

4.2.1.2. Caso B: Escoria de cobre con fundente

En el Caso B (como se muestra en la Figura 18), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y una cantidad mayor que en el “Caso A” de fundente (caso que eleva los gastos de fundentes, pero hace que la composición del aditivo sea más cercana a la de Portland) para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en un aditivo para Cemento Portland.

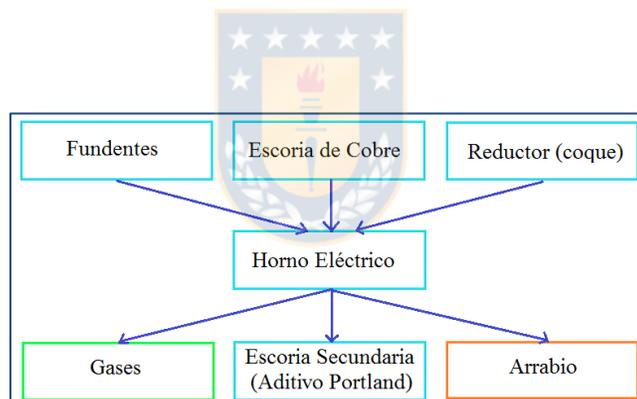


Figura 18. Diagrama de procesos Caso B, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).

4.2.1.3. Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente

En el Caso C (como se muestra en la Figura 19), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y hierro para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en un aditivo para Cemento Portland.

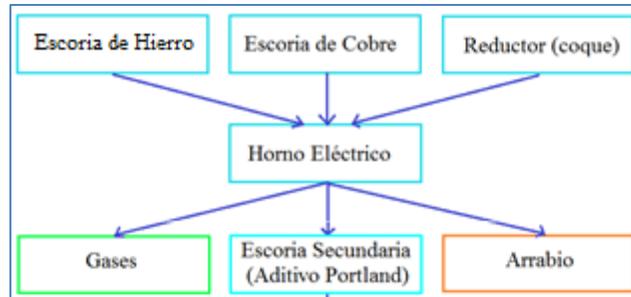


Figura 19. Diagrama de procesos Caso C, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).

4.2.1.4. Caso D: Escoria de cobre y hierro con fundentes

En el Caso D (como se muestra en la Figura 20), se evaluará la opción de partir de una mezcla de escorias de cobre y hierro además de fundentes, para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en un aditivo para Cemento Portland.

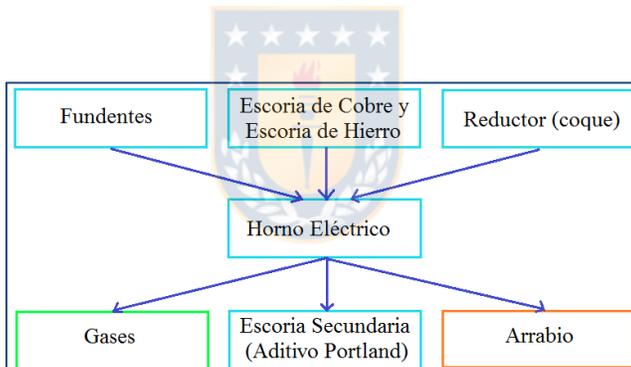


Figura 20. Diagrama de procesos Caso D, para producción de aditivo Portland (Elaboración propia).

4.2.2. Producción de Cemento Portland

Este sub tema a considerar tiene en una primera instancia las mismas características analizadas en el caso de producir un aditivo de cemento, pero la diferencia radica en que luego de obtener la escoria secundaria (producto del horno eléctrico), ésta pasa a una etapa en donde aún en caliente se le adiciona CaO mayoritariamente y aditivos mencionados en la sección anterior, que se componen de pequeñas cantidades de sulfuros y yeso que evitan que fragüe la mezcla y luego, pasan a una etapa de conminución del producto.

4.2.2.1. Caso A: Escoria de cobre con mínima adición de fundente

En el Caso A (como se muestra en la Figura 21), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y una cantidad mínima de fundente (caso que ayuda a economizar en gastos de fundentes pero, hace que la composición del aditivo sea más lejana a la requerida) obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en Cemento Portland.

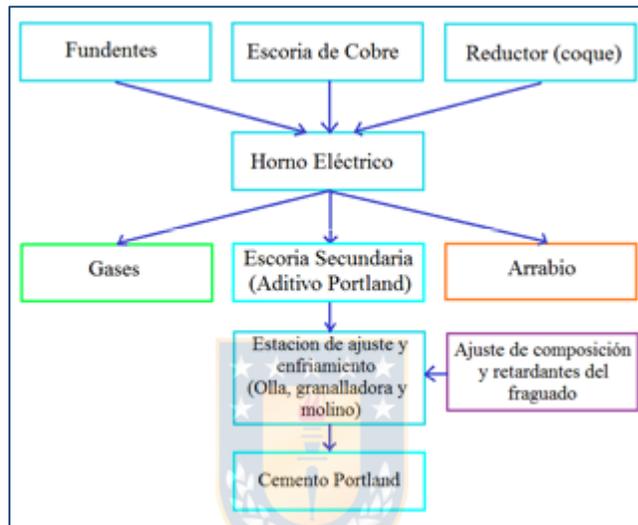


Figura 21. Diagrama de procesos Caso A, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).

4.2.2.2. Caso B: Escoria de cobre con fundente

En el Caso B (como se muestra en la Figura 22), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y una cantidad mayor que en el “Caso A” de fundente (caso que eleva los gastos de fundentes, pero hace que ajuste químico de necesite menos energía al agregar los componentes finales) obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en Cemento Portland.

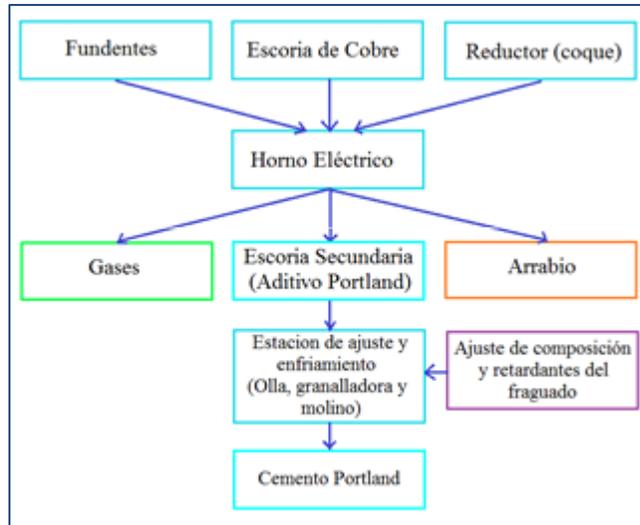


Figura 22. Diagrama de procesos Caso B, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).

4.2.2.3. Caso C: Escoria de cobre usando escoria de hierro como fundente

En el Caso C (como se muestra en la Figura 23), se evalúa la opción de partir de escorias de cobre y hierro para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en Cemento Portland.

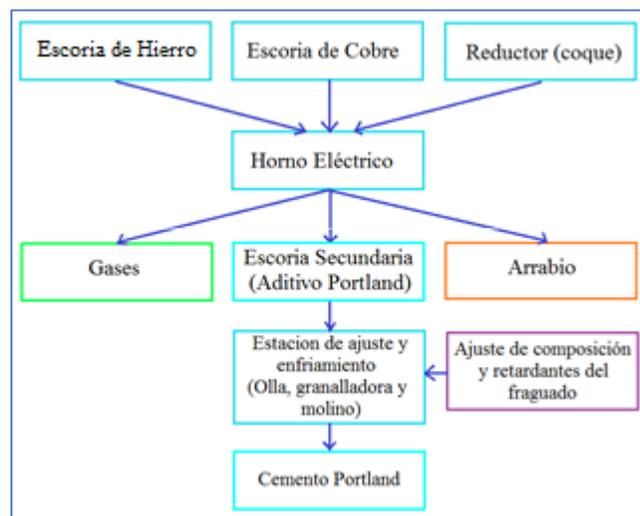


Figura 23. Diagrama de procesos Caso C, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).

4.2.2.4. Caso D: Escorias de Cobre y Hierro con fundente

En el Caso D (como se muestra en la Figura 24), se evaluará la opción de partir de una mezcla de escorias de cobre y hierro, además de fundentes, para obtener arrabio por un proceso “Zero Waste” y a la vez convertir la escoria en Cemento Portland.

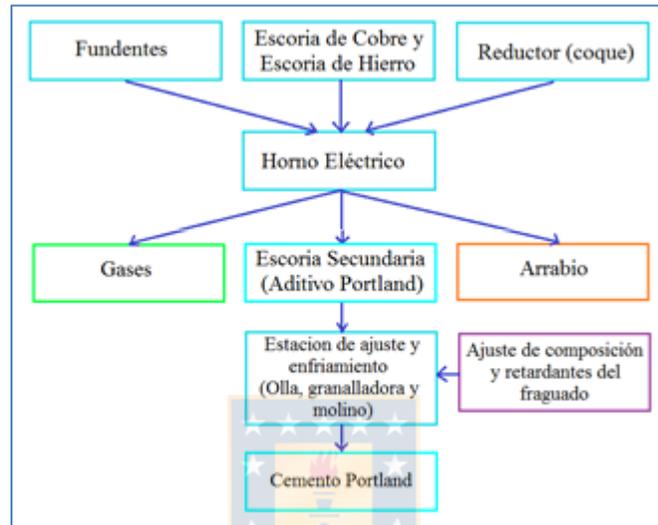


Figura 24. Diagrama de procesos Caso D, para la producción de cemento Portland (Elaboración propia).

4.3. Industria del cemento

En este capítulo se estudiará el mercado de cemento Portland, los principales líderes en producción y consumo desde la plataforma mundial hasta la perspectiva nacional para analizar la factibilidad de posicionarse en el mercado o establecer una coartada económica.

4.3.1. Panorama internacional de la industria del cemento

El consumo mundial de cemento alcanzó las 4.129 Millones de toneladas en 2016, China continuó liderando la demanda de cemento con 2.395 Millones de toneladas en 2016, alcanzando el 58% de la participación mundial y los restantes países son mencionados en la Tabla 19 y

Tabla 20. Excluyendo a China el consumo de cemento mundial alcanzó las 1.734 millones de toneladas en el 2016. La Figura 25 muestra que el PIB mundial lleva una tendencia parecida a la de la producción de cemento, con lo que analizaremos la proyección del mercado para la evaluación económica.

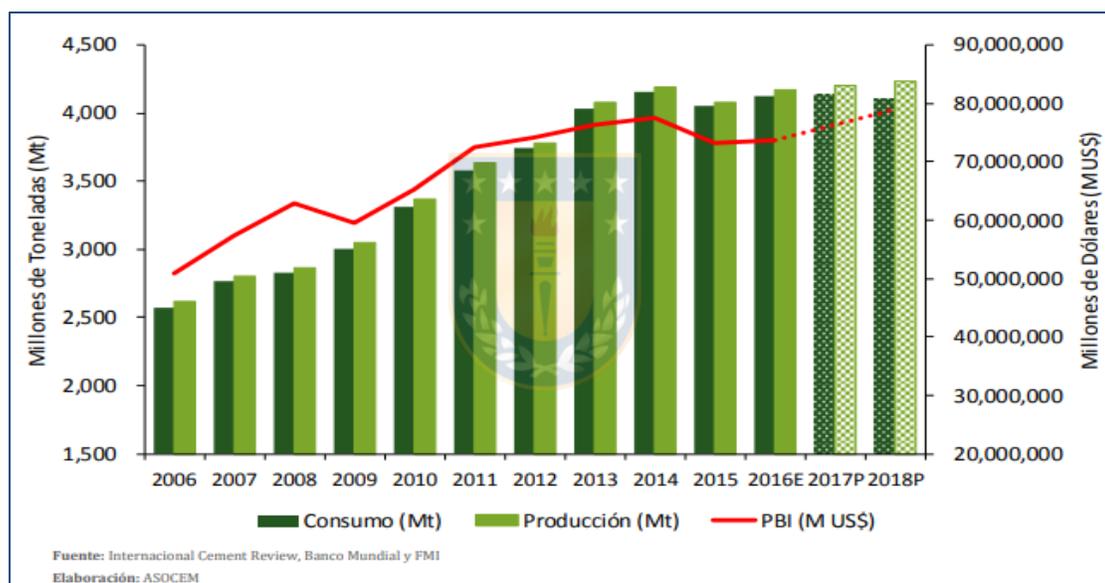


Figura 25. Consumo y Producción de Cemento y PIB del Mundo (2006 - 2018) ^[73].

Tabla 19. Ranking de Consumo de Cemento (en Millones de Toneladas) ^[73].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016E	2017P	2018P
1	China								
	1,850.00	2,050.00	2,171.00	2,400.00	2,466.39	2,339.00	2,395.07	2,347.06	2,280.56
2	India								
	221.04	236.87	241.80	253.89	269.43	273.62	287.84	296.68	301.57
3	USA								
	71.19	72.20	77.88	81.70	89.01	92.92	94.50	98.16	100.51
4	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Turquía	Turquía	Turquía
	60.01	64.97	69.32	70.97	71.70	65.32	67.00	70.64	71.76
5	Irán	Rusia	Rusia	Rusia	Rusia	Turquía	Indonesia	Indonesia	Indonesia
	54.80	57.40	65.20	69.70	70.95	65.00	62.07	65.23	67.85
6	Vietnam	Irán	Irán	Turquía	Turquía	Rusia	Egipto	Egipto	Vietnam
	50.20	56.40	57.56	63.40	64.20	62.97	58.77	64.10	63.82
7	Turquía	Turquía	Turquía	Indonesia	Indonesia	Indonesia	Brasil	Vietnam	Egipto
	50.00	55.70	56.70	58.01	59.91	61.99	57.24	60.04	63.20
8	Egipto	Vietnam	Indonesia	Arabia	Arabia	Arabia	Vietnam	Rusia	Brasil
	49.53	49.20	54.96	55.26	56.56	60.74	56.00	54.55	54.05
9	Rusia	Egipto	Arabia	Irán	Irán	Vietnam	Corea Sur	Corea Sur	Rusia
	49.40	48.69	52.67	54.77	53.58	55.68	55.85	54.29	53.43
10	Corea Sur	Indonesia	Egipto	Egipto	Egipto	Egipto	Rusia	Brasil	Irán
	45.49	48.00	49.20	48.00	51.30	53.66	55.65	53.39	53.16

Tabla 20. Ranking de Producción de Cemento (en Millones de Toneladas) ^[73].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016E	2017P	2018P
1	China	China	China	China	China	China	China	China	China
	1,880.00	2,080.00	2,184.00	2,414.00	2,476.19	2,347.96	2,402.95	2,370.00	2,350.00
2	India	India	India	India	India	India	India	India	India
	224.72	240.51	246.70	255.79	270.52	274.60	288.81	297.68	302.57
3	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA
	66.45	67.90	74.15	76.60	82.60	83.70	85.40	86.56	88.50
4	Turquía	Turquía	Irán	Turquía	Turquía	Turquía	Turquía	Turquía	Turquía
	66.20	67.80	70.25	74.40	72.60	72.80	74.50	80.00	82.00
5	Irán	Irán	Brasil	Brasil	Brasil	Vietnam	Vietnam	Vietnam	Vietnam
	61.60	66.40	68.81	70.16	71.25	71.88	73.50	77.80	81.80
6	Brasil	Brasil	Turquía	Irán	Irán	Brasil	Irán	Irán	Irán
	59.12	64.09	67.60	68.70	70.05	65.28	65.00	67.97	70.46
7	Japón	Japón	Rusia	Rusia	Vietnam	Rusia	Indonesia	Indonesia	Indonesia
	56.60	56.40	61.50	66.30	69.83	61.83	61.10	65.43	68.65
8	Vietnam	Rusia	Japón	Japón	Rusia	Arabia	Japón	Egipto	Egipto
	50.50	56.10	59.30	61.70	68.31	61.49	58.98	64.30	63.70
9	Rusia	Vietnam	Vietnam	Vietnam	Japón	Irán	Egipto	Japón	Japón
	50.40	52.00	54.00	61.00	61.92	60.17	58.89	59.50	61.00
10	Egipto	Arabia	Arabia	Indonesia	Arabia	Indonesia	Brasil	Rusia	Brasil
	47.95	48.36	53.22	56.69	57.22	59.85	57.29	55.45	54.35

4.3.1.1. Clinker de cemento portland

El Clinker es un producto previo al cemento portland en donde aún no se le han añadido los aditivos y fraguadores típicos del producto final. Mencionamos en la Tabla 21 y Tabla 22 la exportación e importación, respectivamente, ya que analizaremos el posicionamiento de este producto en el mercado y además observamos que Chile fue uno de los países que importó Clinker en los últimos años, antecedente que es relevante en esta evaluación económica.

Tabla 21. Exportación de cemento y Clinker ^[73].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016E	2017P	2018P
1	Turquía 19.00	Turquía 14.40	China 13.60	Irán 18.80	Vietnam 20.00	Vietnam 16.20	China 17.56	China 18.00	China 19.75
2	China 16.10	Tailandia 11.16	China 13.60	Vietnam 16.10	Irán 18.74	China 15.60	Vietnam 17.50	Vietnam 17.76	Vietnam 17.98
3	Tailandia 14.20	China 10.60	China 13.60	China 14.60	China 13.75	Irán 15.19	Irán 15.00	Irán 16.00	Irán 17.30
4	Japón 10.30	Irán 10.12	Tailandia 11.47	EAU 12.88	EAU 11.50	EAU 11.50	Tailandia 13.47	Japón 12.30	Japón 13.40
5	Pakistán 9.70	Corea Sur 9.93	EAU 10.60	Turquía 12.40	Turquía 10.90	Turquía 10.70	Japón 11.54	EAU 11.00	EAU 10.50
6	Irán 8.61	Japón 9.80	Japón 9.70	Corea Sur 9.00	Tailandia 10.20	Tailandia 10.43	EAU 11.50	España 9.80	Turquía 10.24
7	Alemania 7.99	EAU 9.50	Corea Sur 8.88	Japón 8.70	España 9.66	Japón 10.18	Turquía 10.50	España 9.80	España 9.90
8	Corea Sur 7.55	Pakistán 9.20	Vietnam 8.70	Pakistán 8.29	Corea Sur 9.53	España 9.26	España 9.78	Turquía 9.36	Tailandia 8.80
9	Taiwán 7.21	Alemania 8.61	Pakistán 8.32	Tailandia 7.99	Japón 9.07	Corea Sur 7.35	Alemania 6.80	Alemania 6.90	Corea Sur 7.10
10	EAU 7.00	Vietnam 7.00	Alemania 7.02	España 7.00	Pakistán 8.05	Alemania 6.64	India 5.88	India 5.95	Alemania 7.00

En la importación de cemento y Clinker, destacamos a Chile en el puesto 15 en 2015 y en el lugar 14 en los años 2017 y 2018. Esto deja en evidencia la necesidad nacional de cemento.

Tabla 22. Importación de cemento y Clinker ^[73].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016E	2017P	2018P
1	Irak 8.00	Irak 10.00	Irak 11.50	Bangladesh 12.58	Bangladesh 10.40	Bangladesh 11.00	Bangladesh 13.40	Bangladesh 15.20	Bangladesh 16.90
2	Nigeria 7.32	Bangladesh 7.92	Bangladesh 11.44	Irak 12.50	Irak 9.30	USA 10.34	USA 11.89	USA 12.90	USA 13.30
3	Bangladesh 7.20	USA 6.54	USA 6.89	USA 7.14	Egipto 8.72	Irak 9.00	Irak 6.00	Irak 6.69	Irak 6.89
4	USA 6.78	Afganistán 5.30	Singapur 5.65	Afganistán 5.96	Argelia 6.23	Argelia 6.46	Sri Lanka 5.25	Sri Lanka 5.70	Sri Lanka 5.90
5	Afganistán 4.70	Singapur 4.67	Afganistán 5.61	Singapur 5.67	USA 6.14	Singapur 5.95	Afganistán 5.22	Afganistán 5.50	Afganistán 5.50
6	Libia 4.80	Nigeria 3.99	Libia 5.20	Rusia 5.02	Afganistán 6.07	Afganistán 5.19	Singapur 5.07	Singapur 5.05	Singapur 5.08
7	Singapur 4.41	Myanmar 3.80	Rusia 5.09	Arabia 4.95	Singapur 5.88	Indonesia 4.59	Camboya 4.72	Camboya 4.84	Myanmar 5.00
8	Angola 3.39	Myanmar 3.80	Ghana 4.50	Libia 4.90	Indonesia 5.32	Sri Lanka 4.56	Ghana 4.63	Myanmar 4.70	Ghana 4.73
9	Myanmar 3.17	Francia 3.54	Myanmar 4.40	Ghana 4.70	Rusia 5.06	Myanmar 4.54	Myanmar 4.50	Ghana 4.69	Australia 4.20
10	Francia 3.07	Francia 3.54	Malasia 3.60	Myanmar 4.40	Myanmar 4.26	Ghana 4.37	Kuwait 4.00	Kuwait 4.10	Australia 4.20
11	Ghana 2.95	Rusia 2.90	Francia 3.45	Argelia 4.36	Sri Lanka 4.20	Camboya 4.00	Argelia 3.90	Australia 4.00	Camboya 3.83
12	Sri Lanka 2.94	Brasil 2.63	Brasil 2.84	Malasia 3.67	Ghana 4.07	Kuwait 3.82	Australia 3.70	C. de Marfil 3.72	C. de Marfil 3.77
13	Vietnam 2.53	Brasil 2.63	Brasil 2.84	Francia 3.25	Camboya 3.82	Australia 3.53	Hong Kong 3.45	Hong Kong 3.48	Hong Kong 3.48
14	Taiwán 2.49	Indonesia 2.50	Argelia 2.75	Kuwait 2.59	Malasia 3.59	Malasia 3.18	Filipinas 3.42	Chile 3.10	Chile 3.28
15	Países Bajos 2.47	Indonesia 2.50	Kuwait 2.60	Países Bajos 2.58	Francia 3.28	Chile 3.15	C. de Marfil 3.35	Reino Unido 2.69	Reino Unido 2.69

4.3.2. Panorama Latinoamericano de la industria del cemento

En Latinoamérica la industria del cemento también está presente (Tabla 23 y Tabla 24), y tanto la oferta como la demanda tienden a equipararse en la mayoría de los países excepto en Chile, donde existe un requerimiento de cemento y, según el crecimiento del mismo, esto puede ser una oportunidad de negocio para la propuesta planteada en esta memoria de título.

Tabla 23. Producción de cemento en Latinoamérica (miles de toneladas) ^[74].

País	2014	2015	2016 E*	2017 F**	% Var (15/14)	% Var (16/15)	% Var (17/16)	Fuente
Argentina	11.408	12.193	10.899	11.960	6,9	-10,6	9,7	AFCP
Bolivia	3.340	3.720	4.020	4.580	11,4	8,1	13,9	ICR
Brasil	71.254	65.283	57.557	53.800	-8,4	-11,8	-6,5	SNIC
Chile	4.220	4.320	4.240	4.280	2,4	-1,9	0,9	ICR
Colombia	12.404	13.047	12.495	12.302	5,2	-4,2	-1,5	DANE
Ecuador	4.830	5.860	5.550	5.690	21,3	-5,3	2,5	ICR
Paraguay	1.030	1.250	1.300	1.360	21,4	4,0	4,6	ICR
Perú	11.058	10.764	10.441	10.368	-2,7	-3,0	-0,7	ASOCEM
Uruguay	830	860	920	940	3,6	7,0	2,2	ICR
Venezuela	7.940	8.210	8.100	8.150	3,4	-1,3	0,6	ICR

*E: Valor estimado
**F: Valor Pronosticado
ICR: International Cement Review

Tabla 24. Consumo de cemento en Latinoamérica (miles de toneladas) ^[74].

País	2014	2015	2016 E*	2017 F**	% Var (15/14)	% Var (16/15)	% Var (17/16)	Fuente
Argentina	11.274	12.125	10.827	12.124	7,5	-10,7	12,0	AFCP
Bolivia	3.560	4.050	4.470	4.750	13,8	10,4	6,3	ICR
Brasil	71.703	65.316	57.784	54.170	-8,9	-11,5	-6,3	SNIC
Chile	5.300	5.570	5.430	5.380	5,1	-2,5	-0,9	ICR
Colombia	11.970	12.807	12.101	11.983	7,0	-5,5	-1,0	DANE
Ecuador	6.516	5.848	5.430	5.560	-10,3	-7,1	2,4	INECYC e ICR
Paraguay	1.490	1.520	1.590	1.610	2,0	4,6	1,3	ICR
Perú	11.220	10.850	10.499	10.555	-3,3	-3,2	0,5	ASOCEM
Uruguay	810	800	850	880	-1,2	6,3	3,5	ICR
Venezuela	7.910	8.140	8.030	8.080	2,9	-1,4	0,6	ICR

*E: Valor estimado
**F: Valor Pronosticado
ICR: International Cement Review

4.3.3 Panorama nacional de la industria del cemento

Las ventas de cemento y hormigón son buenos indicadores del desempeño de la economía de un país. Esto, pues mientras mejores son las expectativas para el crecimiento, mayor es la inversión en construcción y, por consiguiente, superior es la demanda por estos insumos. De acuerdo con los informes reportados a la Comisión para el Mercado Financiero (CMF) por las tres mayores cementeras del país (Melón, Polpaico y Biobío) las ventas de la industria subieron 3% entre julio y septiembre, totalizando \$144.889 millones (ver Tabla 25). En este periodo, sin embargo, las ganancias agregadas de la industria totalizaron \$3.310 millones, cifra 57% menor a la registrada en 2017.

En sus estados financieros, las compañías explicaron que los mayores ingresos se deben principalmente a un aumento en el volumen de ventas de cemento y hormigón impulsados por la mayor actividad económica del período.

Tabla 25. Utilidades e ingresos de las principales Cementeras de Chile entre los periodos 2017 y 2018. ^[75]

Cifras en miles de pesos			
UTILIDADES	SEP-18	SEP-17	VAR. %
Cementos Bío Bío	11.125.049	13.871.161	-19,8
Polpaico	3.150.387	-2.281.081	N.A.
Melon	6.794.408	5.006.319	35,7
Total	21.069.844	16.596.399	27,0
INGRESOS	SEP-18	SEP-17	VAR. %
Cementos Bío Bío	190.886.823	196.361.587	-2,7
Polpaico	121.321.269	96.337.126	25,9
Melon	140.470.521	134.203.283	4,6
Total	452.678.613	426.901.996	12,2

Por otro lado, la Federación Interamericana de Cemento (FICEM) expuso la hoja de ruta para la disminución de la huella de carbono en la industria del cemento, la cual es un conjunto de herramientas eficientes y flexibles que buscan asegurar la contribución a la mitigación de emisiones de CO₂, al igual que el reporte de Producción de Cemento y Clinker en Chile mostradas en la Tabla 26.

Tabla 26. Producción Chilena de cemento y Clinker. ^[76].

FICEM		Reporte País/Macrozona	
Hoja de Ruta CO ₂		País/Macrozona	Chile
		Año datos	2014
		Reporte:	sMRV FICEM 001 CL 2014
		Fecha reporte	jueves, 27 de septiembre de 2018
Producción			
Cemento			
1. Cemento Producido	4.209.547	ton cemento/año	
2. Cementitious Producido	3.386.651	ton cementitious/año	
Clinker			
1. Producido	1.999.736	ton Clinker/año	
2. Consumido	2.822.633	ton Clinker/año	

4.4. Mercado del Arrabio

Según los datos de Observatory of Economic Complexity año 2019, los principales exportadores de Arrabio (Figura 26) son Rusia (\$1.75 Miles de Millones), Ucrania (\$787 Millones), Brasil (\$794 Millones), India (\$209 Millones) y Sudáfrica (\$181 Millones). Los principales importadores (Figura 27) son Estados Unidos (\$1.85 Miles de Millones), Italia (\$527 Millones), Turquía (\$330 Millones), Otros países de Asia (\$200 Millones) y los Países bajos (\$166 Millones).

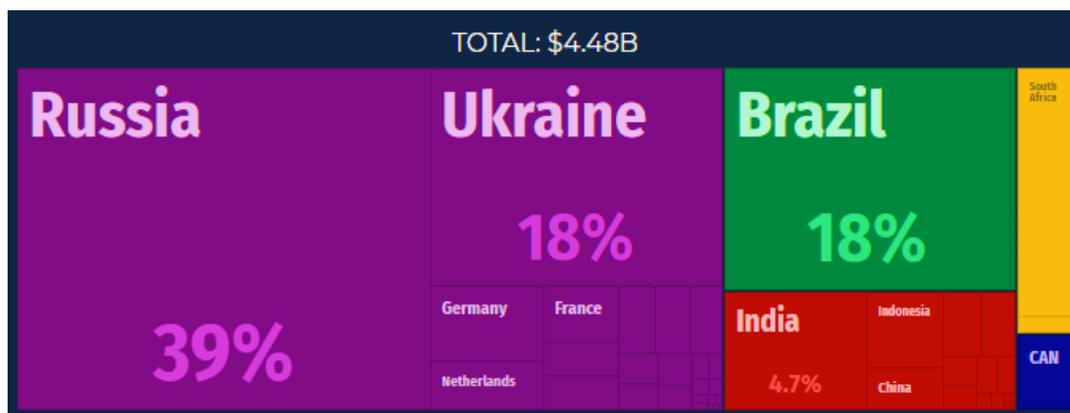
Figura 26. Exportadores de arrabio a nivel mundial ^[77].



Figura 27. Importadores de arrabio a nivel mundial ^[77].

El arrabio es un Commodity, por lo que los precios se establecen de acuerdo a la oferta y demanda en la bolsa de valor mundial y actualmente su precio fluctúa entre los 250 – 350 USD/Ton, como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Exportación e importación de arrabio ^[78].

	Exportación de arrabio, puerto principal fob Mar Báltico, CEI, \$/tonelada		Exportación de arrabio, puerto principal fob Mar Negro, CEI, \$/tonelada		Exportación de arrabio, fob Ponta da Madeira, Brasil, \$/tonelada		Exportación de arrabio, puerto fob de Vitoria/Rio, Brasil, \$/tonelada		Importación de arrabio, cfr Golfo de México, EE. UU., \$/Tonelada	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
18 oct 2019					287	297	272	275	300	310
17 oct 2019	320	325	270	280						
11 oct 2019					282	287	275	280	290	300
10 oct 2019	305	310	270	275						
04 oct 2019					282	287	275	280	290	300
03 oct 2019	305	310	270	280						
27 sep 2019					290	302	275	280	300	315
26 sep 2019	305	310	290	295						
20 sep 2019					312	312	285	300	320	325
19 sep 2019	330	340	295	305						

4.5. Estimación OPEX para el proceso

Los costos operacionales para el estudio comprenden cuatro partes: costos de insumos, costo en Recursos Humanos, costo de energía y costos del traslado de insumos (escoria de acería de la empresa AZA).

4.5.1 Costos Operacionales

La Tabla 28 y Tabla 29 muestran el costo anual en dólares para los insumos que tiene el proceso para obtener Aditivo y Cemento del tipo Portland respectivamente. Cabe precisar que estos insumos están clasificados por etapas, “E1” se refiere a los reactantes que se utilizan en el horno de Reducción, “E2” comprende los productos provenientes del Horno de Reducción y “E3” es la etapa de ajuste para la composición final. Se indica también el valor del arrabio que se vende y representa uno de los ingresos principales del proceso.

Los costos de los insumos fueron obtenidos del informe: Análisis del mercado de insumos críticos en la minería (2018) ^[86] y a la suscripción de revistas financieras donde se anuncian los precios dados por la bolsa de valores a nivel mundial ^[78] y cuyo resumen se presenta en el Anexo I.

Finalmente cabe aclarar que el signo negativo se refiere a egresos y los valores están en USD.

Tabla 28. Ingresos y Egresos Operacionales para la producción de aditivo de Cemento Portland (en dólares)

	Aditivo			
	A	B	C	D
E1: Escoria Cu	0	0	0	0
E1: Escoria Fe	0	0	0	0
E1: Coque	- 6,136,129	- 6,948,988	- 7,071,999	- 7,933,406
E1: CaO	- 2,141,737	- 9,137,475	0	- 8,472,064
E1: Al ₂ O ₃	- 471,642	- 1,906,773	0	0
E1: O ₂	- 86,082	- 102,483	- 88,115	- 105,501
E1: N ₂	- 323,844	- 385,527	- 331,481	- 396,877
E2: N ₂	0	0	0	0
E2: CO	0	0	0	0
E2: CO ₂	0	0	0	0
E2: arrabio	21,011,306	21,011,306	22,315,225	22,315,225
E2: Escoria secundaria	0	0	0	0
E3: CaO	0	0	0	0
E3: Al ₂ O ₃	0	0	0	0
E3: MgO	0	0	0	0
E3: Aditivo Portland	11,058,422	17,641,937	12,814,109	20,002,011
Total	22,910,294	20,171,997	27,637,739	25,409,388

Tabla 29. Ingresos y Egresos Operacionales para la producción de Cemento Portland (en dólares)

	Cemento			
	A	B	C	D
E1: Escoria Cu	0	0	0	0
E1: Escoria Fe	0	0	0	0
E1: Coque	- 6,136,129	- 6,948,988	- 7,071,999	- 7,933,406
E1: CaO	- 2,141,737	- 9,137,475	0	- 8,472,064
E1: Al ₂ O ₃	- 471,642	- 1,906,773	0	0
E1: O ₂	- 86,082	- 102,483	- 88,115	- 105,501
E1: N ₂	- 323,844	- 385,527	- 331,481	- 396,877
E2: N ₂	0	0	0	0
E2: CO	0	0	0	0
E2: CO ₂	0	0	0	0
E2: arrabio	21,011,306	21,011,306	22,315,225	22,315,225
E2: Escoria secundaria	0	0	0	0
E3: CaO	- 20,314,711	- 13,318,973	- 24,450,968	- 15,978,904
E3: Al ₂ O ₃	- 1,471,871	- 224	- 117,107	- 117,107
E3: MgO	- 1,021,403	- 1,021,403	- 36,083	- 36,083
E3: Cemento Portland	42,630,779	42,607,009	48,631,563	48,631,563
Total	31,674,666	30,796,469	38,851,034	37,906,846

4.5.2. Gastos Administrativos

En la Tabla 30 se detallan los costos de los recursos humanos requeridos para el funcionamiento del proyecto, detallando el rol y el pago de sus respectivos servicios que corresponde de igual forma si se pretende como producto final obtener Aditivo o Cemento Portland.

La referencia de los salarios fue extraída desde la información dada del colegio de ingenieros de Chile ^[85], pero actualizadas por los profesores del DIMET en cuanto a los rangos establecidos en las empresas mineras del norte de Chile. Finalmente, dada la incorporación del horno eléctrico y el circuito de molienda y clasificación que incluye una granalladora para la escoria cabe destacar que, se requerirá el servicio de un gerente que vele por el funcionamiento de este nuevo anexo en la fundición, haciendo que se le agregue un cuarto del salario habitual para que destine parte de su tiempo en esta mejora en la planta.

Tabla 30. Gastos administrativos

Recursos Humanos (RRHH)			
Funcionario	Sueldo Anual (USD)	Número de personas	Total
Operador de Terreno	19,200	12	230,400
Operador de Sala	21,600	12	259,200
Auxiliares	12,000	16	192,000
Ingeniero de Proceso	60,000	2	120,000
Jefe de área	76,800	1	76,800
Gerente	36,000	1	36,000
Total		44	914,400

4.5.3 Consumo energético

En la Tabla 31 y Tabla 32 se precisa el costo del consumo energético requerido para las operaciones del horno eléctrico de reducción, el circuito de molienda y clasificación y por último la granalladora. La potencia del horno eléctrico se aproximó en base a la Figura 29 del anexo F dadas las toneladas por día que se tratan. El costo de la energía fue en base al precio medio de mercado informado por la Comisión Nacional de Energía ^[87]. En el caso del circuito de molienda y clasificación, se consultó en el libro: Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland ^[60], donde indica que en la molienda se ocupan entre 90 y 130 KWH/tonelada de cemento producido aproximadamente y se estimó que para la granalladora se utilizaría un cuarto de esta energía.

Tabla 31. Consumo energético para la producción de aditivo de cemento Portland

Consumo Energético		Aditivo			
		A	B	C	D
Horno Eléctrico de reducción	ton /día	895	1,111	979	1,213
	KWH/día	448	552	488	610
	KWH/año	156,800	193,200	170,800	213,500
	USD	14,032	17,289	15,284	19,106
Circuito de molienda y clasificación	ton /día	250	399	289	452
	KWH/ton	22,479	35,862	26,048	40,659
	USD	2,012	3,209	2,331	3,638
Granalladora	USD	503	802	583	910
Total	USD	16,546	21,300	18,198	23,654

Tabla 32. Consumo energético para la producción de cemento Portland

Consumo Energético		Cemento			
		A	B	C	D
Horno Eléctrico de reducción	ton /día	895	1,111	979	1,213
	KWH/día	448	552	488	610
	KWH/año	156,800	193,200	170,800	213,500
	US\$	14,032	17,289	15,284	19,106
Círculo de molienda y clasificación	ton /día	677	676	772	772
	KWH/ton	60901	60867	69474	69474
	US\$	5,450	5,447	6,217	6,217
Granalladora	US\$	1,362	1,362	1,554	1,554
Total	US\$	20,844	24,097	23,056	26,877

4.5.4 Transporte de escorias de la empresa Aza

En la Tabla 33 se entrega el costo de transportar la escoria de acería proveniente de la empresa Aza ubicada en Santiago con destino a la Fundición Hernán Videla Lira ubicada en Copiapó, calculada en base a una distancia de 804 km, utilizando vehículos de carga con capacidad de transportar 49 toneladas aproximadas (ver Anexo H), y requiriendo el total de 38.473 toneladas al año de este material para el caso de aditivo como cemento portland en las alternativas de trabajo "C" y "D".

Tabla 33. Transporte de escorias de acería.

Transporte de Insumos		A	B	C	D
Escoria Fe	Ton/día	0	0	110	110
	USD/año	0	0	1811538	1811538

4.6. Estimación CAPEX para el proceso

Los costos de inversión que implica el proyecto son los relacionados a las unidades del horno eléctrico de reducción y los de la preparación del aditivo o cemento Portland que contemplan: una granalladora utilizada para disminuir los costos energéticos del molino, el círculo de molienda y clasificación y ollas en las cuales se depositarán los productos del proceso.

4.6.1 Costo de equipos

Estos costos se calcularon en base a la capacidad de producción anual a tratar (Tabla 34 y Tabla 35). Se debe considerar que este análisis se propone como una ingeniería de perfil a fin de considerar el posicionamiento del estudio. La estimación del horno eléctrico se detalla en el Anexo G y el costo de los suministros eléctricos del mismo en el Anexo F. En cuanto a la estimación del costo del circuito de molienda y clasificación, esta información está hecha en base a información reservada proveniente de una comunicación personal desde la empresa Glencore, (ex Xstrata Technology).

Tabla 34. Costos de equipos para la producción de aditivo de cemento Portland

Costos de equipos (USD)	Aditivo			
	A	B	C	D
Horno Eléctrico de reducción	7,727,775	8,798,598	8,156,874	9,274,909
Circuito de molienda y clasificación	204,599	270,779	223,512	291,966
Granalladora	102,300	135,390	111,756	145,983
Ollas (arrabio)	9,031	9,031	9,031	9,031
Ollas (aditivo Portland)	14,623	19,538	14,623	19,538
Ollas (cemento Portland)	0	0	0	0
Total	8,058,328	9,233,336	8,515,797	9,741,427

Tabla 35. Costos de equipos para la producción de Cemento Portland

Costos de equipos (USD)	Cemento			
	A	B	C	D
Horno Eléctrico de reducción	7,727,775	8,798,598	8,156,874	9,274,909
Circuito de molienda y clasificación	372,060	371,935	402,652	402,652
Granalladora	186,030	185,968	201,326	201,326
Olla (arrabio)	9,031	9,031	9,031	9,031
Olla (aditivo Portland)	0	0	0	0
Olla (cemento Portland)	27,239	25,445	27,239	27,239
Total	8,322,135	9,390,977	8,797,122	9,915,157

4.6.2 Costos de Inversión

Los costos de inversión dados en la Tabla 36 y Tabla 37, fueron realizados en base a la Tabla 51 del Anexo D.

Tabla 36. Costos de inversión para Aditivo Portland

Aditivo				
Costo de Inversión	A	B	C	D
Costos equipos comprados	8,058,328	9,233,336	8,515,797	9,741,427
Costos equipos instalados	13,699,158	15,696,671	14,476,854	16,560,427
Cañerías (Piping)	2,739,832	3,139,334	2,895,371	3,312,085
Instrumentación	1,027,437	1,177,250	1,085,764	1,242,032
Edificios y trabajos de edificación	5,479,663	6,278,668	5,790,742	6,624,171
Auxiliares	8,630,469	9,888,903	9,120,418	10,433,069
Costo total físico	31,576,558	36,180,827	33,369,149	38,171,783
Ingeniería y construcción	11,051,795	12,663,289	11,679,202	13,360,124
Contingencias	4,736,484	5,427,124	5,005,372	5,725,767
Total	47,364,837	54,271,240	50,053,724	57,257,675

Tabla 37. Costos de inversión para Cemento Portland

Cemento				
Costo de Inversión	A	B	C	D
Costos equipos comprados	8,322,135	9,390,977	8,797,122	9,915,157
Costos equipos instalados	14,147,629	15,964,661	14,955,107	16,855,767
Cañerías (Piping)	2,829,526	3,192,932	2,991,021	3,371,153
Instrumentación	1,061,072	1,197,350	1,121,633	1,264,183
Edificios y trabajos de edificación	5,659,052	6,385,864	5,982,043	6,742,307
Auxiliares	8,913,006	10,057,737	9,421,718	10,619,133
Costo total físico	32,610,284	36,798,544	34,471,522	38,852,544
Ingeniería y construcción	11,413,600	12,879,490	12,065,033	13,598,390
Contingencias	4,891,543	5,519,782	5,170,728	5,827,882
Total	48,915,427	55,197,816	51,707,283	58,278,816

4.7. Modelo de negocios

Los escenarios de evaluación para un modelo de negocios que se propone en este estudio se basa en la obtención de dos productos comerciales: arrabio y aditivo para cemento Portland o cemento Portland. Un esquema de los escenarios para el modelo de negocio se resume en la Figura 28.

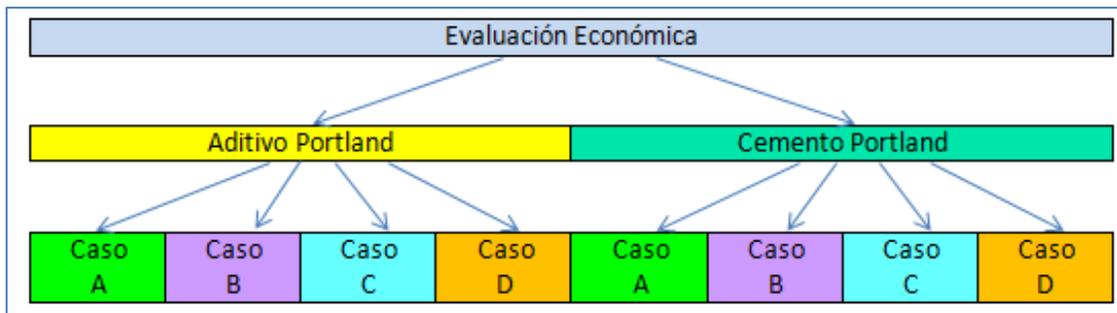


Figura 28. Modelo económico de casos a evaluar (Elaboración Propia)

Siendo el objetivo de este estudio una evaluación técnica y económica, la presentación de este modelo de negocio es a título ilustrativo y una propuesta que deberá en el futuro analizarse en profundidad para poder dar un mayor sustento a la propuesta en desarrollo. Los conceptos que deberán considerarse en un modelo de negocio asociado al proceso son, al menos, los siguientes:

- La composición de la escoria de Cobre y la de Hierro calzan perfectamente con el del cemento Portland o una composición que tiene valor como aditivo.
- La escoria de Cobre tiene un porcentaje aproximado de 50% de FeO_x , del cual mediante el proceso de reducción se obtiene arrabio.
- Las Escorias son un pasivo ambiental, es decir que según estudios mencionados en los capítulos anteriores sobre la normativa vigente estos podrían constituir un peligro y contaminar aguas subterráneas y/o superficiales con trazas de elementos nocivos.
- Al procesar las escorias, antiguamente pasaban a ser parte de escoriales o terminaban como relave en el proceso de flotación de escorias. Con este proceso los pasivos eliminarán los costos de disposición y mantenimiento de escoriales y tranques de relave, siendo estos últimos de alto impacto.

- Consideraciones de proceso que pueden ser objeto de optimizaciones: Se debe analizar las temperaturas de trabajo para establecer una relación entre consumo de energía y uso de fundentes en una relación costo/beneficio como función de optimización. En este caso resulta relevante la adición de CaO para la fluidización de la escoria secundaria y definir la proporción de adición posterior.
- La evaluación económica se enfocó en la fundición Hernán Videla Lira, pero el estudio se puede hacer extensivo a las demás fundiciones que cuenten con características similares.
- El estudio se realizó con la necesidad potenciar las fundiciones chilenas, la tecnología y el desarrollo del país, para que estas sean más competitivas a nivel internacional.
- En el mercado nacional se importa cemento Portland, es decir, que el proyecto puede abarcar parte de la demanda, no así como en los países latinoamericanos donde el margen de producción y requerimiento del producto es estrecho según la información analizada.
- Al vender estos productos (aditivo o cemento Portland) el proyecto se hace aún más “verde” al bajar las cuotas de emisiones de CO₂ que tienen las cementeras.
- De acuerdo con el estudio económico realizado sobre 8 alternativas, todas resultaron ser viables, pero destacamos que la mejor opción a desarrollar fue el caso C, tanto como para la fabricación de Aditivo como para Cemento, el cual incluye una mezcla de escorias de cobre y de acería, con un reductor (coque) y con la mínima adición de fundentes.

4.7.1. Flujos de caja

A continuación detallaremos el informe financiero de los ingresos y egresos que formula esta ingeniería de perfil a través de los flujos de cajas de los distintos casos analizados.

4.7.1.1. Flujos de cajas producción Aditivo de Cemento Portland

En esta sección observaremos los flujos de caja en la cual se analiza tener como producto un aditivo para cemento Portland para los casos A, B, C y D mostrados en la Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 y Tabla 41 respectivamente, descritos en las secciones anteriores de este documento.

Tabla 40. Flujo de caja caso C para la producción de Aditivo de cemento Portland

Flujo de caja caso C					
Año	0	1	2	3	4
Inversión Inicial	50,053,724	0	0	0	0
Ingresos operacionales	0	35,129,334	35,129,334	35,129,334	35,129,334
Costos Operacionales	0	9,321,332	9,321,332	9,321,332	9,321,332
Gastos Adm. (RRHH)	0	914,400	914,400	914,400	914,400
Utilidad Neta	-\$ 50,053,724	\$ 24,893,602	\$ 24,893,602	\$ 24,893,602	\$ 24,893,602

5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0
35,129,334	35,129,334	35,129,334	35,129,334	35,129,334	35,129,334
9,321,332	9,321,332	9,321,332	9,321,332	9,321,332	9,321,332
914,400	914,400	914,400	914,400	914,400	914,400
\$ 24,893,602					

Tabla 41. Flujo de caja caso D para la producción de Aditivo de cemento Portland

Flujo de caja caso D					
Año	0	1	2	3	4
Inversión Inicial	57,257,675	0	0	0	0
Ingresos operacionales	0	42,317,235	42,317,235	42,317,235	42,317,235
Costos Operacionales	0	18,743,040	18,743,040	18,743,040	18,743,040
Gastos Adm. (RRHH)	0	914,400	914,400	914,400	914,400
Utilidad Neta	-\$ 57,257,675	\$ 22,659,796	\$ 22,659,796	\$ 22,659,796	\$ 22,659,796

5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0
42,317,235	42,317,235	42,317,235	42,317,235	42,317,235	42,317,235
18,743,040	18,743,040	18,743,040	18,743,040	18,743,040	18,743,040
914,400	914,400	914,400	914,400	914,400	914,400
\$ 22,659,796					

4.7.1.2. Flujos de cajas producción Cemento Portland

En este aparato observaremos los flujos de caja en la cual se analiza obtener como producto cemento Portland para los casos A, B, C y D mostrados en la Tabla 44, Tabla 45, Tabla 44 y Tabla 45 respectivamente, descritos en las secciones anteriores de este documento.

4.7.2. Resultado financiero

Los resultados de la evaluación económica entregan índices de rentabilidad atractivos para buscar el financiamiento de este proyecto. En la Tabla 46 y Tabla 47 se muestran estos índices para la producción de aditivo como para cemento Portland respectivamente.

Los escenarios evaluados abarcan una razonable diversidad de escenarios para un escenario específico de instalar este proceso en la fundición Hernán Videla Lira de ENAMI. Otros escenarios y ubicaciones determinarían resultados diferentes pero en ningún caso podrán determinar resultados que no sean atractivos dado los altos valores de TIR y VAN que se obtuvieron.

Tabla 46. Índices de rentabilidad para producción de aditivo Portland.

Índices de Rentabilidad para producción de Aditivo Portland				
Caso	A	B	C	D
Tasa descuento	10%	10%	10%	10%
VAN	\$ 87,688,739	\$ 63,927,477	\$ 102,906,686	\$ 81,976,960
TIR	45%	33%	49%	38%
IVAN	\$ 1.85	\$ 1.18	\$ 2.06	\$ 1.43

Tabla 47. Índices de rentabilidad para la producción Cemento Portland

Índices de Rentabilidad para producción de Cemento Portland				
Caso	A	B	C	D
Tasa descuento	10%	10%	10%	10%
VAN	\$ 139,965,012	\$ 128,266,493	\$ 170,124,125	\$ 157,727,485
TIR	62%	53%	69%	60%
IVAN	\$ 2.86	\$ 2.32	\$ 3.29	\$ 2.71

5. Resultados y Discusiones

Se realizaron dos balances de masa, el primero para los casos A y B y el segundo para los casos C y D. A partir de los balances de masa anteriores se crearon cuatro balances de Energía uno para cada caso (A, B, C, D), estos tanto para el caso de producción de Aditivo como para Cemento Portland.

La composición estratégica, de las proporciones de reductor y fundentes, fueron seleccionada con especial interés en trabajar a una temperatura de aproximadamente 1500°C y con la condición de que composición entre los elementos mayoritarios, en este caso CaO y Al₂O₃, fueran lo más semejante posible al del cemento Portland.

En el estudio se sugiere el uso de un horno eléctrico para la reducción de la escoria, pero es posible utilizar otras tecnologías como la segunda parte del horno COREX o un horno tipo Shaft, decisión que sería efectiva tomar luego de realizar pruebas a nivel de laboratorio para que el proceso pueda ser más eficiente, e idealmente realizar un pilotaje de este proyecto.

El modelo económico propuesto busca considerar todas las condiciones necesarias para que un estudio de la ingeniería de perfil pueda dar pie a una confirmación que permita definir el escenario con la mejor rentabilidad, validando que éste corresponde a la producción de Cemento Portland del caso C, donde no se requiere un fundente para el horno eléctrico de reducción y utilizando la mezcla se escorias de cobre y acería más coque como reductor. De esta manera se elimina un pasivo ambiental, se reducen los costos de depósito de escorias, se induce una disminución de la cuota de CO₂ emitida por las cementeras y se fomenta una economía circular a nivel nacional.

Como se explica en el estudio de mercado Chile importa cemento, lo cual indica que la idea tratada en este estudio puede abarcar parte de la demanda nacional. En cuanto a los países de la región estos muestran un estrecho margen entre su producción y el consumo nacional.

6. Conclusiones y Recomendaciones

El análisis propuesto en esta memoria de título se considera un proceso original dada la propuesta de incentivar la economía circular de las fundiciones y refinerías, promover el concepto “Zero Waste” en la industria metalúrgica y principalmente por el avance técnico de obtención de arrabio a través de las escorias de cobre y hierro y a su vez, la producción de aditivo o cemento Portland.

El estudio técnico-económico arrojó resultados viables en todas sus propuestas analizadas, por lo que la elección de la mejor alternativa se basa en la que deja mayores utilidades (caso C en la producción de Cemento Portland).

Se recomienda:

Realizar un estudio cinético (a nivel de laboratorio) para determinar la rapidez específica de reducción de escorias de cobre para la producción de arrabio. Con el fin de validar el concepto a mayor escala, es necesario determinar la tasa específica de reacción de reducción (en términos de la tasa de moles de FeO reducidos por unidad de área de reacción) y se sugiere contar con un analizador en línea de gases para seguir las reacciones de reducción a partir de la composición de la fase gaseosa, en términos de la relación CO/CO_2 . Es importante considerar un sistema de captación de gases eficiente para obtener mediciones adecuadas sobre la evolución de producción de estos gases como resultado de las reacciones de reducción.

Caracterizar del fenómeno de espumación y su implicación en el rendimiento del proceso de reducción de escorias.

El proceso en desarrollo requiere un análisis teórico y experimental para definir las condiciones de operación y la mejor ruta tecnológica para el proceso de mezcla y conminución de escoria.

Finalmente se estima continuar con la ingeniería tras la investigación, ya que es un proyecto sustentable económicamente, ayuda a disminuir los niveles de CO_2 emitidos en Chile por la producción de cemento, elimina un pasivo ambiental, se extrae arrabio que es un *commodity* y ayuda a posicionar competitivamente las fundiciones en Chile.

7. Biografía

1. An overview of recovery of metals from slags, Huiting Shen and E. Forsberg. *Waste Management*, 23, (2003), 933-949.
2. Use of steelworks slag in Europe. Geiseler, J. *Waste Management*. 16 (1-3), 59-63.
3. Solid wastes generation in steel industry and their recycling potential. Sushovan Sarkar and Debabrata.
4. *Slag-Iron and Steel*. Rustu S. Kalyoncu. 2000.
5. Utilization of waste copper slag to produce directly reduced iron for weathering resistant steel. Zhou Xian-Lin, Zhou De-Qing, Pan Jian and Wu Teng-JiaO. *ISIJ International*, Vol. 55 (2015), No. 7, pp. 1347-1352.
6. A new technology for copper slag reduction to get molten iron and copper mate. Juan Zhang, Yuan-Hong Qi, Ding-Liu Yan, Hai-chuan Xu. 2015, 22(5), pp. 396-401.
7. Mechanism of composite additive in promoting reduction of copper slag to produce direct reduction iron for weathering resistant steel. *Powder Technology*. Zhengqi Guo, Jian Pan, Deqing Zhu and Yang Congcong. 329 (2018) pp. 55-64.
8. A physico-chemical separation process for upgrading iron from waste copper slag. *International Journal of Mineral Processing*. Byung-Su Kim, Seul-Ki Jo, Doyun Shin, Jae-Chun Lee, Soo-Bock Jeong. 124 (2013) 124-127.
9. Recovery of iron from copper tailings via low-temperature direct reduction and magnetic separation: process optimization and mineralogical study. Rui-min Jiao, Peng Xing, Cheng-Yan, Bao-Zhong Ma and Yong-Qiang Chen. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. Volume 24, Number 9, September 2017, pp. 974.
10. Use of waste copper slag, a sustainable material. Krishna Murari, Rafat Siddique and K.K. Jain. *J Matter Cycles Waste Manag.* (2015) 17. pp. 13-26.
11. The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention. Harvey Alter. *Resources, Conservation and Recycling*. 43 (2005) pp. 353-360.
12. Recovery of iron from copper flash smelting slags. D. Busolic, F. Parada, R. Parra, M. Sánchez, J. Palacios and M. Hino. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C)*. Vol. 120 (2011), No. 1, pp. 32-36.

13. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. M. Sánchez and M. Sudbury. *Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy*. 49 (2) B (2013). pp. 161-168.
14. Wastes as resources: update on recovery of valuable metals from copper slags. J. Palacios and M. Sánchez. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C)*. Vol. 120 (2011), No. 4, pp. 218-223.
15. Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag. Prince Sarfo, Avimanyu Das, Fary Wyss and Courtney Young. *Waste Management*. 70 (2017). pp. 272-281.
16. A physico-chemical separation process for upgrading iron from waste copper slag. *International Journal of Mineral Processing*. Byung-Su Kim, Seul-Ki Jo, Doyun Shin, Jae-Chun Lee, Soo-Bock Jeong. 124 (2013) 124-127.
17. Thermodynamic analysis of separating synchronously copper and iron components from copper smelting slags. Hongyang Cao, Guojuan Li, Jimin Wang and Zhiqiang Liu. *Procedia Environmental Sciences* 31 (2016) pp. 675-682.
18. A new technology for copper slag reduction to get molten iron and copper mate. Juan Zhang, Yuan-Hong Qi, Ding-Liu Yan, Hai-Chuan Xu. 2015, 22(5), pp. 396-401.
19. Recovery of Iron and removal of hazardous elements from waste copper slag via a novel aluminothermic smelting reduction (ASR) process. Jung Ho Heo, Yongsug Chung and Joo Hyun Park. *Journal of Cleaner Production*. 137 (2016) pp. 777-787.
20. Direct reduction experiment on iron-bearing waste slag. Cheng Xiang-Li, Zhao Kai, Qi Yuan-Hong, Shi Xue-Feng and Zhen Chang-Liang. *Journal of Iron Steel Research, International*. 20(3) (2013). pp. 24-29.
21. Recovery of iron from copper slag by deep reduction and magnetic beneficiation. Ke-Qing Li, Shuo Ping, Hong-Yu Wang and Wen Ni. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. Volume 20, Number 11, (2013). pp. 1035.
22. Recovery of by-products from Chilean copper slag. Busolic, D., Parada, F., Sánchez M., Carrasco, J., Ulloa, A. and Palacios J. Proc. VIII Int. Con fon "Clean Technologies of the World Mining Industry", Santiago, Chile, April 2008, CTWMI, pp. 57-72.

23. Reduction of Chilean copper slags: a case of waste management project. González, C., Parra, R., Klenovkanova, A., Imris, I. and Sánchez, M., *Scand. J. Metall*, 34 (2005), pp. 143-149.
24. Molybdenum recovery from copper smelter slag. Parada, F., Carrasco, J., Sánchez, M., Reghezza, A., Zuñiga, J. and Caballero, C. *Proc. Copper '07 Conf. Vol. III, Book 2, A.* (E.M. Warner, C.J. Newman, A. Vahed., D. B., George, P.J. Mackey, A. Warczok, Eds.), 2007, pp. 95-107.
25. Recovery of iron-molybdenum alloy from copper slags. Parada, F., Parra, R., Watanabe, T., Hino, M., Palacios, J. and Sánchez, M., *Proc. VIII Int. Conf. on "Molten slags, fluxes and salts"*, Santiago, Chile. January 2009, Gecamin Ltd and the Universidad de Concepción. pp. 349-356.
26. Management of copper pyrometallurgical slags: giving additional value to copper mining industry. M. Sánchez, F. Parada, R. Parra, F. Márquez, R. Jara, J. Carrasco and J. Palacios. *Proc. VII Int. Conf. on "Molten slags, fluxes and slats"*, Cape Town, South Africa, January 2004, SAIMM. pp. 543-550.
27. Informe Final de Proyecto Fondef No. D02I1159 "Obtención de Subproductos con Valor Comercial a partir de Escorias Pirometalúrgicas de Fundiciones de Concentrados de Cobre de la Gran Minería de Chile". Mario Armando Sánchez Medina, 2006. Universidad de Concepción, Chile.
28. Study on recovering iron from smelting slag by carbothermic reduction. Yalong Liao, Xijuan Chai, Jiangtao Li, Dongbo Li. *Advanced Materials Research*. Vol. 382. pp. 422-426.
29. Physical Model of Slag Foaming. Yui Ogawa, Didier huin, Enri Gaye and Naoki Tokumitsu. *ISIJ International*. Vol 33 No. 1 (1993), pp. 224-232.
30. A multiphase fluid mechanics approach to gas holdup in bath smelting process. H. Gou, G.A. Irons and W-k, Lu. *Metallurgical Transactions B*, Vol. 27B (1996). pp. 195-201.
31. Rate of FeO reduction from $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ slag by carbon saturated iron. W.O. Philbrook and L.D. Kirkbride. *Journal of Metals*, (1956), pp. 351-356.
32. D.I, Ruidjonkov, D.M. Golenho and L.M. Cheliadinov. *Izv.VUZ. Chern. Metall.*, No. 4, 19 (1960).

33. V.V. Kondakov, D.I. Ruidjonkov, and D.M. Golenho. *Izv.VUZ. Chern. Metall.*, No. 4, 23 (1960).
34. Reduction of Iron and Silicon from slags melts by means of carbon. *Izv. Akad. Nauk. SSSR. Metall. Gorn. Delo*, 1 (1964), pp. 32-35. *Chemical Abstracts* 60, 1964, 14166.
35. Untersuchung über die Reaktionen flüssige hochreine (II)-Oxidhaltige Schlacken mit 146 festen Kohlenstoff. H. Krainer, H.P. Beer and H. Brandi. *Tech. Mitt. Krupp. Forsh. Ber*, 24 (1966). pp. 139.
36. Rates and mechanisms of FeO reduction from slags. Fay Fun. *Metallurgical Transactions*, Volume 1, (1970). pp. 2537-2541.
37. Kinetics of reaction between liquid iron oxide slags and carbon. M.W. Davies, G.S.F. Hazeldeand and P.N. Smith. *The Richardson Conference, Physical Chemistry of Process Metallurgy*, London, 1974.
38. Reduction of iron oxide contained in molten slags with solid carbon. Masayasu Sugata, Takashi Sugiyama and Shin-ichi Kondo. *Transaction ISIJ*, vol. 14, (1974), pp. 88-95.
39. Reduction of Molten iron ore with solid carbon. Kenji Takahashi, Masayoshi Amatatsu and Tanekazu Söma. *Tetsu to Hagane*, Vol. 61, No. 11 (1975), pp. 2525-2530.
40. Reduction Mechanism of Molten Iron Oxide by solid carbon. Yasushi Sasaki and Tanekazu Söma. *Metallurgical Transactions*, Vol. 8B (1977), pp. 189-190.
41. Kinetics of core reduction of molten slag rich in iron oxide. C. Borgianni. *Ironmaking and Steelmaking*, No. 2 (1978), pp. 61-66.
42. F. Tsukihashi, M. Amatatsu and T. Soma. *Tesu to Hagané*, No. 68 (1982) pp. 1980.
43. Reducing rate of iron oxide in molten slag by carbon in molten iron. Akira Sato, Goro Arange, Fumio Hirose, Ryuichi Nakawa and Shiro Yoshimatsu. *Transaction ISIJ*, Vol. 24 (1984), pp. 808-815.
44. Reduction of FeO in Molten Slag by solid carbon in the electric arc furnace operation. Masatoshi Ozawa, Syuzo Kitawa, Suguru Nakayama and Yoshironi Takesono. *Transaction ISIJ*, Vol. 26 (1986) pp. 621-628.
45. Reduction of iron oxides from liquid ferrous slags by blast furnace coke. Jan Mróz. *Scandinivian Journal of Metallurgy*, Vol. 16, 1987, pp. 16-22.

46. Mechanism on reaction of a system consisting of solid carbon and molten slag. A.O. Fedotov, A.P. Mel'nik, V.A. Ershov, K.V. Gabeev and B.A. Lavrov. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, Vol. 60, No. 4, (1987), pp. 856-861.
47. Reduction rates of molten iron oxide by solid carbon or carbon un in molten iron. Akira Sato, Goro Aragane, Kazushige Kamihira and Shiro Y-osimatsu. *Transaction ISIJ*, Vol. 27, 1986, pp. 789-896.
48. Experimental Study on the reduction of FeO in LD slag. Cen Yongquan and Chen Qizhong. *Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, ISIJ*, (1990), pp. 159-165.
49. Reduction of Molten Iron Oxide-Based Slags by Solid Graphite. Shigeta Hara and Kazumi Ogino. *Tetsu to Hagané*, Vol. 76, No. 3 (1990), pp. 360-367.
50. Effect of slag foraming on the reduction of iron oxide in molten slag by graphite. Mohammad Shikhshab Bafghi, Hirohide Kurimoto and Masamichi Sano. *ISIJ International*, Vol 32, No. 10, 1992, pp. 1084-1090.
51. Effect of slag composition on the kinetics of the reduction of iron oxide in molten slag by graphite. Mohammad Shikhshab Bafghi, Hirohide Kurimoto and Masamichi Sano. *ISIJ International*, Vol. 32, No. 12, 1992, pp. 1280-1286.
52. Reduction of FeO in Smelting Slags by solid carbon: experimental results. B. Sarma, A.W. Cramb and R. J. Fruehan. *Metallurgical Transactions B*, Vol. 27B, 1996. pp. 717-730.
53. Kinetics of reduction of FeO in CaO-SiO₂-FeO slags. Part 1 Reduction by solute carbon. P.K. Paranguru, H.S. Ray and P. Basu. *Ironmaking and Steelmaking*. Vol 23, No. 4, 1996, pp. 328-334.
54. Kinetics of reduction of FeO in CaO-SiO₂-FeO slags. Part 2 Reduction by solid carbon. P.K. Paranguru, H.S. Ray and P. Basu. *Ironmaking and Steelmaking*. Vol 23, No. 5, 1996, pp. 411-415.
55. Influence of Slag and Foam Characteristics on Reduction of FeO-Containing slags by Solid Carbon. P.K. Paramguru, R.K. Galgali and H.S. Ray, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 28B, (1997), pp. 805-810.
56. Reaction Mechanism on the smelting reduction of iron ore by solid carbon. Jae-Cheol Lee, Dong-Joon Min and Sung-Soo Kim, *Metallurgical and Material Transactions B*, Vol. 28B, (1997), pp. 1019-1028.

57. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I: Foaming Parameters and Experimental Results. Kimihisa Ito and R. J. Fruehan. Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, (1989), pp. 509-514.
58. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part II: Dimensional Analysis and Foaming in iron Steelmaking Processes. Kimihisa Ito and R. J. Fruehan. Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, (1989), pp. 515-521.
59. Estudio de la recuperación de hierro, cobre y molibdeno desde escorias de cobre mediante reducción con coke. Informe de Memoria de Título de Dusan Alejandro Busolich Darlas. Universidad de Concepción, 2007.
60. Miguel Ángel Sanjuán Barbudo y Servando Chinchón Yepes. Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland, publicación Universidad de alicante, pp. 21.
61. Roadmap Cement Sustainability Initiative (CSI) 2018.
62. Prachethan Kumar, P; Dasu. A.V.R.R; Ranjan. M.; Naha, TH.; #Influence of operational parameter on silicon in hot metal from Corex. Ironmaking and Steelmaking 2008 Vol. 35 No 2 pp. 10&114.
63. Compósitos de Escorias de ENAMI
64. Manso, J.M.; González J.J.; Polanco J.A.: "Electric arc furnace slag in concrete". Journal of Materials and Civil Engineering, Vol. 16, No. 6, Diciembre 2004.
65. Compósitos de Escorias de Acería Gerdau Aza
66. <https://slideplayer.es/slide/3709667/>
67. Davené J and Herberson J. "To Make the Most of Steelmaking Slag". In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economy Aspects*, GTC print AB, 16-20 June 2002. Luea, Sweden, Volume 1, pp.243-255. ISBN 91-631-2361-4.
68. Estudio "Estado del arte y visión de futuro en fundición y refinería", programa alta ley, agosto 2015.
69. www.enami.cl
70. Reporte de sustentabilidad ENAMI 2017
71. www.codelco.cl
72. Reporte de sustentabilidad 2018 CODELCO
73. Panorama mundial de la industria del cemento, ASOCEM (International Cement Review).

74. Adaptación Informe Estadístico FICEM 2018 (International Cement Review).
75. Diario online PressReader.com, desde reportes de la comisión para el mercado financiero.
76. Hoja de Ruta FICEM Chile, 2019
77. <https://oec.world/en/profile/hs92/7201/>
78. Fastmarkets MB Daily
79. www.sernageomin.cl
80. www.icha.cl
81. <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/01/alto-horno.pdf>
82. MI_4100_07_Limpieza_de_escorias.pdf
83. <http://www.industry.siemens.com/metals-mining/en/Ironmaking/corex.htm>
84. <https://es.scribd.com/document/407755336/Anexo-4-Descripcion-de-Camiones-pdf>
85. <https://www.ingenieros.cl/>
86. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Analisis%20Mercado%20de%20los%20Insumos%20Cr%C3%ADticos%202019vf2.pdf>
87. <https://www.cne.cl/precio-medio-de-mercado-2/>
88. QUEZADA A. 1993. Factibilidad técnico-económica de instalar una planta de granalla de escoria de cobre en la Fundición de Caletones. Tesis Ing. Met. Universidad de Chile, Dep. Ing. Industrial. 128 p.-

Anexos

A. Comparación de la rapidez de reducción de FeO y condiciones experimentales

En la Tabla 48 se muestra una recopilación de datos sobre la rapidez de la reducción del FeO, bajo la condiciones propuestas por distintos autores. Esta información fue de utilidad para calcular la dosificación de coque y el tiempo en que demorará en interactuar con la escoria, según el tamaño aproximado de 2 pulgadas tal como se indica en el Anexo C en la Tabla 49.

Tabla 48. Velocidad de reacción del FeOx



Autor	Condiciones experimentales	Tipo de contacto <C>/escoria	Rapidez de reducción Mol FeO/mm ² s	Control propuesto
Philbrook, 1956 ^[31]	1430 °C – 1570 °C FeO-CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃		2.78x10 ⁻¹¹	Transporte en la escoria
Ruidjonkov, 1960 ^[32]	1400, FeO puro		3.94x10 ⁻⁶	Reacción de Boudouard
Kondakov, 1960 ^[33]	1450 °C – 1650 °C FeO puro		4.81x10 ⁻⁶ (1450 °C) 5.53x10 ⁻⁶ (1650 °C)	Reacción de Boudouard
Ershov, 1964 ^[34]	1600 °C FeO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 40<%FeO<60 %FeO<60		---	Reacción química y Transporte en la escoria
Krainer, 1966 ^[35]	1200°C-1600 °C (FeO = 60%) FeO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂		3.1-3.4x10 ⁻⁸ 3.2-3.6x10 ⁻⁸	Reducción indirecta, reacción de Boudouard
Fun, 1970 ^[36]	1650 °C 20 < %FeO < 50 FeO-CaO-SiO ₂ -MgO		8.18x10 ⁻⁸ - 9.42x10 ⁻⁷	Transporte en la escoria
Davies, 1973 ^[37]	1300 °C - 1500 °C FeO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ 1.7 < SiO ₂ /CaO<9		1400 °C: 2.02- 2.63x10 ⁻⁷ 1.67x10 ⁻⁷ (SiO ₂ /CaO = 9) 1.11x10 ⁻⁷ (SiO ₂ /CaO=1.7) 1450 °C: 4.25x10 ⁻⁷ FeO-SiO ₂ 1500 °C: 6.53x10 ⁻⁷ FeO-SiO ₂	Transporte en la escoria y reducción indirecta
Sugata, 1974 ^[38]	1350 °C – 1450 °C 5<%FeO<90 FeO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ FeO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ FeO-MgO-SiO ₂		1350 °C: 8.3x10 ⁻⁷ 1400 °C: 0.565-1.46x10 ⁻⁶ 1400 °C: 0.2-3x10 ⁻⁶ 1400 °C: 1.4-2x10 ⁻⁶ 1400 °C: 0.38-1.11x10 ⁻⁶ 1450 °C: 4.15x10 ⁻⁷	Agitación fuerte: Reducción directa y transporte en la escoria. Agitación débil: transporte en la escoria
Takahashi, 1975 ^[39]	1330 °C 1570 °C Fe ₂ O ₃		9.00x10 ⁻⁸ 7.90x10 ⁻⁷	--
Sasaki, 1977 ^[40]	1400 °C – 1600 °C 80%FeO-CaO-SiO ₂		1400 °C:1.10x10 ⁻⁷ 1500 °C:2.60x10 ⁻⁷ 1600 °C:5.60x10 ⁻⁷	Reacción de Boudouard
Borgiani, 1978 ^[41]	1250 °C – 1450 °C FeO-CaO-SiO ₂		---	Germinación de Fe y reacción química cuando la concentración de FeO disminuye
Tsukihashi, 1982 ^[42]	1600 °C FeO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ FeO-CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 40<%FeO<60 %FeO<60		1400 °C:2.60x10 ⁻⁷ 1500 °C:4.20x10 ⁻⁷	---

B. Patentes relacionadas con el proyecto

Métodos Hidro metalúrgicos:

- Method for comprehensively recovering Fe, Cu and Si from copper smelting slag (CN10155555-1A, China).
- Recovery of metal values from copper slag (US3868440A-USA)

Métodos Piro metalúrgicos

- Iron recovery method for copper smelting slag through direct reduction (CN106916916958A-China).
- Method for efficiently decomposing an recycling valuable metal in copper slag (CN107955878A, China).
- Method for separating iron and cooper from copper smelter slag (CN101100708A, China).
- Method for recovering copper, iron and silicon from copper smelting slag (CN104342561A, China).
- Method for separating valuable metals from copper slag (CN104404260A, China)
- Pyrometallurgical recovery of iron from iron silicate slag (US4001011A, USA).

Asimismo, se llevó a cabo la búsqueda de proyectos similares nacionales y en el extranjero que hubieran sido financiados por Fondef u otra entidad. En los registros de CONICYT se ubicó el proyecto:

- Obtención de subproductos con valor comercial a partir de escorias piro metalúrgicas provenientes de fundiciones de concentrados de cobre de la gran minería en Chile, Código: DO111159, diciembre 2005, ejecutado por la UDEC y apoyo de FONDEF.

C. Coque

Actualmente en FHVL se trabaja con dos tipos de carbón Coque a los cuales se les han realizado pruebas metalúrgicas como también ha sido probado en terreno. Las empresas que administran a FHVL son TAYRONAMIN SPA. Y AGROMINERA. Mensualmente se utilizan alrededor de 270 - 300 ton las cuales alimentan al Horno eléctrico. A continuación en la Tabla 49, se detallan las características técnicas de cada carbón coque y en la Tabla 50 se pueden comparar con los precios internacionales del coque:

Tabla 49. Parámetros técnicos y económicos de cada carbón coque.

COMPOSICION	Rango solicitado por ENAMI	TAYRONAMIN	PIMETAL	AGROMINERA
Carbón fijo, base seca	Mínimo 88%	94.4	87.41	84.8
Humedad total	Máximo 2%	2.19	1.74	6
Azufre, base seca	Máximo 1% ★	1.31	0.63	0.8
Volátiles	Menor a 2% ★	5.22	12.27	1.7
Ceniza	Menor a 1.5%	0.38	0.32	13.5
Granulometría	1% > 3" máximo	-	-	-
	1% < 1" mínimo	-	-	-
Poder Calorífico	Kcal/Kg	8.089	8.499	6.700

Tabla 50. Precios internacionales del carbón coque. ^[78]

	Carbón duro premium de coque, cfr Jingtang, \$/tonelada		Carbón de coque duro, cfr Jingtang, \$/tonelada		Carbón de coque duro premium, DBCT fob, \$/tonelada		Carbón de coque duro, DBCT fob, \$/tonelada	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
22 oct 2019	164,7	164,7	142,29	142,29	152,4	152,4	129,92	129,92
21 oct 2019	164,76	164,76	142,29	142,29	151,77	151,77	129,92	129,92
18 oct 2019	164,76	164,76	142,29	142,29	150,73	150,73	125,5	125,5
17 oct 2019	164,76	164,76	134,07	134,07	150,73	150,73	123,13	123,13
16 oct 2019	164.25	164.25	134,07	134,07	151,6	151,6	123,13	123,13
15 oct 2019	164,07	164,07	134,07	134,07	151,6	151,6	123,13	123,13
14 oct 2019	164,36	164,36	134,07	134,07	146,62	146,62	123,13	123,13
11 oct 2019	159,5	159,5	134,07	134,07	146,62	146,62	123,13	123,13
10 oct 2019	159,5	159,5	134,07	134,07	145,39	145,39	123,13	123,13
09 oct 2019	159,72	159,72	134,07	134,07	146,37	146,37	123,13	123,13
08 oct 2019	159,7	159,7	134,07	134,07	146,08	146,08	123,13	123,13
07 oct 2019	159,7	159,7	134,07	134,07	146,08	146,08	123,13	123,13
04 oct 2019	159,7	159,7	134,07	134,07	146,08	146,08	123,13	123,13
03 oct 2019	159,7	159,7	134,07	134,07	146,08	146,08	123,13	123,13

D. Estimación de Costos de inversión

Para realizar la estimación de la inversión (ver Tabla 51) se utilizó el promedio entre los rangos propuestos de cada ítem. En el caso del ítem 3 se optó por la alternativa: sólido- fluido; en el ítem 4: alguna; en el ítem 5: outdoor- indoor; en el ítem 6: Se requiere nuevas instalaciones y por último ítem 8: Simple, pero considerando el valor máximo.

Tabla 51. Estimación de costos de inversión

ESTIMACION COSTO DE INVERSION			
1. Costo equipos comprados		6. Auxiliares (por ej. Energía eléctrica)	%Item 2
2. Costo equipos instalados	Item 1 por factor	Existente	0
	1.3 - 2.0	Incorporar algo	0 - 5
3. Cañerías (piping)	% Item 2	Incorporar parte importante	5 - 25
Sólido	7 - 10	Se requiere nuevas instalaciones	25 - 100
Sólido - fluido	10 - 30	7. Costo total físico de la planta (Item 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	
Fluido	30 - 60		
4. Instrumentación	% Item 2	8. Ingeniería y construcción	%Item 7
Ninguna	0 - 5	Simple	20 - 35
Alguna	5 - 10	Difícil	35 - 60
Extensiva	10 - 15		%Item 7
5. Edificios y trabajos de terreno	%Item 2	9. Contingencias	10 - 20
al aire libre (outdoor)	5 - 20		
outdoor - indoor	20 - 60	10. Costo Total Inversión (Item 7 + 8 + 9)	
indoor	60 - 100		

E. Cal

Los principales proveedores de cal en Chile son:

- Bahía salada en la región de atacama a 80 km de Copiapó
- Cementos Bío- Bío, Talcahuano, Bío- Bío Chile
- Compañía productora de cal, Ruta 5 Norte Km 457 Coquimbo

F. Potencia del horno eléctrico

La potencia del horno eléctrico fue obtenida a partir de informes entregados en EXPOMIN por la empresa SMS DEMAG en 2002, del cual podemos observar en la Figura 29 que dadas las toneladas por día producidas en el horno eléctrico podemos aproximar los kWh que se requerirán.

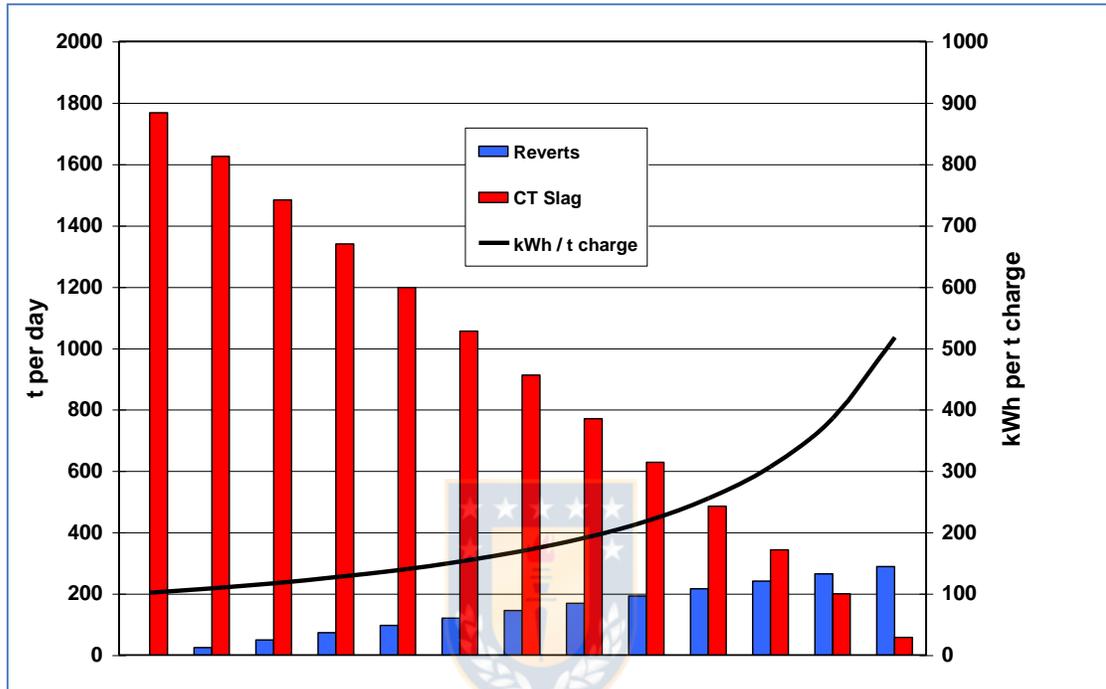


Figura 29. Estimación de la potencia del Horno eléctrico.

G. Estimación de costo y capacidad del Horno Eléctrico

A partir de la información proveniente de la Tabla 52 considerando que el horno a utilizar tiene una capacidad cercana a las 250.000 toneladas por año y eso corresponde a un costo aproximado de 6.750.000 millones de dólares, utilizaremos estos datos como referencia para estimar el costo del horno eléctrico. Se ocupó la regla de los seis dígitos, que permite estimar el costo de un equipo conociendo el costo de otro similar de diferente capacidad según:

$$C_B = C_A \left(\frac{S_B}{S_A} \right)^{0.6}$$

C_B = Costo aproximado del ítem que tiene tamaño o capacidad S_B

C_A = Costo conocido del ítem de tamaño S_A (mismas unidades que S_B)

Tabla 52. Estimación de costos Horno Eléctrico.

	Annual Plant Capacity, tons of ingots					
	250,000 tons		500,000 tons		1,000,000 tons	
	Type of furnace					
	Open hearth ^b	Electric ^c	Open hearth ^d	Electric ^e	Open hearth ^f	Electric ^g
Capital cost	\$11,750,000	\$6,750,000	\$16,900,000	\$10,500,000	\$26,650,000	\$15,900,000
Cold charge						
1. Cost above	\$18.09	\$18.59	\$16.52	\$17.07	\$15.23	\$16.26
2. Cost of metallics	46.65	42.95	46.65	42.95	46.65	42.95
Net production cost	\$64.74	\$61.54	\$63.17	\$60.02	\$61.88	\$59.21
Difference in steelmaking costs for equiv. plant capacity		\$ 3.20		\$3.15		\$2.67
50% hot-metal charge						
1. Cost above			\$13.95	\$15.95	\$12.93	\$15.14
2. Cost of metallics			41.08	40.18	41.08	40.18
Net production cost			\$55.03	\$56.13	\$54.01	\$55.32
Difference in steelmaking costs for equiv. plant capacity			\$1.10		\$1.31	

^a Data taken from Moore, Ref 12.
^b Three 150-ton furnaces.
^c Three 18-ft furnaces with 20,000 kv-amp transformers.
^d Four 200-ton furnaces.
^e Four 20 ft furnaces with 25,000 kv-amp transformers.
^f Eight 200-ton furnaces.
^g Eight 20-ft furnaces with 25,000 kv-amp transformers.

1. HISTORY OF ELECTRIC FURNACE STEELMAKING 15

H. Transporte de escorias de acería

La empresa Aza tiene inconvenientes con el depósito de escorias de acería, ya sea por los costos asociados al depósito de este material o del traslado a este lugar. Ellos sostienen que existe la firme posibilidad de que se regalen las escorias de hierro, y el traslado que va desde su filial ubicada en Santiago hasta la fundición HVL de ENAMI con dirección en Paipote, Copiapó, sea un costo incluido en este proyecto. Para el traslado se determinó que el traslado apropiado es en camiones que trasladen un total de 38.473 ton/año de escorias con una densidad aproximada de 3.5 ton/m³ resulta en un volumen equivalente a 10.992 m³. En la Figura 30 vemos que la capacidad máxima por camión es de 49 toneladas o un máximo de 14 m³ por camión, lo que conlleva a contratar 785 viajes en camión.

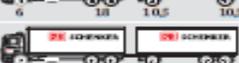
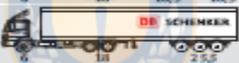
Tipo de vehículo	Descripción de vehículo	Peso bruto por eje (toneladas)	Peso bruto total (incluye tara del camión)	Potencia mínima necesaria	Capacidad estimada (m ³)
C11 Camión	C11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero	 6 / 10,5	16,5 toneladas	74 HP	1,5 m ³
C12 Camión	C12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros	 6 / 18	24 toneladas	108 HP	3,2 m ³
C11 R11 Camión Zorra	C11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero R11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero	 6 / 10,5 / 10,5 / 10,5	37,5 toneladas	169 HP	6,0 m ³
C11 R12 Camión Zorra	C11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero R12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros	 6 / 10,5 / 10,5 / 18	45 toneladas	203 HP	7,5 m ³
C12 R11 Camión Zorra	C12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros R11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero	 6 / 18 / 10,5 / 10,5	45 toneladas	203 HP	7,5 m ³
C12 R12 Camión Zorra	C12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros R12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros	 6 / 18 / 10,5 / 18	52,5 toneladas	203 HP	9,0 m ³
T11 S1 Tractor Semi	T11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero S1 - 1 eje	 6 / 10,5	27 toneladas	122 HP	6,0 m ³
T11 S2 Tractor Semi	T11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero S2 - 2 ejes	 6 / 10,5 / 18	34,5 toneladas	155 HP	6,0 m ³
T11 S2 (1) Tractor Semi	T11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero S2 - 2 ejes separados	 6 / 10,5 / 10,5 / 10,5	37,5 toneladas	169 HP	6,0 m ³
T11 S12 Tractor Semi	T11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero S12 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros	 6 / 10,5 / 18	45 toneladas	203 HP	9,0 m ³
T11 S3 Tractor Semi	T11 - 1 eje delantero + 1 eje trasero S3 - 3 ejes	 6 / 10,5 / 25,5	42 toneladas	189 HP	7,5 m ³
T1.2 S1 Tractor Semi	T1.2 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros S1 - 1 eje	 6 / 18 / 10,5	34,5 toneladas	155 HP	6,0 m ³
T1.2 S2 Tractor Semi	T1.2 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros S2 - 2 ejes	 6 / 18 / 18 / 18	42 toneladas	189 HP	7,5 m ³
T1.2 S2 (1) Tractor Semi	T1.2 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros S2 - 2 ejes separados	 6 / 18 / 10,5 / 10,5 / 10,5	45 toneladas	203 HP	9,0 m ³
T1.2 S3 Tractor Semi	T1.2 - 1 eje delantero + 2 ejes traseros S3 - 3 ejes	 6 / 18 / 18 / 25,5	49,5 toneladas	203 HP	9,0 m ³

Figura 30. Descripción de camiones, para traslado de escorias de acería ^[83].

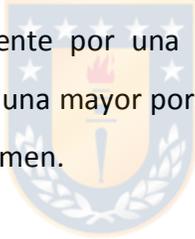
I. Resumen de costos de insumos

Tabla 53. Resumen de costos de insumos ^[78]

Insumo	Costo (USD/Ton)
Coque	200
CaO	149
Al ₂ O ₃	280
MgO	250
Aire (79/21)	4
Arrabio	300
Aditivo Portland	127
Cemento Portland	180

J. Escoria Granallada

Este tipo de escoria, se obtiene cuando el material pasa de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Existen varias técnicas para ello, entre las cuales, la utilizada por la fundición Caletones perteneciente a CODELCO, y según lo indicado por Quezada (1993) ^[88], consiste en verter la escoria fundida, en un pozo de granulación o granallador, el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo a la granulación que se realice, dentro del cual se produce el enfriamiento brusco (casi instantáneo) de la escoria, la que cambia de estado líquido a sólido, pasando desde una temperatura de aproximadamente 1150 °C a menos de 100 °C respectivamente. Una vez producida la granulación, es separada el agua de la escoria, esta última siendo llevada posteriormente a cachas de acopio. En este proceso no se producen modificaciones o reacciones químicas que alteren la composición de la escoria, sino que ocurren cambios mecánicos y físicos al cambiar de estado fundente a granos sólidos, formando un material cuya estructura estará constituida mayormente por una estructura amorfa o vítrea. Este tipo de formación, provee a la escoria de cobre una mayor porosidad, aumentando la absorción de agua y con una menor masa por unidad de volumen.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO PARA UN PROCESO “ZERO WASTE” EN EL PROCESAMIENTO DE ESCORIAS DE COBRE PARA LA PRODUCCION DE ARRABIO Y CEMENTO PORTLAND

Nombre Memorista: Claudia Verónica Salinas Candia

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof. Roberto Parra Figueroa		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Fernando Parada L.	Prof. Eduardo Balladares V.
--------------------------	-----------------------------

Resumen

Este estudio es una propuesta orientada a mejorar la competitividad de las fundiciones chilenas, donde existe un desafío perentorio de optimizar integralmente la cadena de fundición y refinería. La propuesta se basa en incorporar, con este fin, los conceptos de economía circular para una industria sin residuos.

El proyecto tiene como objetivo definir las condiciones operacionales y la viabilidad técnica para un proceso “Zero Waste”, en el cual se utilizarán escorias de cobre para producir arrabio considerando la reducción del FeO_x y la escorificación del SiO_2 , principales componentes de las escorias de descarte de la producción primaria de cobre a partir de concentrados. La escoria generada a partir de la escorificación de la SiO_2 pasa a una etapa de ajuste químico para formar un residuo comercializable, en este caso cemento Portland o un aditivo del mismo.

Los resultados obtenidos son promisorios para avanzar en el análisis de este nuevo concepto ecológico, disminuyendo índices de contaminación por emanación de CO_2 , promoviendo el desarrollo de un encadenamiento productivo y responder particularmente a la demanda creciente a nivel nacional de cemento. Al mismo tiempo se identifican sinergias con las mismas acerías que comprarían el arrabio, usando sus escorias como fundentes para la etapa de reducción o componentes del cemento Portland.