



**Universidad de Concepción**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Departamento de Ingeniería Industrial**



**ESTUDIO DE PRE FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y  
MEDIOAMBIENTAL DE PROYECTO DE INVERSIÓN EN  
MÁQUINA PROCESADORA DE CHATARRA EN COMPAÑÍA  
SIDERÚRGICA HUACHIPATO**

POR

**Felipe Ignacio Magdalena Parra**

Memoria de Título presentada a la facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción  
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía

Alejandro Javier Andalaft Chacur

Profesional Supervisor

Luis Gonzalo Arqueros Villa

Julio 2024

Concepción (Chile)

©2024 Felipe Ignacio Magdalena Parra

©2024 Felipe Ignacio Magdalena Parra

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **Agradecimientos**

*Agradezco al equipo de ingeniería de procesos de CAP Acero que me recibió durante mi estadía en la empresa: Andrés Lorza, Camila Quezada, Felipe Valenzuela, Georgie Vásquez, Manuel Campos, Juan Pablo Pulgar y a mi supervisor Luis Arqueros por haberme dado la oportunidad de realizar un trabajo de investigación en una gran y prestigiosa empresa. A ellos, por su disposición para ayudarme, con mención especial a Juan Pablo Pulgar quien fue un apoyo muy importante para mí, tanto académico como emocional.*

*Agradezco a todo el resto del personal de la compañía que se interesó en prestarme ayuda en el momento que lo necesitara.*

*Agradezco a mis padres y hermana que siempre me apoyaron en este proceso de altos y bajos y que gracias a Dios pude culminar exitosamente.*

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

## RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Industrial  
**Carrera** : Ingeniería Civil Industrial  
**Nombre del memorista** : Felipe Magdalena Parra  
**Título de la memoria** : “Estudio de pre factibilidad técnica, económica y medioambiental de proyecto de inversión en máquina procesadora de chatarra en Compañía Siderúrgica Huachipato”  
**Fecha de la presentación oral** :

**Profesor Guía** : Alejandro Andalaft Chacur  
**Profesor Revisor** : Jorge Jiménez del Río  
**Concepto** :  
**Calificación** :

### Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la pre factibilidad de un proyecto de inversión en una máquina procesadora de chatarra metálica en la Compañía Siderúrgica Huachipato desde las perspectivas técnica, económica y medioambiental. La base de la evaluación del proyecto corresponde a la justificación teórica del uso de chatarra ferrosa procesada como materia prima en el proceso productivo. En relación a la maquinaria escogida, se describe su funcionamiento en forma detallada posterior a un estudio de mercado realizado para averiguar empresas comercializadoras así como también empresas que vendan chatarra ferrosa procesada (esto último, corresponde a una situación sin proyecto). Posteriormente, se realiza una evaluación económica determinando que es económicamente viable para la empresa la adquisición de una máquina procesadora, no así el comprar chatarra procesada a proveedores. Para la alternativa seleccionada, se necesita de un equipo con una capacidad de procesamiento de 68 ( $t/h$ ), donde el monto total de inversión inicial asciende a 2.950.000 ( $USD$ ) y el VAN correspondiente es de 9.486.952 ( $USD$ ) con una tasa de descuento de  $i = 7,15\%$ . Además, desde las perspectivas técnica y medioambiental también se obtienen conclusiones positivas que hacen que sea recomendable la continuación del estudio en niveles más profundos de información.

Palabras clave: pre factibilidad, proyecto de inversión, máquina procesadora, chatarra ferrosa

## **Abstract**

The aim of the present work is to study the pre-feasibility of an investment project in a metal scrap processing machine at Compañía Siderúrgica Huachipato from a technical, economic and environmental perspective. The basis of the project evaluation corresponds to the theoretical justification of the use of processed ferrous scrap as raw material in the production process. In relation to the chosen machine, its operation is described in detail after a market study carried out to find marketing companies, as well as companies that sell processed ferrous scrap (the latter corresponds a situation without a project). Subsequently, an economic evaluation is carried out, thus determining that is economically viable for the company to acquire a processing machine, but not buying processed scrap from suppliers. For the selected alternative, an equipment with a processing capacity of 68 ( $t/h$ ) is needed, where the total amount of initial investment amounts to 2.950.000 ( $USD$ ) and the corresponding VNA is 9.486.952 ( $USD$ ) with a discount rate of  $i = 7,15\%$ . Furthermore, from the technical and environmental perspectives, positive conclusions are also obtained that make it advisable to continue the study at deeper levels of information.

Key words: pre-feasibility, investment project, processing machine, ferrous scrap

# TABLA DE CONTENIDOS

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>1</b>    | <b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>14</b> |
| 1.1         | Introducción.....   | 14        |
| 1.2         | Objetivos de la Memoria de Título .....   | 15        |
| 1.2.1       | Objetivo general .....  | 15        |
| 1.2.2       | Objetivos específicos.....  | 15        |
| <b>2</b>    | <b>Capítulo 2: DESARROLLO</b> .....   | <b>16</b> |
| 2.1         | Marco teórico.....  | 16        |
| 2.1.1       | Descripción del proceso productivo desarrollado en Acería Colada Continua .....                                     | 16        |
| 2.1.1.1     | Desulfuración .....   | 16        |
| 2.1.1.2     | Convertidor al oxígeno .....  | 17        |
| 2.1.1.3     | Estación de ajuste metalúrgico.....   | 20        |
| 2.1.1.4     | Estación de vacío .....   | 21        |
| 2.1.1.5     | Colada continua de palanquillas .....   | 21        |
| 2.1.2       | Antecedentes teóricos del proyecto.....   | 22        |
| 2.1.2.1     | Chatarra en el contexto de Acería Colada Continua .....   | 22        |
| 2.1.2.1.1   | Tipos de chatarra en Acería Colada Continua .....   | 23        |
| □           | 2.1.2.1.1.1 Chatarra interna: .....   | 23        |
| □           | 2.1.2.1.1.2 Chatarra procesada: .....   | 23        |
| □           | 2.1.2.1.1.3 Chatarra externa:.....  | 23        |
| 2.1.2.1.2   | Antecedentes históricos de uso de chatarra previamente tratada.....   | 24        |
| 2.1.2.1.3   | Aspectos en el proceso de conversión al oxígeno afectados por las proporciones de chatarra y arrabio cargados ..... | 25        |
| 2.1.2.2     | Análisis previo de alternativas tecnológicas disponibles.....   | 26        |
| 2.1.2.2.1   | Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra .....   | 27        |
| 2.1.2.2.1.1 | Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra en Latinoamérica .....  | 27        |
| 2.1.2.2.1.2 | Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra en el resto del mundo ..  | 28        |
| 2.1.3       | Justificación del proyecto .....  | 29        |
| 2.1.3.1     | Aspecto económico.....  | 29        |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 2.1.3.2     | Aspecto medioambiental.....   | 31 |
| 2.1.3.2.1   | Impacto de procesamiento de chatarra en IGT .....   | 32 |
| 2.1.3.2.1.1 | Cálculo de emisiones de <i>CO2</i> por tonelada de arrabio en Alto Horno .....                          | 32 |
| 2.1.3.2.1.2 | Cálculo de emisiones de <i>CO2</i> por tonelada de arrabio en <i>BOF</i> .....                          | 33 |
| 2.1.3.2.1.3 | Cálculo de emisiones globales de <i>CO2</i> por tonelada de arrabio en la ruta integrada.....           | 33 |
| 2.1.3.2.2   | Cálculo de emisiones de <i>CO2</i> teóricas y validación de resultados .....                            | 34 |
| 2.1.3.3     | Aspecto operacional.....  | 36 |
| 2.1.3.3.1   | Estimación de <i>tap to tap</i> del convertidor en función de número de cajas de carga de chatarra..... | 39 |
| 2.1.3.3.2   | Cálculo de tiempo de colada en función de líneas de colada operativas .....                             | 40 |
| 2.1.3.3.3   | Cálculo de consumo específico de <i>tundish</i> para escenarios considerados .....                      | 40 |
| 2.1.3.3.3.1 | Escenario 1: comienzo de secuencia con 4 líneas de colada operativas.....                               | 41 |
| 2.1.3.3.3.2 | Escenario 2: comienzo de secuencia con 5 líneas de colada operativas.....                               | 41 |
| 2.1.3.3.4   | Cálculo de líneas colando promedio para escenarios considerados .....                                   | 42 |
| 2.1.3.3.4.1 | Escenario 1: comienzo de secuencia con 4 líneas de colada operativas.....                               | 42 |
| 2.1.3.3.4.2 | Escenario 2: comienzo de secuencia con 5 líneas de colada operativas.....                               | 42 |
| 2.2         | Caracterización general del proyecto .....  | 42 |
| 2.2.1       | Tipología del proyecto .....  | 43 |
| 2.2.2       | Alcances del estudio del proyecto.....  | 43 |
| 2.3         | Metodología .....   | 43 |
| 2.3.1       | Estudio de viabilidad técnica del proyecto .....  | 43 |
| 2.3.2       | Estudio de viabilidad económica del proyecto .....  | 44 |
| 2.3.3       | Estudio de viabilidad medioambiental del proyecto .....   | 45 |
| 2.3.4       | Estudio de mercado .....  | 45 |
| 2.4         | Plantas de fragmentación de chatarra.....   | 47 |
| 2.4.1       | Alimentación del material .....   | 47 |
| 2.4.2       | Fragmentación del material alimentado .....   | 48 |
| 2.4.3       | Sistema de desempolvado .....   | 49 |
| 2.4.3.1     | Sistema de desempolvado por vía húmeda.....   | 49 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.4.3.2 | Sistema de despolvado por vía seca .....  | 51 |
| 2.4.4   | Separación magnética.....   | 52 |
| 2.4.5   | Triado manual .....   | 53 |
| 2.5     | Empresas comercializadoras de plantas de fragmentación de chatarra metálica .....                   | 53 |
| 2.6     | Empresas comercializadoras de chatarra ferrosa fragmentada .....                                    | 57 |
| 2.7     | Consideraciones con respecto a viabilidad técnica.....  | 59 |
| 2.8     | Consideraciones con respecto a viabilidad medioambiental .....                                      | 60 |
| 2.9     | Evaluación económica .....  | 60 |
| 2.9.1   | Cálculo de tasa de descuento apropiada.....   | 60 |
| 2.9.1.1 | Calculo de tasa libre de riesgo ( $R_f$ ) .....   | 60 |
| 2.9.1.2 | Calculo de beta de la industria no apalancado ( $\beta$ ) .....                                     | 61 |
| 2.9.1.3 | Calculo de rentabilidad anual esperada del mercado ( $E(R_m)$ ) .....                               | 61 |
| 2.9.1.4 | Cálculo de tasa de descuento apropiada para evaluación económica .....                              | 62 |
| 2.9.2   | Resumen de datos necesarios y aclaraciones adicionales .....  | 62 |
| 2.9.3   | Evaluación de situación con proyecto.....   | 64 |
| 2.9.3.1 | Ingresos afectos a impuesto incrementales.....  | 64 |
| 2.9.3.2 | Egresos afectos a impuesto incrementales.....   | 65 |
| 2.9.3.3 | Inversión inicial .....   | 65 |
| 2.9.3.4 | Construcción de flujos de caja y cálculo de indicadores económicos.....                             | 65 |
| 2.9.4   | Evaluación de situación sin proyecto.....   | 66 |
| 2.9.4.1 | Ingresos afectos a impuesto incrementales.....  | 66 |
| 2.9.4.2 | Egresos afectos a impuesto incrementales.....   | 66 |
| 2.9.4.3 | Construcción de flujos de caja y cálculo de indicadores económicos.....                             | 67 |
| 2.9.5   | Análisis de sensibilidad del VAN para alternativa seleccionada.....                                 | 67 |
| 3       | Capítulo 3: DISCUSIÓN.....  | 70 |
| 3.1     | Sobre justificación teórica de realización del proyecto y resultados de evaluación económica        | 70 |
| 3.2     | Sobre implicancias de la tenencia de una planta fragmentadora de chatarra en la industria del acero | 71 |
| 4       | Capítulo 4: CONCLUSIONES.....   | 72 |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>Sobre viabilidad técnica (objetivo específico).....</b>        | <b>72</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Sobre viabilidad económica (objetivo específico).....</b>      | <b>72</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Sobre viabilidad medioambiental (objetivo específico).....</b> | <b>73</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Recomendaciones futuras .....</b>                              | <b>73</b> |
| <b>5</b>   | <b>Capítulo 5: REFERENCIAS.....</b>                               | <b>74</b> |
| <b>6</b>   | <b>Capítulo 6: ANEXOS .....</b>                                   | <b>82</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Etapas del proceso de conversión al oxígeno.....  | 20 |
| Figura 2.2: Diagrama de flujo de proceso desarrollado en ACC.....   | 22 |
| Figura 2.3: Chatarra externa liviana y chatarra ferrosa triturada .....                                       | 24 |
| Figura 2.4: Planta de fragmentación de chatarra metálica .....  | 47 |
| Figura 2.5: Interior de cámara de fragmentación en planta de trituración de chatarra metálica.....            | 49 |
| Figura 2.6: Sistemas de desempolvado por vía húmeda .....   | 51 |
| Figura 2.7: Filtro de mangas .....  | 52 |
| Figura 2.8: Tambor magnético en planta fragmentadora de chatarra metálica .....                               | 52 |
| Figura 2.9: Planta de fragmentación “PSX-80104” .....   | 56 |
| Figura 2.10: Mapa de patio de chatarra al interior de CAP Acero .....   | 59 |
| Figura 2.11: Distribución de probabilidades de variables de entrada en análisis de sensibilidad del VAN ..... | 69 |
| Figura 2.12: Distribución de probabilidades de VAN sensibilizado .....  | 69 |
| Figura 2.13: Gráfico de sensibilidad el VAN obtenido.....   | 70 |
| Figura 6. 1: Diagrama de flujo de carbono en BOF.....   | 83 |

## Índice de ecuaciones

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 2.1: Índice de rendimiento metálico del convertidor (IRM) .....  | 24 |
| Ecuación 2.2: Índice global de transformación (IGT) .....   | 25 |
| Ecuación 2.3: <i>OEE</i> (“ <i>Overall Equipment Effectiveness</i> ”) .....   | 36 |
| Ecuación 2.4: Factor de velocidad para máquina de colada continua .....   | 36 |
| Ecuación 2.5: Densidad mínima requerida de chatarra para garantizar su carga al convertidor en un cierto número de cajas..... | 38 |
| Ecuación 2.6: Cálculo de tiempo de colada en función de velocidad de colada y líneas operativas .....                         | 40 |
| Ecuación 2.7: Cálculo de consumo específico de <i>tundish</i> .....   | 41 |
| Ecuación 2.8: Capacidad de procesamiento mínima requerida de la planta fragmentadora .....                                    | 53 |
| Ecuación 2.9: Cantidad de toneladas anuales a importar de chatarra ferrosa fragmentada.....                                   | 57 |
| Ecuación 2.10: Cálculo de tasa de descuento apropiada mediante modelo CAPM.....   | 60 |
| Ecuación 2.11: Cálculo de flujo incremental en un ítem y período determinados .....   | 64 |
| Ecuación 2.12: Fórmula de cálculo de VAN.....   | 64 |
| Ecuación 2.13: Cálculo de ingresos diferenciales para situación con proyecto .....  | 65 |
| Ecuación 6.1: Relación entre masas y masas molares de <i>C</i> y de <i>CO2</i> .....  | 82 |
| Ecuación 6.2: Masa de carbono de entrada teórica (promedio) al <i>BOF</i> por hornada .....                                   | 83 |

## Índice de tablas

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabla 2.1: Rangos de densidad aparente de chatarra procesada en función de maquinaria utilizada...</b>  | <b>26</b> |
| <b>Tabla 2.2: Medias de cocientes calculados para meses considerados en informes de medición de gases</b>  | <b>35</b> |
| <b>Tabla 2.3: Media y desviación estándar de tiempos de carga de chatarra para hornadas registradas...</b> | <b>39</b> |
| <b>Tabla 2.4: Resumen de datos necesarios para realización de evaluación económica .....</b>               | <b>63</b> |
| <b>Tabla 2.5: Flujos de caja proyectados para situación con proyecto .....</b>                             | <b>66</b> |
| <b>Tabla 2.6: Flujos de caja proyectados para situación sin proyecto .....</b>                             | <b>67</b> |

## Índice de anexos

|   |    |
|---|----|
| Anexo 1: Detalle de cálculo de emisiones de <i>CO2</i> por tonelada de arrabio en Alto Horno.....                     | 82 |
| Anexo 2: Detalle de cálculo de emisiones de <i>CO2</i> por tonelada de arrabio en <i>BOF</i> .....                    | 83 |
| Anexo 3: Mediciones de gases 2023 y cálculos realizados .....   | 84 |
| Anexo 4: Tiempos de carga de chatarra para 2 cajas .....  | 85 |
| Anexo 5: Tiempos de carga de chatarra para 3 cajas .....  | 85 |
| Anexo 6: Tiempos de carga de chatarra para 4 cajas .....  | 86 |
| Anexo 7: Simulación de escenario 2.1 para cálculo de consumo específico de <i>tundish</i> .....                       | 86 |
| Anexo 8: Simulación de escenario 2.2 para cálculo de consumo específico de <i>tundish</i> .....                       | 87 |
| Anexo 9: Simulación de escenario 2.3 para cálculo de consumo específico de <i>tundish</i> .....                       | 87 |
| Anexo 10: Simulación de escenario 2.1 para cálculo de líneas colando promedio.....                                    | 88 |
| Anexo 11: Simulación de escenario 2.2 para cálculo de líneas colando promedio.....                                    | 88 |
| Anexo 12: Simulación de escenario 2.3 para cálculo de líneas colando promedio.....                                    | 89 |
| Anexo 13: Rendimiento nominal bursátil del IGPA del mercado chileno .....   | 89 |
| Anexo 14: Rendimiento del IPC del mercado chileno.....  | 90 |
| Anexo 15: Tasa de retorno (%) de bonos emitidos por el Banco Central de Chile (junio de 2021 hasta mayo de 2024)..... | 90 |
| Anexo 16: Tipo de cambio (de USD a CLP) al primer día de cada mes considerado.....                                    | 90 |
| Anexo 17: Tipo de cambio (de CNY a USD) al primer día de cada mes considerado .....                                   | 90 |
| Anexo 18: Precio por tonelada de acero (CNY/t) al primer día de cada mes considerado.....                             | 90 |

# 1 Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

La Compañía de Acero del Pacífico (CAP) fue creada en 1946. En 1950, fue inaugurada la Planta Siderúrgica Huachipato, la cual está ubicada en la bahía de San Vicente (XIII Región), y es la única siderúrgica integrada presente en Chile. Vale decir, posee unidades de: Coquería, Altos Hornos, Convertidores, Estaciones de Ajuste y Coladas Continuas (Campos, 2016, pp. 12-13).

Durante la década de los 80' ocurre la privatización total de CAP, transformándose en una sociedad de inversiones con empresas subsidiarias dentro de las cuales se encuentra “CSH – Compañía Siderúrgica Huachipato S.A” (CAP Acero) (Campos, 2016, p.13).

La posición geográfica de CAP Acero en la mitad del territorio nacional es estratégica, considerando que las materias primas que utiliza para su producción se localizan en puntos extremos. Además, la bahía de San Vicente es un lugar adecuado para funcionar como puerto industrial, en vista de que el transporte tanto de insumos necesarios para el proceso productivo como el despacho de los productos terminados es por vía marítima (Campos, 2016, p.12).

En el pasado, en la compañía se disponía de una Colada Continua de palanquillas y una Colada Continua de planchones. Sin embargo, debido al contexto actual del negocio del acero, sólo la primera se mantiene en funcionamiento, cuyo objetivo es generar productos largos y rollos de alambón y así responder a la demanda de productos de acero para construcción e insumos para conminución en el sector minero (Campos, 2016, p.13).

Actualmente, en el Departamento de Ingeniería de Procesos de Acería Colada Continua (ACC) se está considerando la posibilidad de utilizar chatarra procesada y con alto contenido de hierro como materia prima en el proceso productivo. Lo anterior, debido a que representa una eventual oportunidad de mayores beneficios económicos para la empresa en comparación con la situación actual (base) en donde no se utiliza chatarra procesada. Así entonces, surgen dos alternativas. La primera corresponde a la inversión en una máquina procesadora de chatarra (situación con proyecto) y la segunda corresponde a la importación de chatarra ferrosa procesada (situación sin proyecto).

## **1.2 Objetivos de la Memoria de Título**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar la pre factibilidad de un proyecto de inversión en máquina procesadora de chatarra en base al análisis del mismo desde las perspectivas técnica, económica y medioambiental.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- *Definir los requerimientos técnicos del proyecto de inversión en máquina procesadora de chatarra en función de las necesidades de espacio físico y recursos humanos que conllevan la tenencia de dicho equipo: se estudia la pre factibilidad del proyecto desde la perspectiva técnica.*
- *Estudiar la conveniencia económica para la Compañía Siderúrgica Huachipato de la eventual instalación de una máquina procesadora de chatarra: se estudia la pre factibilidad del proyecto desde la perspectiva económica.*
- *Estudiar el impacto ambiental derivado de la utilización de una máquina procesadora de chatarra metálica para la Compañía Siderúrgica Huachipato, tanto en relación a emisiones ambientales de CO<sub>2</sub> derivadas del proceso productivo al incorporar chatarra procesada como materia prima como a emisiones de residuos generadas por el proceso normal de operación del equipo industrial: se estudia la pre factibilidad del proyecto desde la perspectiva medioambiental.*

## **2 Capítulo 2: DESARROLLO**

### **2.1 Marco teórico**

#### **2.1.1 Descripción del proceso productivo desarrollado en Acería Colada Continua**

El proceso productivo llevado a cabo en Acería Colada Continua está constituido por las 5 siguientes etapas: desulfuración, convertidor al oxígeno, estación de ajuste metalúrgico, estación de vacío y colada continua de palanquillas.

El arrabio es la materia prima básica que da pie a la primera etapa del proceso productivo a estudiar. Previo a la etapa de desulfuración, éste es obtenido en la etapa del Alto Horno, el cual es un gran reactor vertical en contracorriente (Pulgar, 2018, p. 3). En dicha etapa se consideran como materias primas los minerales de hierro, coque (cuya finalidad es el calentamiento y que actúa como agente reductor) y caliza (esta actúa como formador de escoria líquida que atrapa las impurezas del mineral de hierro) (Plataforma Tecnológica Española del Acero [PLATEA], s.f., p. 4).

Al ser inyectado al horno un aire precalentado, el oxígeno que éste contiene permite la combustión del coque generando la despresión del gas  $CO$  (monóxido de carbono). Este último, entra en contacto con el mineral de hierro y se genera una reacción para formar  $CO_2$  (dióxido de carbono), además de la liberación del hierro en forma líquida (arrabio).

Por otro lado, las impurezas del mineral dan paso a la formación de escoria líquida, la cual flota por sobre el arrabio ya que la primera tiene un menor peso específico. Posteriormente, la escoria y el arrabio se recogen desde el crisol (la parte más baja del horno) y salen al exterior por un orificio llamado piquera permitiendo así su posterior separación (PLATEA, s.f., p. 4). Finalmente, el arrabio obtenido desde el Alto Horno es transportado por medio de carros torpedos hacia la zona de Acería Colada Continua (Pulgar, 2018, p. 3).

##### **2.1.1.1 Desulfuración**

Esta etapa también se conoce como pre tratamiento del arrabio líquido, cuyo objetivo consiste en disminuir el contenido de elementos residuales (es decir, indeseados en la composición

del acero final a obtener) presentes en él. Ellos corresponden a vanadio, manganeso, silicio, fósforo y principalmente azufre (debido a que la naturaleza del proceso realizado en el convertidor al oxígeno no posibilita hacer disminuir de manera importante este elemento en el acero líquido formado) (Carrillo, 2017, p.10; Cocunubo, 2018, p.16). La reducción en el contenido de dichos elementos residuales es de tal forma que se alcancen valores que sean considerados rentables para la fabricación de acero (PLATEA, s.f., p. 5).

Para la desulfuración se necesita la inyección de cal micro pulverizada, a través del uso de una lanza para realizar inyección neumática con gas nitrógeno (inerte) y magnesio granulado (Campos, 2016, p. 16). Luego, se produce la reacción del calcio ( $Ca$ ) con el azufre ( $S$ ), formando sulfuro de calcio ( $CaS$ ) que pasa a constituir la escoria como subproducto generado (PLATEA, s.f., p. 6). En este punto, cabe resaltar que en caso de alcanzar una composición de azufre que sea mayor a la meta (ésta depende del grado del acero que se desee fabricar) se debe hacer la re-inyección correspondiente hasta lograr una composición igual o menor a la composición máxima deseada (Procedimientos de Operación Proceso de Desulfuración CAP, 2011, como citado en Campos, 2016, p. 16).

Gran parte de la composición química del arrabio se atribuye al hierro (por encima del 90%) (Carrillo, 2017, p. 78). En relación a lo anterior, cabe destacar que un cierto porcentaje de dicho elemento ( $Fe$ ) contenido en el arrabio pasará a constituir parte de la escoria formada, representando esto la primera pérdida metálica del proceso productivo.

### **2.1.1.2 Convertidor al oxígeno**

El objetivo de esta etapa consiste en la transformación del arrabio en acero. Para ello, se dispone de un convertidor básico al oxígeno (o bien *BOF*: “*Basic Oxygen Furnace*”) al cual se le cargan chatarra metálica y el arrabio desulfurado proveniente de la etapa anterior, además de cal (para permitir la formación de escoria como subproducto) y la inyección de oxígeno. Éste último, permite dar paso a las reacciones de combustión al interior del equipo para oxidar las impurezas del arrabio. Dichas reacciones son exotérmicas y hacen incrementar considerablemente la temperatura al interior del convertidor dando paso a la fundición del contenido metálico ingresado al mismo (Pulgar, 2018, p. 3). No obstante, las paredes del convertidor están recubiertas con ladrillos refractarios capaces de resistir las altas temperaturas por efectos de la fundición del metal (Campos, 2016, p. 21).

La chatarra adicionada al convertidor se usa como refrigerante del baño metálico, haciendo que la temperatura de operación al interior del equipo se mantenga dentro de un rango adecuado (Cocunubo, 2018, p. 24). Cabe resaltar que la chatarra adicionada al convertidor fundamentalmente se usa como carga fría, debido a que el calor producido por la oxidación de las impurezas del arrabio (particularmente, del silicio, manganeso y fósforo), por sí solo, elevaría mucho la temperatura del baño de acero, generando un desgaste considerable del refractario y la no obtención de resultados deseados (Lucero, 2004, como citado en Campos, 2016, p. 21).

La oxidación del carbono contenido en el arrabio con el aire inyectado genera la liberación de monóxido y dióxido de carbono (Campos, 2016, p.27). Cabe destacar también que existe un proceso de post combustión, en donde parte del monóxido de carbono formado se combustiona para generar dióxido de carbono (Voraberger et al., 2022, p. 4).

Por su parte, las impurezas del arrabio forman óxidos que se eliminan con la escoria, incluyendo al azufre que no se logró eliminar del arrabio en la etapa de desulfuración (esto último implica la liberación de dióxido de azufre  $SO_2$ , aunque en un contenido mínimo) (Campos, 2016, pp. 27, 40). En relación a los óxidos formados, cabe destacar que el óxido de hierro ( $Fe_xO_x$ ) constituye un porcentaje importante de la composición de la escoria formada y además una mayor cantidad de hierro presente en ella implica que existirá menos cantidad de dicho elemento en el acero líquido producido (este último se obtiene gracias al sangrado, el cual se realiza a través de cucharas cuando se ha logrado alcanzar la composición y temperatura deseadas del metal), afectando negativamente el rendimiento metálico del convertidor (Carrillo, 2017, p. 70; Lucero, 2004, como citado en Campos, 2016, p. 22; Nascimento et al., 2009, p. 2).

Otra función que tiene el oxígeno inyectado en la presente etapa es la de realizar una acción física. Esto es, contribuir al movimiento del baño metálico y la escoria para así aumentar la superficie de interfase entre ambos, facilitando su separación (Lucero, 2004, como citado en Campos, 2016, p. 21). Además, una vez finalizado el soplado de oxígeno se toma un muestra del metal (a través de una sub-lanza) para el análisis tanto de su temperatura como de su composición química, de tal forma que si se arrojan valores fuera del rango requerido se

procede a una etapa de resoplado para lograr ajustarlos (Lucero, 2004, como citado en Campos, 2016, p. 22).

Por diferencia de densidades, al momento de realizar el sangrado la escoria se encuentra por encima del metal caliente en la interfase acero-escoria dentro del convertidor. Se utilizan refractarios en forma de dardos que flotan en la interfase para bloquear el paso de la escoria por el tubo de sangría del equipo. En simultáneo al sangrado, se agregan ferroaleaciones a la hornada para ajustar su composición química. Una vez concluido el sangrado, se procede al desescoriado (Lucero, 2004, como citado en Campos, 2016, p. 22).

La presente etapa genera liberación de material particulado, el cual a su vez puede contener diferentes concentraciones de óxidos minerales y óxidos de metal. Dichas emisiones pueden ocurrir durante las operaciones de carga, soplado de oxígeno, oxidación de impurezas del arrabio y el sangrado (Corporación Financiera Internacional, 2007, pp. 3-4).

Por último, en esta etapa se dispone de un sistema de extracción de gases y lavado posterior. Este último, se realiza a través de la inyección de agua a alta presión que genera que las partículas suspendidas sean arrastradas por el agua, la cual es capturada y llevada a un sistema de espesamiento que finalmente permite la separación entre agua clarificada y los barros que constituyen las partículas sólidas y que también incorporan óxido de hierro (Álvarez, 2016, pp. 76-77).

A continuación, la figura 2.1 resume las etapas del proceso de conversión al oxígeno.

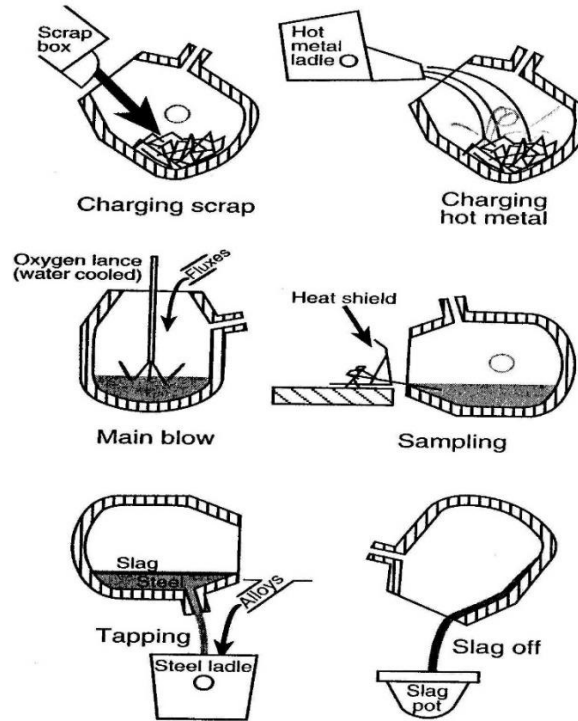


Figura 2.1: Etapas del proceso de conversión al oxígeno

Fuente: Diapositivas ACC

### 2.1.1.3 Estación de ajuste metalúrgico

También conocida como “Metalurgia Secundaria”, debido a que se estabilizan tanto la temperatura como la composición química de la hornada en proceso. En relación a la primera, ésta se relaciona con los objetivos ambientales y de eficiencia de la presente etapa, debido a que al reducir los tiempos de calentamiento se genera disminución de emisión de partículas metálicas (polvos) y se reduce el consumo de energía eléctrica necesaria (esta última es suministrada a través de electrodos de grafito, que aportan temperatura al baño de acero para evitar que éste se solidifique prematuramente, antes de llegar a la etapa final). Mientras que, en relación a la segunda, esto se logra a través de la adición de diferentes elementos aleantes (cuyas cantidades a adicionar están en función de la diferencia existente entre el análisis químico de la hornada en proceso y la especificación del grado de acero que se desea obtener) (Campos, 2016, pp. 17-18; Pulgar, 2018, p. 3).

#### **2.1.1.4 Estación de vacío**

En esta etapa, el acero cuyas características fueron ajustadas en la etapa anterior es sometido a una desgasificación para su posterior entrada a la colada continua de palanquillas. Esto es, se genera una liberación de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno gaseosos desde el metal fundido, debido a que dichos elementos pueden empeorar sus propiedades físicas y mecánicas (por ejemplo, ocasionando aumento de porosidad o bien reduciendo la ductilidad del acero) (Marpa Vacuum, 2021).

#### **2.1.1.5 Colada continua de palanquillas**

El acero desgasificado proveniente de la etapa anterior ingresa a la máquina de Colada Continua que posee rociadores de agua refrigerante. A través del suministro de esta última, se da paso al intercambio de calor entre ella y el acero entrante, permitiendo la solidificación de éste último y su transformación en palanquillas. Éstas constituyen los productos semiterminados, los cuales posteriormente pasan a la Unidad de Productos Largos para dar paso al proceso de laminación y así proporcionar los formatos y diámetros solicitados por los diferentes clientes de la Compañía Siderúrgica Huachipato (Campos, 2016, p. 20; Pulgar, 2018, p. 3).

La figura 2.2 corresponde a un diagrama de flujo del proceso productivo completo desarrollado en Acería Colada Continua.

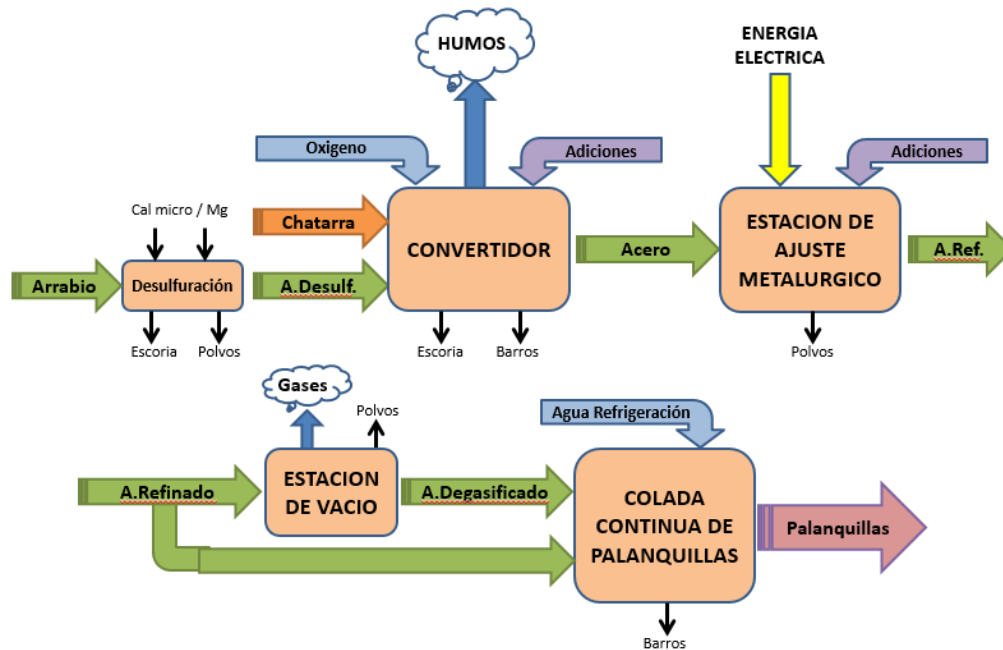


Figura 2.2: Diagrama de flujo de proceso desarrollado en ACC

Fuente: Diapositivas ACC

## 2.1.2 Antecedentes teóricos del proyecto

Parte de la información presentada en las secciones 2.1.2.1 y 2.1.2.2 fue extraída desde tres documentos de la empresa de carácter confidencial.

### 2.1.2.1 Chatarra en el contexto de Acería Colada Continua

Primeramente, se considera como chatarra a toda pieza sólida metálica, ya sea de acero o hierro fundido, que pueda ser cargada al convertidor. Además, la chatarra se considera contaminada cuando ésta incorpora elementos químicos cuya presencia en determinados grados de acero es perjudicial para sus aplicaciones (por ejemplo: cromo, cobre y níquel).

En caso de que una carga de chatarra contenga materiales que sean considerados como contaminantes, ésta deberá no ser incorporada a los carros transportadores de chatarra evitando su ingreso al convertidor. Dentro de estos materiales, principalmente, se destacan: aquellos que contengan fragmentos de vidrio, gomas, madera y/o plástico, aquellos que por sí solos constituyan contaminantes para el acero y/o el medioambiente (por ejemplo, el cobre, bronce, aluminio, cromo, plomo, aceros inoxidables y no magnéticos), aquellos que

contengan combustibles, motores eléctricos que incluyan bobina o a los que previamente no se les hayan retirado las partes no ferrosas (por ejemplo, cables), y neumáticos.

#### **2.1.2.1.1 Tipos de chatarra en Acería Colada Continua**

Las distintas clases de chatarra con las que se trabaja en Acería Colada Continua se agrupan en tres tipos, los cuales son: interna, procesada y externa. Las clases de chatarra junto con sus respectivas cantidades a cargar están en función de los diferentes grados de acero que se deseen producir.

- **2.1.2.1.1.1 Chatarra interna:** corresponde a chatarra de acero de primera calidad (es decir, libre de elementos contaminantes o con muy bajo contenido de ellos y con una composición de hierro superior al 95%) la cual se obtiene a partir de los retornos provenientes desde la etapa de colada continua de palanquillas, la Unidad de Productos Largos o bien de los propios clientes de la Compañía Siderúrgica Huachipato.
- **2.1.2.1.1.2 Chatarra procesada:** es aquella recuperada a partir de los subproductos que se generan durante el proceso desarrollado en Acería Colada Continua (por ejemplo, a partir de la piscina de escoria formada durante el proceso de conversión al oxígeno). A diferencia de la chatarra interna, ésta puede incorporar elementos contaminantes no deseados y tiene una amplia variación en el contenido metálico (entre 65% y 85%, en general).
- **2.1.2.1.1.3 Chatarra externa:** es aquella proveniente de los proveedores (nacionales o extranjeros) de la Compañía Siderúrgica Huachipato, sobre la cual es necesario realizar un proceso de inspección y clasificación antes de hacer su entrada al convertidor. Éste tipo de chatarra puede proceder de mermas de procesos industriales, además de poder presentarse en los formatos de planchas, barras, tubos o bien compactada en bloques. Dentro de la compañía se manejan chatarras externas pesada y liviana (con alta y baja densidad aparente, respectivamente). El porcentaje de hierro contenido en esta chatarra es alto, encontrándose por sobre el 90% generalmente.

Cabe destacar que la chatarra externa liviana es la única que, eventualmente, podría ser sometida a un procesamiento previo dada su baja densidad aparente, convirtiéndola en

chatarra de alta densidad. En la figura 2.3, se muestra una pila de chatarra externa liviana (izquierda) y una pila de chatarra ferrosa triturada (derecha).



**Figura 2.3: Chatarra externa liviana y chatarra ferrosa triturada**

**Fuente: Elaboración propia**

#### **2.1.2.1.2 Antecedentes históricos de uso de chatarra previamente tratada**

Tradicionalmente, la chatarra que se hace ingresar al *BOF* para el procesamiento de las hornadas constituye un mix, dentro del cual se encuentran chatarra de acero (tanto interna como externa) y chatarra procesada. Particularmente, la chatarra de acero externa es la que se utiliza mayoritariamente para cargar el convertidor. La amplia variación en el contenido metálico de la chatarra procesada puede provocar irregularidades en el índice de rendimiento metálico del convertidor (IRM). Este es un indicador que se calcula como sigue en la ecuación 2.1.

$$IRM = \frac{\text{Masa de acero líquido producido por el convertidor}}{\text{Masa total de carga metálica de entrada al convertidor (arrabio + chatarra)}}$$

**Ecuación 2.1: Índice de rendimiento metálico del convertidor (IRM)**

Existen registros de una experiencia en Acería Colada Continua referida a la utilización de chatarra externa previamente triturada como carga al *BOF*, con alto contenido ferroso y de alta densidad. Dicha experiencia (enero 2020) consistió en comparar los siguientes aspectos: rendimiento del convertidor, cantidad de cajas necesarias para cargar la chatarra, composición de elementos residuales (específicamente, el cromo, cobre y níquel) y calidad de los humos que salen del convertidor. Más precisamente, dichos aspectos fueron estudiados para una situación en donde sólo se incorpora aquella chatarra triturada como carga al

convertidor y para otra en donde se utiliza el mix tradicional de chatarra como carga. Para estudiar ambas situaciones y poder compararlas, para cada una se consideró una muestra de 7 hornadas (cada una con distintas cantidades de chatarra y arrabio cargados, pero siempre manteniendo la proporción estándar típica de 30 es a 70).

Continuando con lo anterior, los resultados arrojaron un incremento en el rendimiento del convertidor cercano al 2%, un menor promedio de utilización de cajas transportadoras (sólo 2), un menor contenido de todos los elementos residuales previamente mencionados en el acero producido y una mejor apariencia de los humos emitidos (aspecto más “blanco”) al utilizar sólo la chatarra fragmentada. Particularmente, en relación al aspecto de los humos fugitivos, se observó que al cargar sólo chatarra externa sin triturar, se obtiene un peor resultado que cargando sólo la chatarra triturada y un mejor resultado que cargando el mix tradicional de chatarra.

#### **2.1.2.1.3 Aspectos en el proceso de conversión al oxígeno afectados por las proporciones de chatarra y arrabio cargados**

En esta sección se analiza cómo influyen las variaciones en las proporciones de carga metálica (arrabio y chatarra) ingresadas al convertidor en diferentes aspectos.

Medio ambiente: En cuanto a la perspectiva ambiental, utilizar una mayor tasa de chatarra en lugar de arrabio para cargar el convertidor genera menor cantidad de gases emitidos desde dicho equipo (más precisamente, de monóxido y dióxido de carbono). Esto se debe al menor contenido de carbono en la carga ingresada (la presencia de dicho elemento en la composición química del arrabio es mayor que en la de la chatarra). No obstante, utilizar altas tasas de chatarra conlleva a que los elementos residuales sean factores limitantes para la elaboración de varios grados de acero (Voraberger et al., 2022, pp. 4, 16).

Índice global de transformación (IGT): corresponde a un indicador que se calcula como sigue en la ecuación 2.2 (L.G. Arqueros, comunicación personal, 19 de agosto de 2023).

$$IGT = \frac{\text{Masa de acero semiterminado producido por el convertidor}}{\text{Masa de arrabio alimentado al convertidor}}$$

**Ecuación 2.2: Índice global de transformación (IGT)**

### 2.1.2.2 Análisis previo de alternativas tecnológicas disponibles

En general, el procesamiento de chatarra hace referencia a cualquier proceso de orden mecánico el cual tenga como finalidad la reducción en el tamaño de alguna sustancia sólida en partes más pequeñas (Bruna & Suárez, 2016, p. 43).

Existe un documento confidencial de la empresa en el que se muestra una estimación general de los rangos de densidades aparentes resultantes del tratamiento de chatarra para diferentes tipos de maquinarias. Dentro de los posibles equipos industriales se encuentran las plantas de fragmentación, máquinas que funcionan en base a cizallas (con y sin separador magnético), tijeras y prensas o briquetadoras. A continuación, en la tabla 2.1 se presentan los rangos de densidad aparente resultante del tratamiento estimados para cada equipo.

| <i>Tipo de maquinaria</i>       | <i>Rango de densidad aparente de chatarra procesada</i> |
|---------------------------------|---|
| Planta de fragmentación         | 0,9 – 1,2 (ton/m <sup>3</sup> )                         |
| Cizalla con separador magnético | 0,5 – 0,7 (ton/m <sup>3</sup> )                         |
| Cizalla sin separador magnético | 0,5 – 0,7 (ton/m <sup>3</sup> )                         |
| Tijera                          | 0,3 – 1,0 (ton/m <sup>3</sup> )                         |
| Prensa                          | 0,5 – 0,8 (ton/m <sup>3</sup> )                         |

**Tabla 2.1: Rangos de densidad aparente de chatarra procesada en función de maquinaria utilizada**

**Fuente: Diapositivas ACC**

En relación a la experiencia previamente descrita en la Compañía Siderúrgica Huachipato en la que se utilizó chatarra fragmentada, su densidad aparente estimada fue de 1,16  $\left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)$  que equivale a casi el doble de la densidad de la chatarra externa tradicional utilizada. Por lo tanto, tomando como referencia los valores presentados en la tabla 2.1, ello constituye un antecedente importante para la selección del tipo de maquinaria a incorporar, la cual corresponde a la planta de fragmentación debido a que el límite superior del intervalo de densidad aparente resultante del tratamiento es mayor a todos los demás, junto con el hecho de que el límite inferior es mayor que los límites superiores de todas las demás alternativas (salvo para el caso de tijeras, pero la diferencia entre su límite superior y el inferior de la planta fragmentadora es pequeña).

Más aún, el principal equipo de procesamiento utilizado por empresas que manejan altos volúmenes de chatarra ferrosa corresponde a un sistema de trituración integrado o planta de fragmentación, en donde se engloban los procesos de trituración, separación magnética y

limpieza de chatarra. Esto es, la chatarra es fragmentada mediante martillos fijados a un rotor horizontal y luego pasa por un tambor magnético cuya función es separar los materiales ferrosos de los no ferrosos, de tal forma que la chatarra magnetizable es atraída por el cilindro y la no magnetizable cae por un conducto. (Trindade, 2013, pp. 27-28).

#### **2.1.2.2.1 Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra**

##### **2.1.2.2.1.1 Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra en Latinoamérica**

A nivel nacional, en “AZA” se tenía planificado el comienzo de la operación de un equipo de fragmentación de chatarra para el año 2023, con el objetivo de optimizar el proceso siderúrgico (en horno de arco eléctrico), logrando una mayor eficiencia energética en el proceso productivo y una reducción en las emisiones de gases, material particulado y producción de escoria, contribuyendo esto último a un mayor rendimiento metálico en el proceso de fundición (AZA, s.f., p. 25). Otro beneficio esperado de la operación de este equipo en la planta de Colina de esta siderúrgica es un aumento en la productividad de la acería en  $10 \left( \frac{ton}{hr} \right)$  (AZA, s.f., p. 79).

Fuera del territorio nacional, “Ternium” es una de las empresas líderes en la industria del acero en el continente americano, la cual dispone de centros productivos en Argentina, Brasil, Estados Unidos, Guatemala, México y Colombia (Ternium Argentina, s.f., sección Conocé más sobre Ternium en Argentina). Precisamente, en este último país, en la planta de la ciudad de Caldas se incorporó una máquina fragmentadora de chatarra para contribuir al proceso de fundición en convertidores (La Patria, 2017).

En Colombia, “Acerías Paz del Río” es la única siderúrgica integrada de aquel país, la cual adquirió una fragmentadora para permitir la reducción de elementos contaminantes del acero y así incrementar la calidad del acero final producido (BNamericas, 2004). Otro ejemplo corresponde a “SIDOC”, que hace algunos años comenzó a hacer operativa una maquinaria de fragmentación de chatarra permitiendo la mejora de índices operativos en el proceso de fundición (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia, 2023, p. 2).

Otras siderúrgicas destacables corresponden a “Aceros Arequipa” y “Adelca”. Estas son las empresas acereras líderes en Perú y Ecuador, respectivamente (Aceros Arequipa, s.f., sección

Conócenos; Adelca, s.f., sección Quiénes somos). La primera dispone de dos patios de chatarra en Florida (Estados Unidos) que le proveen de chatarra fragmentada (en aquel sitio, existe una fragmentadora y un separador magnético para permitir la segregación de componentes no ferrosos para exportarlos principalmente al continente asiático) (Aceros Arequipa, 2021, p. 19; KALLPA SAB, 2023, p. 12). Mientras que, la segunda ha incorporado equipos fragmentadores justificado por un consumo energético más eficiente de los hornos de arco eléctrico (Madías, 2013, p. 33).

#### **2.1.2.2.1.2 Estado del Arte de las fragmentadoras de chatarra en el resto del mundo**

El sistema de trituración integrado es ampliamente utilizado en Canadá, Estados Unidos y Europa (Trindade, 2013, p. 27). Más aún, en estas dos últimas regiones y en Japón históricamente se han incorporado equipos de fragmentación de chatarra (tanto siderúrgicas como empresas recicladoras de chatarra) donde para el caso de las empresas productoras de acero ello se justifica por el incremento en el rendimiento metálico de los hornos de arco eléctrico. Particularmente, las tendencias regionales son las siguientes: plantas de trituración grandes y muy grandes en Estados Unidos, de tamaño mediano y grande en Europa, y de pequeño tamaño en Japón (Madías, 2013, p. 30).

A modo de ejemplo, “ArcelorMittal” es una de las siderúrgicas más importantes del mundo (en términos de volumen de producción anual de acero) (Di Maggio, 2023). Diferentes plantas siderúrgicas filiales a esta multinacional han incorporado chatarra metálica procesada proveniente de empresas dedicadas al reciclaje de chatarra ferrosa, como por ejemplo “*Zakład Przerobu Złomu*” que abastece de dicha materia prima a diferentes plantas de la multinacional en Polonia y que fue adquirida por esta última (Hill, 2023). Otros ejemplos de adquisiciones de aquel tipo de empresas por parte de la multinacional se encuentran en Países Bajos (“*Riwald Recycling*”) y en Escocia (“*John Lawrie Metals Ltd*”), en donde dichas medidas forman parte de una estrategia de ArcelorMittal para reducir las emisiones de carbono en la ruta de producción de acero, mediante el incremento en el uso de chatarra (Hill, 2022).

Además, en relación a ArcelorMittal, el proyecto “Hyper Deep Scrap” en el contexto de “*AM Sestao*” (una siderúrgica filial presente en el País Vasco, España) consistió en la investigación de tecnologías avanzadas para la separación de materiales en el proceso de

fragmentación de chatarra que apoyaran el procesamiento de la misma en la planta de tratamiento de aquella siderúrgica. En relación a los resultados, puede destacarse que el incremento alcanzado en la densidad aparente de la chatarra producto de su trituración es del 50% y que la tecnología previamente mencionada permitió, además de la separación de metales ferrosos de otros materiales, reducir la generación de escoria y emisiones en la ruta de producción mediante horno de arco eléctrico (Izaite, s.f., pp. 184-185).

### **2.1.3 Justificación del proyecto**

En la presente sección se analiza la justificación de la realización del proyecto, desde las perspectivas económica, medioambiental y operacional. Cabe destacar que la experiencia en Acería Colada Continua previamente descrita en donde se utilizó chatarra triturada constituye un buen punto de partida para evaluar la posibilidad de la inversión en cuestión, dados los favorables resultados observados referidos al rendimiento metálico, humos del convertidor y promedio de cajas de carga utilizadas.

#### **2.1.3.1 Aspecto económico**

En esta sección se discute el impacto del tamaño y composición química de la chatarra en el rendimiento metálico del convertidor. Se plantean dos hipótesis las cuales finalmente, en base a información recopilada en artículos científicos, se aceptan.

*Hipótesis 1: “Un menor tamaño de la chatarra (mayor densidad aparente) conlleva a un incremento en el rendimiento metálico del convertidor”*

Al ser sometida a un procesamiento determinado, la chatarra sufre un incremento en su densidad aparente (una misma masa puede ocupar un menor volumen en el espacio).

Las dimensiones de la chatarra ingresada como carga al convertidor deben ser tales que se permita su completa fusión durante el soplado (Cano, 2009, p. 47). Bajo esta línea, el tamaño de la chatarra también afecta su velocidad de fusión. Es decir, los trozos muy grandes tardarán más en fundirse (Coronado, 2018, p. 36). Esto es importante de resaltar debido a que al procesar la chatarra, se está logrando una distribución relativamente uniforme del tamaño de las partículas, pudiendo facilitar el proceso de fusión.

En relación al párrafo anterior, y más acabadamente, en estudios realizados por Penz et al. (2017) y Penz et al. (2019), se comparan escenarios de carga de masas idénticas de chatarra con forma esférica y diferentes radios en un *BOF*, concluyendo que un menor tamaño favorece una mayor área superficial de contacto entre el arrabio y la chatarra para dar paso a la transferencia de calor dentro del horno, por lo cual la segunda requerirá de un menor tiempo de soplado para poder fundirse. Una consecuencia de esto, es que la temperatura final del baño metálico será menor mientras la chatarra utilizada sea de menores dimensiones, lo que da cuenta del impacto del tamaño de la chatarra en su efecto de enfriamiento en el interior del convertidor.

Ahora bien, intuitivamente un menor tiempo de soplado debiera ir acompañado de una menor oxidación de hierro, contribuyendo a una mayor recuperación de este elemento en el sangrado (en desmedro de una menor formación de *FeO* en la escoria). En efecto, en Shukla et al. (2010), se ilustra la variación del contenido de *FeO* en la escoria en función del tiempo de soplado para un *BOF*, para diferentes proporciones de chatarra en función de su espesor (dada la información disponible, se asoció el término “espesor” con las dimensiones de la chatarra). Los resultados indican que a mayor proporción de carga de menores dimensiones, más bajo es el contenido de *FeO* en la escoria al final del soplado.

Más aún, en Pak et al. (2011), se ilustra una relación positiva entre las variables densidad de la chatarra y rendimiento metálico de un convertidor al oxígeno en el centro siderúrgico ruso “*Chelyabinsk Metallurgical Combine*” (*ChMK*). Ésta conclusión puede reforzarse en Sigaryov et al. (2020), en donde puede apreciarse que al utilizar una carga de 100% chatarra de alta densidad, el intervalo de incremento en el rendimiento metálico de un *BOF* oscila entre 1.5 y 2 puntos porcentuales en relación a una situación donde se utiliza un 100% de chatarra de baja densidad (en términos generales, pues el artículo no cuantifica numéricamente los conceptos de alta y baja densidad).

*Hipótesis 2: “Una mejor composición química de la chatarra (mayor contenido de hierro y menor contenido de impurezas o elementos residuales) conlleva a un incremento en el rendimiento metálico del convertidor”*

Primeramente, cabe resaltar que el procesamiento de chatarra, al generar una distribución uniforme en su tamaño, conlleva a una mayor efectividad en un proceso posterior de

separación magnética (los metales ferrosos se separan del contenido no ferroso, tanto metales como impurezas, contribuyendo a mejorar la composición química de la chatarra para ingresarla al convertidor) (Manouchehri, 2018, pp. 25, 52).

En Lu et al. (2023), se describen las composiciones químicas de 10 clases diferentes de chatarra utilizadas para la fundición en un convertidor donde la carga de chatarra equivale a aproximadamente el 25% de su capacidad total, para luego estudiar cuantitativamente la diferencia entre la cantidad de acero líquido y escoria producidos por tonelada de chatarra utilizada de cada clase (éstas son analizadas individualmente). Los resultados muestran que a mejor calidad de la chatarra, mayor es el valor de dicha diferencia. Además, en aquel artículo se consideran 5 escenarios de carga con un mix de 5 clases de chatarra (en todos ellos, la masa total de carga es la misma), observando que a mayor fracción másica de chatarra de mejor calidad dentro del mix se produce menor cantidad de escoria por tonelada de chatarra utilizada.

Por otro lado, en Matino et al. (2017), se comparan indicadores *KPI* asociados al rendimiento metálico y formación de escoria en función de la composición química de 3 tipos de chatarra utilizadas en un horno de arco eléctrico (alta, media y baja calidad, en donde una baja calidad está asociado a un mayor contenido de elementos indeseados en la carga al *BOF*, que incluyen los materiales que no debiesen ser ingresados como carga metálica en CAP Acero y que fueron mencionados previamente) con respecto a la ruta de producción estándar ("*CS<sub>standard</sub>*") para una familia de acero particular (número 5). La ruta estándar tiene un contenido mayoritario de chatarra de media calidad, y se observa que mediante una ruta en donde el contenido mayoritario es de alta calidad ("*CS<sub>2</sub>*") se obtienen mejores valores de ambos *KPI* previamente mencionados, al contrario que mediante una ruta en donde el contenido mayoritario sea de baja calidad ("*CS<sub>3</sub>*" y "*CS<sub>4</sub>*"). Cabe destacar que en estos últimos dos casos se observa una caída del rendimiento metálico en un 3% aproximadamente.

### **2.1.3.2 Aspecto medioambiental**

En esta sección se aborda, en primera instancia, la relación entre la composición química de la chatarra y las emisiones de gases al ambiente, particularmente de  $CO_2$  (se formula una hipótesis que finalmente es aceptada). Luego, se cuantifica el impacto del procesamiento de chatarra en el IGT a partir del cálculo teórico de las emisiones globales de  $CO_2$  por tonelada

de arrabio. Por último, en base a informes de medición de gases que dispone la empresa se realizan cálculos teóricos de emisiones de  $CO_2$  para determinar qué tanta cercanía tienen los resultados con respecto a lo que se observa en la vida real. Además, dichos resultados son utilizados para el cálculo de otros valores los cuales también son comparados con valores de referencia (este punto es explicado en detalle más adelante).

*Hipótesis 1: “Una mejor composición química de la chatarra (mayor contenido de hierro y menor contenido de impurezas o elementos residuales) contribuye a aminorar el impacto ambiental derivado del proceso de conversión al oxígeno”*

En relación a la composición química de la chatarra, en Ilutiu-Varvara et al. (2019) se estudia la relación entre “pérdidas de sustancias” (referido a pérdidas de  $Fe$  en el sangrado) y las emisiones al ambiente. Para ello, se experimenta con diferentes mix de carga de chatarra y se concluye que una peor calidad de la misma (es decir, con un mayor contenido de elementos residuales como níquel, zinc, cromo y sobre todo plásticos) conlleva a mayores “pérdidas de sustancias” y en consecuencia a mayores emisiones ambientales de  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ , óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), y material particulado (entre otras).

Por otro lado, en Ryman & Larsson (2006) se menciona que una opción para reducir las emisiones de  $CO_2$  en el proceso de producción de acero es mediante un incremento en el contenido de  $Fe$  en la chatarra metálica ingresada como carga al  $BOF$ .

### **2.1.3.2.1 Impacto de procesamiento de chatarra en IGT**

#### **2.1.3.2.1.1 Cálculo de emisiones de $CO_2$ por tonelada de arrabio en Alto Horno**

Para la compañía, el coque es la materia prima que determina las emisiones de gases por la producción de arrabio en el Alto Horno y tiene un contenido promedio de carbono de 86,35%.

El proceso de cálculo es detallado en “Anexo 1”. En primer lugar, se debe calcular las emisiones de  $CO_2$  por tonelada de coque utilizada, para lo cual se debe considerar la reacción de oxidación del carbono que ocurre en el interior del equipo. Luego, a partir de dicha reacción, de la ecuación 6.1, de la pureza del coque y del consumo de coque por tonelada de arrabio producida se obtiene un valor de  $1,464 \left( \frac{t(CO_2)}{t(arrabio)} \right)$ .

### 2.1.3.2.1.2 Cálculo de emisiones de $CO_2$ por tonelada de arrabio en BOF

El proceso de cálculo es detallado en “Anexo 2”. En primer lugar, se realiza un balance de masa de carbono para la etapa de conversión al oxígeno considerando las masas promedio de entrada de chatarra y arrabio, además de sus contenidos de carbono promedio (ver figura 6.1 y ecuación 6.2). Habiendo determinado el total teórico de carbono que ingresa al convertidor por hornada, para calcular el promedio de toneladas de  $CO_2$  por hornada se debe considerar la reacción de oxidación del carbono que ocurre en el interior del equipo. Luego, haciendo uso de las ecuaciones 6.1 y 6.2 se obtiene un valor de  $0,173 \left( \frac{t(CO_2)}{t(arrabio)} \right)$ .

### 2.1.3.2.1.3 Cálculo de emisiones globales de $CO_2$ por tonelada de arrabio en la ruta integrada

El total de emisiones globales de  $CO_2$  por tonelada de arrabio en la ruta integrada viene dada por las sumas de las emisiones de aquel gas por tonelada de arrabio en Alto Horno y en el BOF. De esta forma, se obtiene:

$$1,464 \left( \frac{ton CO_2}{ton (arrabio)} \right) + 0,173 \left( \frac{ton (CO_2)}{ton (arrabio)} \right) = 1,637 \left( \frac{ton (CO_2)}{ton (arrabio)} \right)$$

Luego, considerando el valor obtenido recientemente y el término “x” como un número que representa un valor determinado de IGT, para chatarra sin procesar se tiene que la cantidad de toneladas de  $CO_2$  emitidas en la ruta integrada atribuidas a la producción de una tonelada de palanquilla (en función del IGT) corresponde a:

$$\frac{1,637 \left( \frac{ton (CO_2)}{ton (arrabio)} \right)}{x \frac{(ton (palanquilla))}{(ton (arrabio))}} = \frac{1,637}{x} \left( \frac{ton (CO_2)}{ton (palanquilla)} \right)$$

Ahora bien, tomando como referencia (desde la sección 2.1.3.1) el artículo científico desde el cual se estima que el rendimiento metálico puede aumentar entre 1.5 a 2 puntos porcentuales al pasar de utilizar chatarra de baja densidad a alta densidad, en consecuencia el valor del IGT (cualquiera que sea) se incrementa entre 1,015 a 1,02 veces.

De esta forma, el procesamiento de chatarra permite que la cantidad de toneladas de  $CO_2$  emitidas en la ruta integrada por tonelada de palanquilla producida (en función del IGT) se encuentre dentro del siguiente intervalo de valores:

$$\left[ \frac{1,637}{x} \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{palanquilla})} \right) / 1,02 ; \frac{1,637}{x} \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{palanquilla})} \right) / 1,015 \right]$$

$$= \left[ \frac{1,604}{x} \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{palanquilla})} \right) ; \frac{1,612}{x} \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{palanquilla})} \right) \right]$$

Dado lo anterior, se estima que al procesar la chatarra, la disminución en la cantidad de toneladas de  $CO_2$  emitidas en la ruta integrada por tonelada de palanquilla producida varía entre 0,025 y 0,033 toneladas (para cualquier valor de IGT).

#### **2.1.3.2.2 Cálculo de emisiones de $CO_2$ teóricas y validación de resultados**

Según la información presentada en los informes de medición, como resultado del proceso ocurrido en el *BOF*, además de material particulado, se emiten  $CO$  y  $CO_2$  como gases desde dicho equipo, los cuales llegan a una campana extractora. El espacio que hay entre la boca del convertidor y la entrada de la campana permite que el aire proveniente de la atmósfera ingrese a esta última, contribuyendo a una reacción de post combustión por la presencia de oxígeno. Esto es, parte del  $CO$  emitido reacciona con el oxígeno del aire entrante para formar  $CO_2$ . Luego, la campana extractora de gases los conduce hacia un sistema de lavado compuesto por un lavador primario y secundario. La finalidad del lavado es lograr la separación de los gases del material particulado, para que luego los primeros ingresen a la chimenea (en la cual se toman mediciones de  $CO$  y/o  $CO_2$ ) y así sean expulsados a la atmósfera como gases limpios.

En relación a las mediciones de gases tomadas en la chimenea, se dispone de informes de medición para los siguientes meses de 2023: enero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Para cada uno de dichos meses, se tienen datos de 3 hornadas, junto con sus correspondientes masas de chatarra, arrabio, acero y  $CO$  emitido, además de porcentajes de carbono en el arrabio y en el acero producido. Así, para cada mes se trabaja con los valores promedios entre las 3 hornadas. A partir de dichos datos, y realizando un balance de carbono (según lo ilustrado en la figura 6.1), se calcula la masa de  $CO_2$  que debiera emitirse en función de la medición de  $CO$  registrada. Cabe destacar que existe un único informe de medición en donde se registran las mediciones tanto de  $CO$  como de  $CO_2$  en la chimenea, el cual corresponde al de noviembre de 2023.

Usando la información disponible en los informes de medición, para cada mes se calculan 3 valores: el cociente entre las masas de  $CO$  y  $CO_2$  emitidas, el cociente entre las masas de  $CO_2$  y arrabio y el cociente entre las masas de  $CO_2$  y acero. A continuación, en la tabla 2.2 se presentan las respectivas medias de aquellos valores para todos los meses considerados exceptuando noviembre (en “Anexo 3” se muestran en detalle todos los datos de entrada y valores calculados para cada mes considerado en el análisis).

| Media para los meses considerados | $CO / CO_2$ | $CO_2 / \text{arrabio}$ | $CO_2 / \text{acero}$ |
|-----------------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------|
|                                   | 0,0506      | 0,156                   | 0,1325                |

**Tabla 2.2: Medias de cocientes calculados para meses considerados en informes de medición de gases**

**Fuente: Elaboración propia**

Con respecto a la tabla anterior, el promedio de las razones entre  $CO$  y  $CO_2$  resulta ser 0,0506. Ahora bien, para la validación de aquel resultado se considera como dato comparativo el cociente entre las masas de  $CO$  y  $CO_2$  registradas (en kg) en el informe de medición de noviembre, el cual corresponde a  $727 / 20298 = 0,0358$ . La diferencia entre ambos valores resulta ser  $0,0506 - 0,0358 = 0,0148$ , la cual es pequeña y por lo tanto se concluye que las emisiones de  $CO_2$  calculadas se asemejan a lo que debiera observarse en la vida real.

Por otro lado, el promedio de las razones entre  $CO_2$  emitido y arrabio utilizado resulta ser 0,156. Para la validación de este resultado se considera como dato de comparación el valor de emisiones globales de  $CO_2$  por tonelada de arrabio en el *BOF* calculado anteriormente y que corresponde a 0,173. Así, la diferencia entre ambos valores resulta ser  $0,173 - 0,156 = 0,017$ . El hecho de que aquella diferencia sea pequeña permite respaldar la conclusión obtenida anteriormente acerca del intervalo de disminución en la cantidad de toneladas de  $CO_2$  emitidas atribuidas a la producción de una tonelada de palanquilla en la ruta integrada al procesar la chatarra.

Por último, el promedio de las razones entre  $CO_2$  emitido y acero líquido producido resulta ser 0,1325. Para la validación de aquel resultado, se considera como punto de comparación un dato extraído desde un artículo científico. En efecto, en Zuliani et al. (2009), se dice que una acería integrada típica emite, en forma global, aproximadamente  $1,76 \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{acero})} \right)$ , de las cuales un 8% se deriva exclusivamente desde la producción de acero en el convertidor y

esto equivale a  $0,1408 \left( \frac{\text{ton}(CO_2)}{\text{ton}(\text{acero})} \right)$ . Así, la diferencia a calcular corresponde a  $0,1408 - 0,1325 = 0,0083$ . El pequeño valor de dicha diferencia permite respaldar aún más los valores calculados de emisiones de  $CO_2$  descritos anteriormente.

### 2.1.3.3 Aspecto operacional

En esta sección, en primer lugar se describe el concepto de eficacia general de equipos (*OEE*, o bien "*Overall Equipment Effectiveness*"). Luego, se describe la relación entre el procesamiento de la chatarra y los tiempos de operación del proceso productivo. Finalmente, se estudia cuantitativamente el impacto del tratamiento de chatarra en el *OEE* y consumos asociados a la etapa de colada continua de palanquillas.

El *OEE* es una métrica de interés en el Departamento de Ingeniería de Procesos y se calcula como sigue en la ecuación 2.3 (L. G. Arqueros, comunicación personal, 2 de octubre, 2023).

$$OEE = FC * FV * FO$$

**Ecuación 2.3: *OEE* ("Overall Equipment Effectiveness")**

En la ecuación anterior, se tiene que:

- *FC* (*factor de calidad*): referido a defectos de calidad con respecto a la producción.
- *FV* (*factor de velocidad*): referido a la velocidad a la que opera un equipo comparada con su máxima velocidad posible (máxima capacidad productiva). Particularmente para la etapa de colada continua de palanquillas, dicho factor viene dado por la ecuación 2.4

$$FV = \frac{L_c * V_c}{L_{c(meta)} * V_{c(meta)}}$$

**Ecuación 2.4: Factor de velocidad para máquina de colada continua**

En donde, " $L_c$ " y " $V_c$ " corresponden, respectivamente, al número de líneas colando y a la velocidad de colada de la máquina (esta última representa el largo de palanquilla producido por unidad de tiempo, medida en  $m/s$ ), mientras que " $L_{c(meta)}$ " y " $V_{c(meta)}$ " corresponden a los valores meta de aquellos términos.

- *FO (factor de operación)*: referido a las pérdidas de tiempo productivo por detenciones en el funcionamiento de los equipos.

Por otro lado, la densidad aparente de la chatarra influye en el tiempo de carga de la misma al convertidor. Esto es, una chatarra con mayor densidad aparente hará que se requiera una menor cantidad de cajas para cumplir con el peso de la carga previamente definido, y de esta manera se contribuye a disminuir atrasos operacionales para la producción de acero. Así, se procesa una mayor cantidad de hornadas por unidad de tiempo (o bien, una misma hornada necesita de menor tiempo para ser procesada). Esto último se traduce en una disminución del “*Tap to tap*” (tiempo de sangrado a sangrado, entre dos hornadas sucesivas) (González, 2018, pp. 79-80). Dicho *tap to tap*, abarca las siguientes actividades: desescoriado de la última hornada, mantención al convertidor, carga de chatarra de la hornada siguiente, carga de arrabio, soplado, toma de muestra para medición de temperatura y sangrado de la hornada siguiente.

Ahora bien, en la etapa de colada continua de palanquillas se dispone de una máquina de colada con 5 líneas de producción (todas ellas reciben el acero proveniente de una misma hornada) que son alimentadas desde una artesa (o *tundish*). Dicha artesa, a su vez, es alimentada por chorros de acero líquido provenientes desde cucharas transportadoras. El interior del *tundish* puede contener escoria, la cual queda adherida a las paredes y por encima del acero líquido por diferencia de densidades. El nivel de acero líquido dentro del *tundish* no puede ir disminuyendo más rápido de lo que este último es alimentado, puesto que así en algún momento quedará vacío y en ese caso la escoria se pegará a las paredes inferiores obstruyendo las líneas de colada y generando detenciones en la producción. Cuando ocurren atrasos en las etapas previas del proceso, el nivel de acero líquido dentro del *tundish* debe ir disminuyendo más lentamente para dar la holgura de tiempo necesaria a las cucharas transportadoras para alimentar el acero y de esta forma se generan cierres de líneas de producción, incrementando el tiempo de colada (L. G. Arqueros, comunicación personal, 3 de octubre, 2023).

De esta forma, la disminución del *tap to tap* contribuye a aumentar el promedio de líneas de colada operativas y por ende a aumentar el factor de velocidad (y, finalmente, el *OEE*) asociado a la etapa de colada continua. Por otro lado, cada vez que termina una secuencia de

hornadas, el *tundish* debe retirarse para extraer el remanente de acero frío (este último luego puede ser utilizado como chatarra procesada) y ser tratado para otorgarle un nuevo revestimiento y así pueda volver a ser utilizado posteriormente. Esto último se conoce como consumo de *tundish* por secuencia, y es un valor fijo equivalente a  $5000 \left( \frac{USD}{secuencia} \right)$ .

De esta forma, la justificación operacional consiste en estudiar la conveniencia de la adquisición de una máquina procesadora de chatarra (o bien, de chatarra ferrosa procesada a proveedores) en términos del consumo específico de *tundish* (es decir, por tonelada de acero producido) y del factor de velocidad con respecto a la situación actual en donde no se utiliza chatarra ferrosa procesada como materia prima.

En una situación en donde el 100% de la chatarra cargada está procesada, su mínima densidad requerida para cargar en un cierto número de cajas viene dada por la ecuación 2.5:

$$\text{Densidad mín. requerida de chatarra} = \frac{\text{Masa promedio de carga de chatarra}}{\text{Volumen máx. utilizable entre todas las cajas}}$$

**Ecuación 2.5: Densidad mínima requerida de chatarra para garantizar su carga al convertidor en un cierto número de cajas**

En Acería Colada Continua se disponen de 4 cajas de carga de chatarra utilizables, de las cuales hay 3 cuyo volumen es de  $16 (m^3)$ , del cual sólo pueden utilizarse  $14,5 (m^3)$ , y la restante tiene un volumen de  $17,4 (m^3)$  de la cual no se conoce su capacidad máxima utilizable. Así, haciendo uso de la ecuación 2.5 para el caso de 2 cajas se tiene:

$$\frac{26 (\text{ton (chatarra)})}{14,5(m^3) + 14,5(m^3)} = 0,896 \left( \frac{\text{ton (chatarra)}}{(m^3)} \right)$$

Particularmente, el estudio operacional se realiza para el grado de acero “274”. De esta forma, se consideran 2 escenarios de estudio: comenzando con 4 y con 5 líneas de colada. Además, para cada escenario existen 3 subescenarios: todas las hornadas en 2 cajas (esto corresponde al subescenario 1, que es la situación en la que se dispone de la máquina procesadora o bien en la que se compra chatarra ferrosa ya procesada, asumiendo que la densidad de la chatarra es igual o mayor al valor recientemente calculado), todas en 3 cajas (subescenario 2) y todas en 4 cajas (subescenario 3).

Cabe destacar que existen dos estaciones de ajuste metalúrgico, y las hornadas de una secuencia se van alternando entre la primera y segunda estación (esta última, a diferencia de la primera, puede tratar dos hornadas simultáneamente) con un tiempo de tratamiento que, para el caso particular del grado “274”, debe variar entre 60 y 90 (min). Además, los tiempos de traslado desde convertidor a estación de ajuste, desde estación de ajuste a estación de vacío, desde estación de vacío a colada continua y tiempo en torreta (tiempo de espera de la hornada desde que llega a la etapa de colada continua hasta que comienza a procesarse) son siempre valores fijos, los cuales respectivamente son: 25, 10, 6 y 6 (min).

### 2.1.3.3.1 Estimación de *tap to tap* del convertidor en función de número de cajas de carga de chatarra

Para determinar la variación en el *tap to tap* del convertidor dada una variación en el número de cajas de carga de chatarra, se realizaron estudios de tiempo entre el 23 de enero y el 12 de febrero de 2024. Esto es, para un total de 90 hornadas (repartidas equitativamente entre 2, 3 y 4 cajas) se determinó el tiempo de carga de chatarra al convertidor. Dicho tiempo, está medido desde que los carros transportadores comienzan a desplazarse al interior de la zona de convertidores con la chatarra cargada hasta que es vaciada la última caja de chatarra. A continuación, en la tabla 2.3 se presenta un resumen con los resultados obtenidos (para mayor nivel de detalle, ver Anexos 4, 5 y 6).

| <i>Número de cajas de carga</i> | <i>Media (s)</i> | <i>Desviación estándar (s)</i> |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|
| 2 cajas                         | 373              | 72                             |
| 3 cajas                         | 543              | 68                             |
| 4 cajas                         | 628              | 45                             |

**Tabla 2.3: Media y desviación estándar de tiempos de carga de chatarra para hornadas registradas**

**Fuente: Elaboración propia**

En base a la tabla anterior, y para efectos de análisis, se aproximan los tiempos de carga a 6, 9 y 10 (*min*) (para 2, 3 y 4 cajas, respectivamente). Luego, dado que el estándar de tiempo de *tap to tap* para una situación de carga en 2 cajas es de 42 (*min*), se estima que dicho estándar de tiempo es de 45 y 46 (*min*) para 3 y 4 cajas (respectivamente).

### 2.1.3.3.2 Cálculo de tiempo de colada en función de líneas de colada operativas

El tiempo de colada para una hornada (lapso entre que la máquina de colada comienza a producir palanquillas hasta terminar de colar) se calcula como sigue en la ecuación 2.6

$$\text{Tiempo de colada } \left( \frac{\text{min}}{\text{hda}} \right) = \frac{\text{Peso de acero } \left( \frac{\text{t}}{\text{hda}} \right)}{\text{Densidad acero líquido } \left( \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right) * \text{Área basal palanquilla } (\text{m}^2) * \text{Vel. colada } \left( \frac{\text{m}}{\text{min}} \right) * \text{Líneas colando}}$$

**Ecuación 2.6: Cálculo de tiempo de colada en función de velocidad de colada y líneas operativas**

En relación a la ecuación anterior, se considera una velocidad de colada y peso de acero por hornada fijos ( $2,3 \left( \frac{\text{m}}{\text{min}} \right)$  y  $90 \left( \frac{\text{t}}{\text{hda}} \right)$ , respectivamente). Además, la densidad del acero líquido es  $7,59 \left( \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right)$  y el área basal de una palanquilla es  $0,0256 (\text{m}^2)$ . De esta forma, haciendo los cálculos se obtiene que el tiempo de colada es de aproximadamente 50 y 40 (min) para 4 y 5 líneas operativas, respectivamente.

Cuando el *tap to tap* del convertidor es mayor al tiempo de colada, los tiempos de tratamiento en la estación de ajuste se verán obligados a disminuir para cumplir con la programación inicial establecida, a tal punto que será necesario realizar un cierre de línea (pasando de 5 a 4 líneas operativas) para evitar que dicho tiempo de tratamiento esté por debajo del mínimo requerido. En el caso contrario, el *tap to tap* deberá igualarse al tiempo de colada para evitar que se alcancen tiempos de tratamiento en la estación de ajuste mayores al máximo permitido (esto puede lograrse retrasando la carga de chatarra y/o la carga de arrabio).

### 2.1.3.3.3 Cálculo de consumo específico de *tundish* para escenarios considerados

Para el caso particular del grado “274”, y comenzando con “x” líneas operativas, se realizaron simulaciones para determinar el número de hornadas consecutivas que pueden colarse a “x” líneas. Para ello, se consideraron los tiempos de *tap to tap* del convertidor y tiempos de colada calculados previamente. Cabe destacar que dichas simulaciones son realizadas considerando que no existe ningún imprevisto en el procesamiento de las hornadas de la secuencia que implique un atraso operacional, aunque en la realidad es casi imposible que esto ocurra.

Para la primera hornada, siempre se considera que dicho tiempo de tratamiento es de 80 (min). Por otro lado, el tiempo de procesamiento en estación de vacío es de 34 (min) y 29 (min) para la primera y el resto de hornadas, respectivamente.

Para un escenario comenzando con “x” líneas operativas, el consumo específico de *tundish* viene dado por la ecuación 2.7.

$$\text{Consumo específico tundish} \left( \frac{USD}{t} \right) = \frac{\text{Consumo de tundish por secuencia} \left( \frac{USD}{\text{secuencia}} \right)}{\text{Hdas. consecutivas coladas en "x" líneas} \times \text{Peso de acero} \left( \frac{t}{hda} \right)}$$

**Ecuación 2.7: Cálculo de consumo específico de *tundish***

#### **2.1.3.3.3.1 Escenario 1: comienzo de secuencia con 4 líneas de colada operativas**

En este escenario, el tiempo de colada siempre será mayor al *tap to tap* del convertidor sin importar el número de cajas de carga. Por lo tanto, nunca será necesario efectuar un cierre de línea y así en cualquier subescenario se alcanzará la misma cantidad de hornadas consecutivas coladas a 4 líneas. De esta forma, el consumo específico de *tundish* será el mismo en todos los subescenarios y por ende no existe justificación para la incorporación de chatarra ferrosa procesada como materia prima en el proceso de conversión al oxígeno.

#### **2.1.3.3.3.2 Escenario 2: comienzo de secuencia con 5 líneas de colada operativas**

En este escenario, un menor número de cajas de carga contribuye a retrasar el cierre de línea, y por ende a aumentar la cantidad de hornadas coladas consecutivamente a 5 líneas, disminuyendo el consumo específico de *tundish*. En efecto, según los resultados de las simulaciones (ver Anexos 7, 8 y 9), el número de hornadas consecutivas coladas a 5 líneas es de 14, 5 y 4 para los subescenarios en donde sólo se carga en 2, 3 y 4 cajas (respectivamente). De esta forma, y haciendo uso de la ecuación 2.7, se obtiene que el menor consumo específico de *tundish* posible se alcanza en el subescenario en donde se adquiere la máquina procesadora o bien chatarra ya procesada, el cual equivale aproximadamente a  $4 \left( \frac{USD}{t} \right)$ . De esta forma, en este escenario sí se justifica la realización del proyecto.

#### **2.1.3.3.4 Cálculo de líneas colando promedio para escenarios considerados**

##### **2.1.3.3.4.1 Escenario 1: comienzo de secuencia con 4 líneas de colada operativas**

De acuerdo a lo explicado en la sección 2.1.3.3.3.1, no existe justificación para la inversión en la máquina procesadora o la compra de chatarra ferrosa previamente procesada, ya que el promedio de líneas colando no cambiará y por ende tampoco el factor de velocidad.

##### **2.1.3.3.4.2. Escenario 2: comienzo de secuencia con 5 líneas de colada operativas**

Para este caso, se tomó como referencia el promedio de hornadas que incorpora una secuencia, que equivale a 12. Las simulaciones (ver Anexos 10, 11 y 12) arrojaron que el número de líneas colando promedio más alto se alcanza en el subescenario en donde sólo se carga a 2 cajas. Evidentemente, no existirá ningún otro subescenario en donde se alcance un valor mayor, y por ende en este escenario se justifica la realización del proyecto dado que ello permitiría maximizar el *OEE* asociado a la etapa de colada continua de palanquillas.

## **2.2 Caracterización general del proyecto**

Desde la concepción de una idea particular hasta su ejecución, un proyecto pasa por las etapas de pre-inversión, inversión y operación (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, p. 27). Particularmente, la etapa de pre-inversión se compone de los estudios de perfil, pre factibilidad y factibilidad (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, p. 28).

El estudio de perfil tiene como principal objetivo determinar si existe alguna razón para abandonar la idea de proyecto antes de que se destinen recursos a ella. Por su parte, el estudio de pre factibilidad profundiza en un nivel más acabado en la estimación de las inversiones, costos de operación e ingresos que puedan generarse por el proyecto, de tal forma que como resultado de este estudio puede surgir la recomendación de su aprobación, su continuidad en niveles de estudio más profundos, su postergación o incluso su abandono (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, pp. 28-29). En el contexto de la presente memoria de título, el estudio del proyecto en cuestión se abordará hasta su etapa de pre factibilidad, desde las perspectivas técnica, económica y medioambiental.

### **2.2.1 Tipología del proyecto**

De acuerdo al objetivo de la asignación de recursos, el presente proyecto busca evaluar una mejora en los resultados del proceso productivo derivada de la instalación de una máquina procesadora de chatarra. Por otro lado, según la finalidad del estudio, el proyecto en cuestión busca medir la rentabilidad del total de la inversión independiente de dónde provengan los fondos (haciendo el alcance de que para dicha inversión no se incurrirá en deuda externa) (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, pp. 4-5).

### **2.2.2 Alcances del estudio del proyecto**

En general, son varios los estudios particulares que deben realizarse para evaluar un proyecto, dentro de los cuales se encuentran los de viabilidad técnica, económica y medioambiental. La primera analiza las posibilidades materiales, de mano de obra y espacio físico para la eventual instalación de la máquina procesadora. Por otro lado, la segunda mide la rentabilidad en términos monetarios que retorna la inversión inicial. Por último, la tercera busca medir el impacto ambiental derivado de la utilización del equipo industrial en cuestión, tanto en relación a las implicancias del uso de chatarra procesada en el convertidor como en lo referido netamente a la actividad de operación del equipo (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, pp. 25-26).

## **2.3. Metodología**

En esta sección se describen en detalle cada uno de los tres estudios de viabilidad considerados en el presente proyecto, que en su conjunto permitirán aportar información necesaria para la evaluación del mismo.

Cabe destacar que la realización de un estudio de mercado constituye un factor crítico en el estudio del proyecto en cuestión, puesto que proveerá información de apoyo tanto para el estudio técnico como económico del mismo.

### **2.3.1 Estudio de viabilidad técnica del proyecto**

Los objetivos de este estudio corresponden a:

- *Proveer información para cuantificar el monto de la inversión en diferentes alternativas de máquinas procesadoras de chatarra, de los costos de operación y otros desembolsos asociados a tales equipos:* esto se logra en base al análisis de las características y especificaciones técnicas de las máquinas, gracias a un previo estudio de mercado realizado en sitios web asociados con temáticas ambientales para recopilar empresas comercializadoras de tales equipos. Este punto permite apoyar al estudio económico, contribuyendo a la elaboración de flujos de caja.
- *Determinar los requerimientos de espacio físico dada la eventual incorporación de una máquina procesadora de chatarra:* esto se logra en base al análisis de disponibilidad de espacio en el patio de chatarra al interior de la compañía (donde, eventualmente, se instalaría la máquina) dada las dimensiones del equipo industrial.
- *Determinar las necesidades de mano de obra que conlleva la instalación de la máquina procesadora:* la adquisición del equipo industrial puede implicar la necesidad de un cierto número de operarios para contribuir al correcto funcionamiento de la instalación, afectando esto en los costos operacionales y por consiguiente en los flujos de caja proyectados. Por consiguiente, este punto contribuye al estudio económico.

### **2.3.2 Estudio de viabilidad económica del proyecto**

El estudio de viabilidad que determina, finalmente, la aprobación o rechazo de un proyecto corresponde al económico (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, p. 26). En este caso, dicho aspecto será apoyado por los estudios de viabilidad técnica y de mercado. Más precisamente, el cumplimiento de los siguientes objetivos permite recopilar la información necesaria para el estudio de viabilidad económica:

- *Realizar un análisis de flujos diferenciales para situaciones con y sin proyecto, considerando como base la situación vigente:* éstos representan la variación en los flujos de efectivo que implicaría la evaluación de una situación determinada con respecto a la situación actual (N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, 2014, p.89).

- *Determinar el horizonte de planeación y la tasa de descuento apropiada para la evaluación de las situaciones con y sin proyecto, considerando como base la situación vigente:* estos serán importantes para determinar los indicadores económicos VAN y TIR referidos a cada alternativa de proyecto.
- *Realizar análisis de sensibilidad del VAN:* esto implica la determinación de las variables críticas para el cálculo del VAN asociado a alguna alternativa de proyecto, para luego simular diferentes escenarios posibles de acuerdo a los valores que ellas puedan tomar. Más precisamente, se realiza una simulación de Montecarlo a través de la herramienta Crystal Ball con 2 variables de entrada (multidimensional).

### **2.3.3 Estudio de viabilidad medioambiental del proyecto**

El objetivo de este estudio corresponde a:

- *Determinar el impacto medioambiental de la utilización de una máquina procesadora de chatarra metálica tanto en relación a la variación en la cantidad de emisiones de  $CO_2$  al ambiente dado el uso de la chatarra procesada como materia prima en el proceso productivo, como a las emisiones de partículas sólidas o aguas residuales generadas por el proceso normal de operación de la maquinaria industrial:* esto implica determinar cuantitativamente el impacto del procesamiento de chatarra metálica en la disminución de toneladas emitidas al ambiente de  $CO_2$  por tonelada de palanquilla producida en función del intervalo estimado de incremento del IRM logrado al efectuar el procesamiento. Por otro lado, se debe determinar si la actividad de operación de la maquinaria industrial escogida generaría algún impacto ambiental (por ejemplo, emisiones de polvo o aguas residuales) de tal forma que no se esté cumpliendo con la o las normativas vigentes al respecto en Chile. Para esto último se revisa, desde la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, la normativa local de emisión para la regulación de contaminantes en las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

### **2.3.4 Estudio de mercado**

Los objetivos del estudio de mercado corresponden a:

- *Realizar un estudio de proveedores de procesadoras de chatarra cuyos equipos comercializados se adecúen a las necesidades de la compañía:* esto permite encontrar los modelos de máquinas procesadoras adecuadas, para de esta forma poder comparar económicamente las diferentes alternativas disponibles para adquirir. Para esto, se recopilan empresas desde revistas de la “Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje” (FER) y el sitio web “*Environmental Expert*” en donde se abarcan variadas temáticas ambientales, haciendo un filtrado por industria atendida (acero) y tipo de maquinaria comercializada.
- *Realizar un estudio de proveedores de chatarra ferrosa procesada:* esto permite aportar información para una situación sin proyecto, la cual puede corresponder a adquirir chatarra procesada desde proveedores o bien a externalizar el servicio de tratamiento de la chatarra propia de la compañía en instalaciones de reciclaje. Sin embargo, de acuerdo a sugerencias del supervisor de memoria de título, la posibilidad de optar por la externalización del servicio de tratamiento de chatarra se descarta desde un principio en vista de que los requerimientos anuales de chatarra son tales que los costos de transporte para llevar la chatarra a la instalación de reciclaje y para traerla de vuelta a la compañía en total serían muy elevados y que además habría que incurrir en costos por el servicio de tratamiento, ante lo cual es más adecuado adquirir chatarra ferrosa procesada directamente.

Para el caso de esta última alternativa, se recopilan empresas desde los sitios web “*Environmental Expert*” haciendo un filtrado por comercio de chatarra y “*Go4WorldBusiness*” que es una plataforma donde pueden encontrarse proveedores de diversos productos, haciendo un filtrado por chatarra de metales ferrosos.

Otro punto que en teoría es importante abarcar, es estudiar si el incremento en el nivel de producción derivado de la adquisición de la maquinaria conllevaría realmente a mayores beneficios económicos para la empresa en el futuro por un eventual aumento en el nivel de ventas. Sin embargo, dicho estudio no se realizará debido a que lo mencionado recientemente se considerará como un supuesto (L. G. Arqueros, comunicación personal, 22 de noviembre, 2023).

## 2.4 Plantas de fragmentación de chatarra

Las plantas de fragmentación son instalaciones de tratamiento de materiales cuyo objetivo es la separación de los componentes ferrosos (alto contenido en hierro) de los no ferrosos (por ejemplo, aluminio, cobre y níquel) y de aquellos elementos no metálicos (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f., p.15).

Al momento de llegar a las siderúrgicas (por ejemplo, CAP Acero), toda chatarra es sometida a un proceso de inspección visual para asegurarse de que no incorpore elementos radioactivos o que no sean ámbito de la actividad, donde en caso de que se detecte a simple vista la presencia de elementos indeseados se debe intentar hacer una segregación manual de los mismos (aunque esto no permite remover por completo las impurezas contenidas en la chatarra). (Agència de Residus de Catalunya, s.f., p. 35).

En la figura 2.4 se ilustra un ejemplo de planta fragmentadora (SV Recycling Equipment, s.f.). El funcionamiento en general de una instalación de fragmentación se describe a partir de las siguientes etapas



**Figura 2.4: Planta de fragmentación de chatarra metálica**

**Fuente: SV Recycling Equipment**

### 2.4.1 Alimentación del material

En la mayoría de los casos, el material se alimenta al sistema de trituración mediante una grúa con un brazo articulado de largo alcance que dispone de un pulpo hidráulico en su extremo, el cual va tomando puñados de chatarra y los descarga en la boca de entrada de la

fragmentadora, la cual puede variar dependiendo de la instalación (existen tolvas, transportadores de placas a nivel del suelo y bandejas basculantes en altura) (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f., pp.17-18). Cabe destacar que aquellas piezas que por sus grandes dimensiones no pueden ser introducidas directamente en el equipo de fragmentación pueden ser previamente cortadas mediante un soplete (proceso de oxicorte) (Junta de Andalucía, s.f., p. 80).

#### **2.4.2 Fragmentación del material alimentado**

En algunas plantas fragmentadoras se dispone de un pre fragmentador, el cual se encarga de realizar una desmembración previa del material (especialmente cuando ingresan paquetes prensados de chatarra), lo cual permite aumentar la capacidad productiva de la maquinaria en cuanto a fragmentación y disminuir el desgaste de las muelas de trituración en la etapa de fragmentado (Junta de Andalucía, s.f., pp. 80-81).

Antes de ingresar a la cámara de fragmentación, el material alimentado llega hasta los rodillos situados delante de la boca del molino fragmentador, los cuales lo atrapan y lo van aplastando mediante su giro, de tal forma que éste es introducido de manera controlada en dicha cámara, dentro de la cual se encuentra un molino de martillos. Este último está constituido por un eje central que transmite un movimiento rotatorio, de tal forma que los martillos en la periferia del molino efectúan la trituración del material alimentado gracias al golpeo (impacto) con los mismos, hasta que se logran alcanzar dimensiones del material que sean lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de la criba (huecos que se encuentran en la parte inferior de la cámara) y posteriormente ser evacuadas por una bandeja vibratoria para circular por una banda transportadora situada por debajo de las aberturas de salida del molino fragmentador (LYRSA, 2009; Forton et al., 2006, como citado en Muñoz, 2012, p. 52).

En la figura 2.5 se ilustran los rodillos de alimentación y el proceso de trituración llevado a cabo en el interior de la cámara de fragmentación (Manouchehri, 2018).



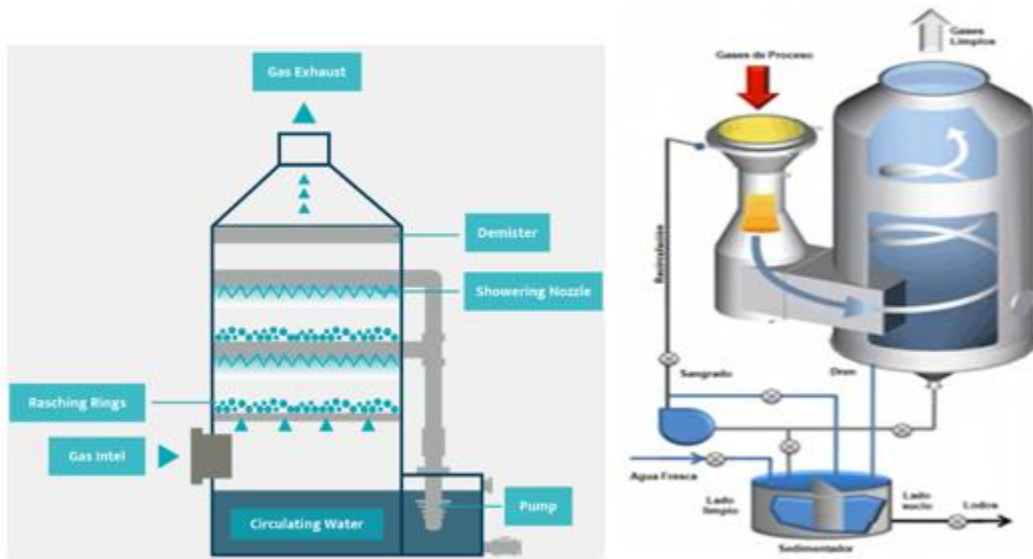
que ésta se ponga en contacto con la corriente de aire que contiene partículas sólidas y así retener estas últimas, dando paso a la formación de aguas residuales.

Las plantas fragmentadoras deben incorporar un sistema o dispositivo de eliminación de contaminantes de las aguas, el cual corresponde a un sedimentador. Para este tipo de instalaciones, comúnmente se utilizan sedimentadores de flujo horizontal, los cuales producen un ensanchamiento del canal por donde circula el agua residual, reduciendo su velocidad de flujo y facilitando la decantación de las partículas más pesadas que logran ser retenidas y de esta forma gestionarse como residuos (Agència de Residus de Catalunya, s.f., p. 54).

En este caso, el equipo principal del sistema de desempolvado puede ser una torre empacada o bien un separador ciclónico. Para el caso de una torre empacada, la corriente gaseosa ingresa por la parte inferior del equipo y se pone en contacto con el agua recirculada, a través de un sistema de duchas desde la parte superior del mismo. En el interior de la torre existe un lecho empacado que permite aumentar el área de contacto entre el gas y el agua, facilitando la retención de partículas sólidas por parte de esta última hasta caer por la parte inferior de la torre dirigiéndose al sedimentador, logrando la separación del material particulado. Por su parte, la corriente gaseosa asciende hasta un eliminador de niebla, el cual es un dispositivo que permite retener las partículas líquidas que hayan quedado atrapadas en dicha corriente, antes de que esta última sea liberada a la atmósfera (TECAM, s.f.).

Por su parte, para el caso de un separador ciclónico, por su parte inferior ingresa la corriente de aire con partículas sólidas suspendidas junto con agua de recirculación. Por acción de la fuerza centrífuga, el agua residual cae por la parte inferior del equipo para derivar al sedimentador, mientras que la corriente gaseosa asciende y tras pasar por el eliminador de niebla es liberada a la atmósfera (VERLEK INGENIERIA, 2018).

En la figura 2.6 se ilustra una torre empacada (izquierda) y un separador ciclónico para vía húmeda (derecha) (TECAM, s.f.; VERLEK INGENIERIA, 2018).



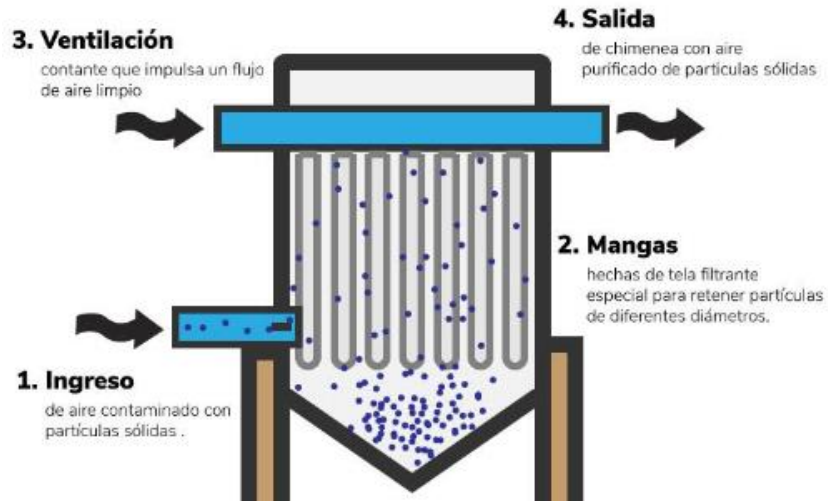
**Figura 2.6: Sistemas de desempolvado por vía húmeda**

**Fuente: TECAM y VERLEK INGENIERIA**

### **2.4.3.2 Sistema de desempolvado por vía seca**

Pueden encontrarse los separadores ciclónicos y filtros de mangas. Para el caso del separador ciclónico, por su parte superior ingresa la corriente de aire con las partículas sólidas suspendidas, las cuales van descendiendo en un patrón helicoidal y son recogidas en la parte inferior (debajo de la sección cónica), al tiempo que asciende un flujo de aire limpio que sale por la parte superior a través de un ducto vertical (Air Quality de México, 2021).

Por otro lado, para el caso de filtros de mangas, se trata de un equipo en donde los residuos ligeros de fragmentación ingresan por la parte inferior impulsado por ventiladores, de tal forma que las partículas sólidas van quedando retenidas en los filtros (ya sea en su interior o exterior, donde este último caso ocurre gracias a la capacidad electrostática del tejido que compone las mangas) en la medida que la corriente de aire va ascendiendo hasta que ésta es liberada como gas limpio a la atmósfera, apoyado por un flujo constante de ventilación que la conduce hacia la chimenea de escape. Ahora bien, en la parte inferior del equipo hay una tolva por donde caen las partículas sólidas retenidas en los filtros (esto se logra cuando se efectúa una limpieza del equipo, ya sea sacudiendo los filtros o bien a través de corrientes de aire auxiliares) (Grupo Calero, 2021). En la figura 2.7 se ilustra un filtro de mangas (Deproin S.A, s.f.).



**Figura 2.7: Filtro de mangas**

**Fuente: Deproin S.A**

#### **2.4.4 Separación magnética**

El material fragmentado que avanza por la cinta transportadora llega hasta un tambor magnético, el cual permite separar el contenido ferroso del resto de materiales (metales no ferrosos y elementos no metálicos). Este último dispone de un imán en su interior que genera un campo magnético, y a través de su giro es que va atrayendo los fragmentos de material férrico y atrayéndolos contra la superficie del tambor, de tal forma que dichos fragmentos son depositados en una cinta transportadora, la cual está dotada de puestos de selección manual (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f., p.20).

En la figura 2.8 se ilustra un tambor magnético (Recycling Technology Worldwide, s.f.). Hay algunas máquinas que disponen de dos tambores para mayor recuperación de metal ferroso.



**Figura 2.8: Tambor magnético en planta fragmentadora de chatarra metálica**

**Fuente: Recycling Technology Worldwide**

Por otro lado, el material que no logró ser capturado por el tambor magnético cae a una cinta transportadora para ser conducido a una zona de separación manual o bien a una zona de almacenamiento (dependiendo del diseño de la planta fragmentadora). También, es posible lograr la separación entre metales no ferrosos y elementos no metálicos a través de la aplicación de técnicas como corrientes inducidas. Inclusive, es posible remitir la corriente de material no ferroso a una planta de medios densos o de flotación para poder recuperar el contenido ferroso que aún pueda contener (LYRSA, 2009; Forton et al., 2006, como citado en Muñoz, 2012, p. 52).

#### **2.4.5 Triado manual**

Se refiere a zonas en donde existen operadores que detectan visualmente la presencia de ciertos elementos en los flujos de materiales que van avanzando en cintas transportadoras y los van retirando en función de necesidades específicas. Por ejemplo, para el caso de la corriente de materiales ferrosos que sale del tambor magnético, los operadores detectan la presencia de materiales no ferrosos que hayan quedado atrapados y los eliminan manualmente (LYRSA, 2009; Forton et al., 2006, como citado en Muñoz, 2012, p. 52).

#### **2.5 Empresas comercializadoras de plantas de fragmentación de chatarra metálica**

En esta sección se describe el proceso de recopilación de empresas comercializadoras de plantas de fragmentación, además de una descripción de las empresas seleccionadas para la evaluación económica. Sólo se consideraron empresas que pueden exportar sus productos a Chile y que además ofrecen un suministro de tecnología integrada en donde se pueda superar (o por lo menos igualar) la capacidad de procesamiento de chatarra mínima diaria requerida. Para la compañía, la planta fragmentadora está pensada para operarse durante los 22 días hábiles de cada mes (cada día se opera durante un turno de 8 horas) y que además, de acuerdo a registros históricos de producción de la compañía, en promedio el 50% de la carga metálica requerida para el procesamiento de una hornada corresponde a chatarra externa liviana (fragmentable). La ecuación 2.8 describe el cálculo de dicha capacidad.

$$\text{Capacidad procesamiento mín.} = (\text{prod. anual acero} / \text{IRM prom}) * \left( \frac{0,3}{264 * 8} \right) * 0,5$$

**Ecuación 2.8: Capacidad de procesamiento mínima requerida de la planta fragmentadora**

Reemplazando datos en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\frac{855.000 \left( \frac{\text{ton (acero líquido)}}{\text{año}} \right)}{0,90 \left( \frac{\text{ton (acero líquido)}}{\text{ton (carga metálica)}} \right)} * \frac{0,3 \left( \frac{\text{ton (chatarra)}}{\text{ton (carga metálica)}} \right)}{\frac{1 (\text{año})}{264 (\text{día})} * \frac{1 (\text{día})}{8 (\text{hora})}} * 0,5 \approx 68 \left( \frac{\text{ton (chatarra)}}{(\text{hora})} \right)$$

Algunas de las empresas fueron conocidas desde la búsqueda en revistas en formato electrónico de la “Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje” (FER), las cuales corresponden a “SV Recycling Equipment”, “Danieli”, “MSA Group” y “PAC Machinery”.

Por su parte, el resto de empresas fueron conocidas a partir de la búsqueda en *Environmental Expert*, que es una página web que proporciona información variada acerca de temas ambientales, tales como productos y/o servicios ofrecidos por empresas, además de noticias y eventos (entre otros tipos de informaciones). Más precisamente, en aquel sitio web se buscó en la categoría “Residuos y reciclaje” y luego en las subcategorías “plantas trituradoras” y “trituración de metales”. Además, posteriormente desde la misma categoría se hizo un filtrado por industria atendida que en este caso corresponde a “metal”, y posteriormente se buscó en las subcategorías “acero” y “reciclaje de metales”. Sólo fueron consideradas empresas que disponen de página web oficial y cuyo enfoque de mercado es a nivel internacional o global. Finalmente, las empresas recopiladas fueron: “WENDT Corporation”, “Parfer Siti” y “Cheng Ho Hsing Heavy Industries Co., Ltd”.

A cada una de las 7 empresas mencionadas anteriormente se le formuló un conjunto de preguntas vía correo electrónico solicitando información relacionada con las especificaciones técnicas y características de las maquinarias, además de su costo total, costo de transporte, costo de instalación y sistema de despolvado que utiliza. Hubo una única empresa de la cual se pudo recopilar toda la información necesaria para la evaluación económica a realizar, la cual corresponde a “SV Recycling Equipment”.

*SV Recycling Equipment*: Tiene presencia en diferentes continentes, más precisamente, posee sedes en los siguientes países: España, Brasil, Estados Unidos, China, Japón, Francia, Polonia, Rusia e Inglaterra. La empresa se posiciona, con sus más de 50 años de experiencia, como uno de los grandes proveedores mundiales en soluciones de trituración y clasificación de chatarra ferrosa y no ferrosa (colaborando con los principales diseñadores de tecnología

Europeos), además de destacar en el sector de la valorización de residuos de construcción y demolición (Revista Demolición y Reciclaje, 2022; SV Recycling Equipment, s.f.).

Otro punto importante a destacar, en base a la información recopilada vía consultas por correo electrónico, es que la empresa lleva bastantes años instalando plantas de fragmentación en diferentes países de Europa, Asia y Sudamérica. Más precisamente, en esta última región se destaca a Brasil como uno de los países en donde más instalaciones se han incorporado.

Particularmente, para la evaluación económica del proyecto fue considerado el equipo industrial “PSX-80104” con un motor principal cuya potencia es de 3000 (HP) y cuya productividad varía entre 60 y 70 toneladas de chatarra procesada por hora (esto depende de la densidad del material de entrada). El resto de modelos no fueron considerados puesto que ofrecían productividades por debajo del mínimo requerido o bien muy por encima del mínimo requerido (esto último implica un mayor costo total de la maquinaria).

La instalación “PSX-80104” permite el tratamiento de todo tipo de chatarra ferrosa, donde pueden encontrarse, por ejemplo: tuberías, vigas, chapas de acero, alambres, barras de refuerzo y rieles. Además, el ancho de la boca del molino fragmentador (que corresponde a 2,032 (m) en este caso) determina las dimensiones máximas del material de entrada a la cámara de fragmentación.

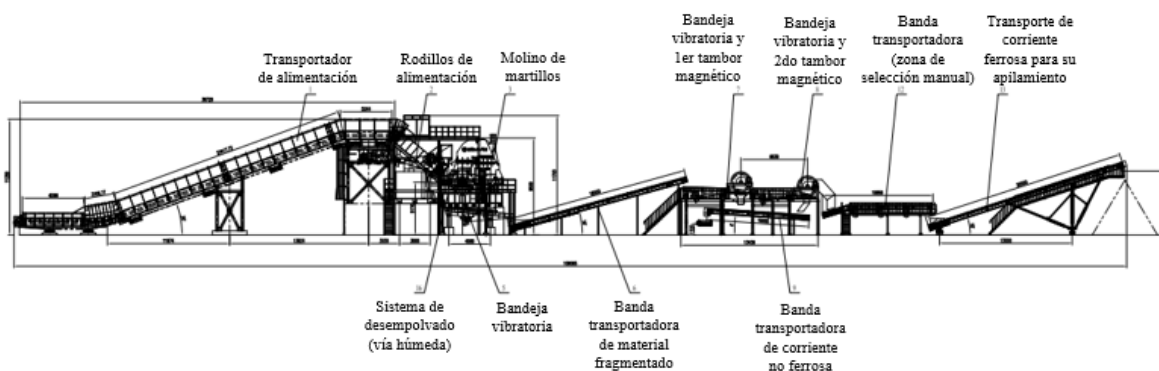
A través de consultas vía correo electrónico se pudo averiguar que el nivel de limpieza que se alcanza en la corriente de salida de ferrosos es del 98%, el sistema de desempolvado empleado es por vía húmeda, el costo total de la planta fragmentadora es de 1.800.000 (USD) y que el costo de exportarla desde algún punto de venta (en general) hacia Chile es de 150.000 (USD). Además, la potencia eléctrica total necesaria para el funcionamiento del equipo por hora de operación es de 2800 (kW), y dividiendo este valor por la capacidad mínima de procesamiento requerida se obtiene un consumo energético específico de 41,18 (kWh/t). Ahora, considerando que la compañía actualmente incurre en un costo de 0,085 (USD/kWh), multiplicando estos dos últimos valores se obtiene un costo asociado al consumo energético específico de la planta equivalente a 3,5 (USD/t). Con respecto al resto de costos operacionales, éstos se reparten entre mantenciones requeridas (una vez a la semana, durante 8 horas) y gastos en personal (la instalación dispone de una cabina de control y puestos de selección manual, y se asume que para ambos se necesitan de

2 operarios, dando un total de 4 personas). Con respecto a este último, se considera un sueldo mensual por operario equivalente a 1.500.000 (CLP).

Se establecen como supuestos que realizar una mantención implica un costo equivalente al 1% del costo total de la planta fragmentadora (18.000 USD) y que el costo de instalación de la misma corresponde a 1.000.000 (USD).

Por otro lado, y en vista de que de acuerdo a la tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado fijada por el Servicio de Impuestos Internos de Chile (SII) (vigente a partir del 1 de enero de 2003) la planta fragmentadora cae en la categoría de “Maquinaria y equipos en general destinados a trabajos pesados en minas y plantas beneficiadoras de minerales” dentro de la industria “extractiva (minería)”, su vida útil normal corresponde a 9 años. Ahora bien, para la evaluación económica se considerará un horizonte de planeación de 5 años, asumiendo depreciación lineal y que además al final del período de evaluación se venderá la planta fragmentadora en un monto equivalente a su valor libro.

A continuación, en la figura 2.9 (documento confidencial obtenido vía correo electrónico) se presenta un esquema representativo de la planta de fragmentación “PSX-80104”, en donde su funcionamiento se corresponde con lo explicado anteriormente en la sección 2.4. Particularmente, esta planta de fragmentación dispone de 2 tambores magnéticos, en donde el material que no es capturado por ellos cae hasta llegar a una cinta transportadora en donde se encuentra un imán sobre banda, cuyo objetivo es la recuperación del contenido ferroso que aún pudiera encontrarse en la corriente de materiales no ferrosos (metales y no metales).



**Figura 2.9: Planta de fragmentación “PSX-80104”**

**Fuente: SV Recycling Equipment**

## 2.6 Empresas comercializadoras de chatarra ferrosa fragmentada

En esta sección se describe el proceso de recopilación de empresas comercializadoras de chatarra ferrosa fragmentada, además de una descripción de las empresas consideradas en la evaluación económica. Sólo se consideraron aquellas que pueden exportar sus productos a Chile, además de “Grupo Lampa” quien fuera proveedor de chatarra ferrosa de CAP Acero.

En este escenario, el requerimiento anual promedio de chatarra externa liviana es reemplazado en su totalidad por la importación de la misma cantidad de toneladas de chatarra ferrosa fragmentada. De esta forma, la cantidad anual de toneladas a importar de chatarra ferrosa fragmentada viene dada por la ecuación 2.9

$$\text{Cant. anual import.} = (\text{prod. anual acero}/\text{IRM prom}) * 0,3 * 0,5$$

**Ecuación 2.9: Cantidad de toneladas anuales a importar de chatarra ferrosa fragmentada**

Reemplazando datos en la ecuación anterior, se tiene que:

$$\frac{855.000 \left( \frac{\text{ton (acero líquido)}}{\text{año}} \right)}{0,90 \left( \frac{\text{ton (acero líquido)}}{\text{ton (carga metálica)}} \right)} * 0,3 \left( \frac{\text{ton (chatarra)}}{\text{ton (carga metálica)}} \right) * 0,5 = 142.500 \left( \frac{\text{ton (chatarra)}}{\text{año}} \right)$$

Algunas de las empresas fueron conocidas desde la búsqueda en *Environmental Expert*, más precisamente en la categoría “Residuos y reciclaje” y posteriormente en “Comercio de chatarra”. Éstas corresponden a: “Swedish International Circle Enterprise AB”, “TSR Recycling GmbH & Co. KG”, “HJ Hansen Recycling Ltd”, “The David J. Joseph Company” y “Rimeco AS”.

El resto de empresas fueron conocidas gracias a la búsqueda en *Go4WorldBusiness*, que es una plataforma de comercio global en donde pueden encontrarse proveedores y compradores de diversos tipos de productos. Más precisamente, se buscó en la categoría “Industrial y automotriz”, luego en “Metales y productos metálicos” y finalmente en “Chatarra de metales ferrosos”. Se buscaron proveedores originarios de Europa, Norteamérica y Sudamérica que disponen de página web oficial, recopilándose las siguientes empresas: “Paraguay Metal Scrap Company SA”, “Schkriz Metal Linkers GmbH” y “LCM Scrap Company” y “EMR Metal Recycling”.

Al igual que para las empresas que venden plantas fragmentadoras, se realizaron consultas vía correo electrónico solicitando información acerca de la densidad aparente, composición química, costo atribuido al producto y de flete unitario de la chatarra ferrosa triturada. Hubo una única empresa de la cual se pudo recopilar toda la información necesaria para la evaluación económica, la cual corresponde a “TSR Recycling GmbH & Co. KG”

“TSR Recycling GmbH & Co. KG”: Esta empresa, de origen alemán, es líder en el mercado europeo en lo que respecta a comercio de chatarra de acero (Environmental XPRT, s.f.). Más precisamente, dispone de cerca de 150 centros de operación repartidos en todo Europa, y en un gran número de ellos se dispone de fragmentadoras como alternativas tecnológicas de procesamiento (TSR Recycling, s.f.).

Adicionalmente, la empresa goza de un respetable historial de atenciones a diferentes acerías en Alemania y el resto de Europa (sin importar el volumen de exportación). Más precisamente, a nivel global la empresa procesa anualmente 6,7 millones de toneladas de chatarra ferrosa en promedio (TSR Recycling, s.f.).

De acuerdo a las especificaciones europeas para chatarra ferrosa, la chatarra ferrosa fragmentada que comercializa la empresa corresponde a la clase “E40”. Dicha clase se caracteriza por tener dimensiones no mayores a 20 (cm) en las 3 direcciones, estar limpia de elementos residuales como el cobre, estaño y plomo, tener un contenido de hierro superior al 98% y tener una densidad aparente promedio de 0,9 ( $t/m^3$ ) (TSR Recycling, s.f.).

Dentro de la información que pudo recopilarse vía correo electrónico, se encuentra el costo unitario atribuido al producto y el costo de flete unitario (sus valores se detallan en la sección 2.9). El primero depende de las condiciones del mercado en el momento que se desee importar, mientras que el segundo corresponde a un valor fijo y depende desde dónde se esté importando (a mayor distancia, mayor es dicho valor). En este caso, el puerto más cercano a Chile desde el cual puede exportarse el producto corresponde al de Ámsterdam (Países Bajos). Por último, no se logró averiguar si existen descuentos por volumen de envío desde aquel puerto, por lo que para efectos de la evaluación económica se asumirá que no existen.

## 2.7 Consideraciones con respecto a viabilidad técnica

En relación a las necesidades de espacio físico para la instalación de la planta fragmentadora, en la figura 2.10 se muestra un mapa con escala 1:2300 del patio de chatarra del que se dispone al interior de la compañía. Los números que se observan en él corresponden a las ubicaciones asignadas de las diferentes clases de chatarra que se manejan. Considerando que la planta fragmentadora “PSX-80104” tiene 109,065 (m) de largo y 22,011 (m) de ancho y que cada cuadrado tiene un lado cuya medida es 1,6 (cm) equivalente a 36,8 (m) en la realidad, se necesitarían de  $109,065/36,8 = 2,96$  cuadrados y  $22,011/36,8 = 0,59$  cuadrados en aquellas direcciones (respectivamente). En efecto, puede observarse a simple vista que el espacio comprendido entre las casillas C12, C13, D12, D13, E12 y E13 es suficiente, en teoría, para poder instalar la planta fragmentadora en aquel espacio.

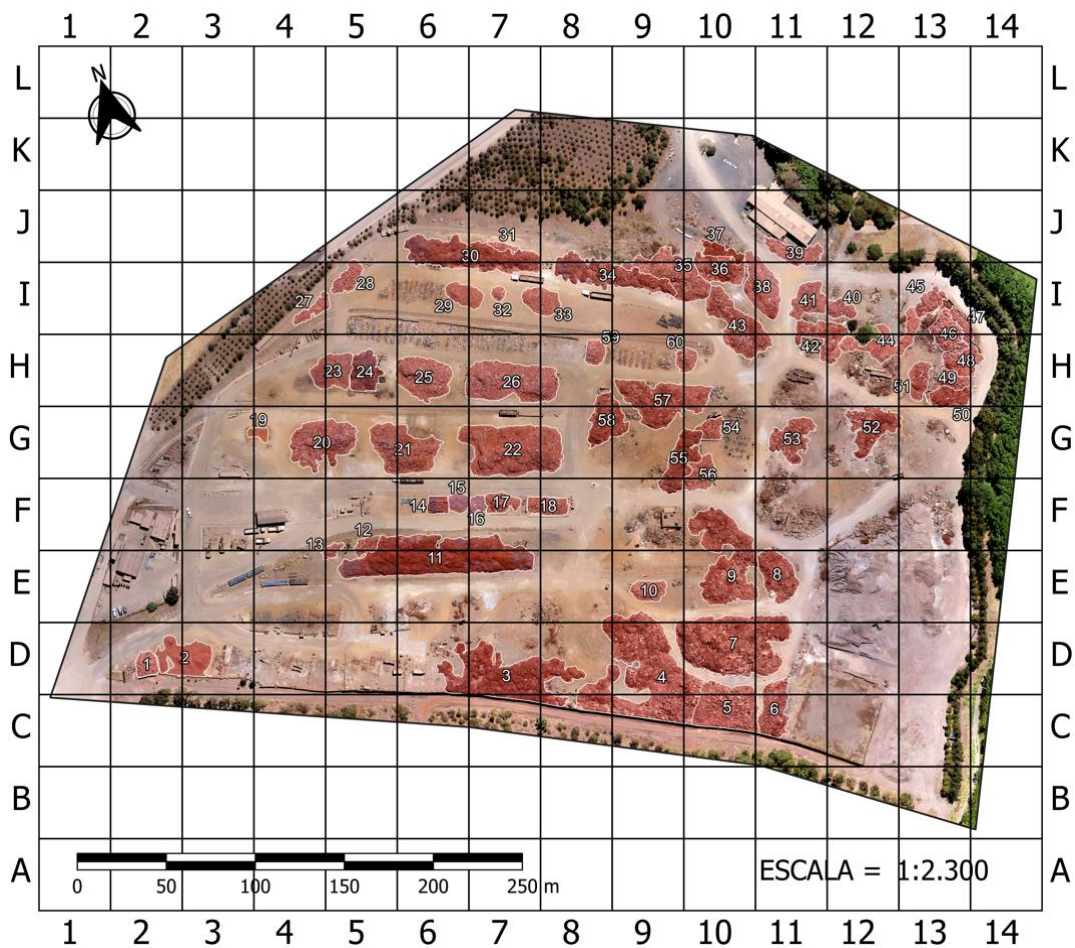


Figura 2.10: Mapa de patio de chatarra al interior de CAP Acero

Fuente: Elaboración propia

## **2.8 Consideraciones con respecto a viabilidad medioambiental**

En Chile, según la norma de emisión para la regulación de contaminantes en las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado (actualizada por última vez en septiembre de 2004), se establecen los límites máximos de contaminantes permitidos en dichas descargas que a su vez pueden expresarse en unidades de masa por día o en unidades de volumen por día. Particularmente, para el caso de sólidos suspendidos (recordando que la planta fragmentadora a adquirir incorpora un sistema de desempolvado por vía húmeda el cual permite la separación entre agua limpia y partículas sólidas) éstos se expresan en unidades de masa por día. Sin embargo, dado que no se conoce el consumo de agua por unidad de tiempo de operación de la planta fragmentadora y que tampoco se tiene alguna estimación sobre la concentración masa-volumen de las partículas sólidas en un determinado volumen de líquido, no es posible determinar a ciencia cierta si la operación de la planta fragmentadora escogida es tal de que se cumpla con la normativa ambiental local vigente.

## **2.9 Evaluación económica**

### **2.9.1 Cálculo de tasa de descuento apropiada**

Para determinar una tasa de descuento apropiada para la realización de la presente evaluación económica, se utiliza el modelo CAPM a través de la ecuación 2.10

$$CAPM = R_f + \beta * (E(R_m) - R_f)$$

#### **Ecuación 2.10: Cálculo de tasa de descuento apropiada mediante modelo CAPM**

En la ecuación anterior,  $R_f$  corresponde a la tasa libre de riesgo,  $\beta$  corresponde al beta de la industria siderúrgica apalancado y  $E(R_m)$  corresponde a la rentabilidad esperada del mercado chileno.

#### **2.9.1.1 Cálculo de tasa libre de riesgo ( $R_f$ )**

Para el cálculo de este valor, se consideran datos mensuales correspondientes a los últimos 3 años que representen la tasa de rendimientos de los bonos emitidos por el Banco Central de Chile con plazo a 10 años (para mayor detalle, revisar “Anexo 15”). Luego, calculando un promedio simple entre los últimos 36 meses (datos históricos del primer día del mes desde

junio de 2021 hasta mayo de 2024), se estima una tasa libre de riesgo para la presente evaluación económica equivalente a  $R_f = 2,14\%$ .

### **2.9.1.2 Calculo de beta de la industria no apalancado ( $\beta$ )**

Para el cálculo de este valor, se extrajo información desde la página del profesor Aswath Damodaran. En esta página, el autor considera un conjunto de industrias dentro de Estados Unidos (en rigor, lo más adecuado es considerar el mercado chileno, pero dada la disponibilidad de información se utiliza como referencia el mercado estadounidense para este contexto), y para cada una de ellas considera el número total de firmas dentro del mercado de aquel país. De esta forma, el beta no apalancado para la fila de datos correspondiente a la industria “Acero”, es decir, aquel que elimina el efecto de la deuda que tengan las diferentes empresas dentro de una industria determinada considerando así sólo el riesgo asociado al negocio como tal, en este caso corresponde al promedio simple entre los betas no apalancados de cada una de las firmas dentro de una industria en particular. Para el caso de la industria siderúrgica, dicho valor es  $\beta = 0,98$ .

### **2.9.1.3 Calculo de rentabilidad anual esperada del mercado ( $E(R_m)$ )**

Para el cálculo de este valor se tomaron como parámetros *proxy* los índices del mercado chileno. Esto es, en primer lugar se estudia el rendimiento nominal bursátil del IGPA (Índice General de Precio de las Acciones) del mercado nacional en donde los datos son extraídos desde la base de datos del Banco Central de Chile. Para ello, se trabaja con las variaciones del IGPA con respecto al período anterior, considerando un período comprendido entre los últimos 36 meses, vale decir, entre mayo de 2021 hasta abril de 2024. Calculando un promedio simple entre aquellos valores (para mayor detalle, revisar “Anexo 13”), se obtiene un retorno promedio mensual de 1,2%, y considerando un interés compuesto se obtiene finalmente un retorno promedio anual de 15,4%

El siguiente paso consiste en la obtención del rendimiento real, para lo cual es necesario ajustar el rendimiento nominal previamente calculado por el cambio en el nivel de precios de la economía chilena. Para ello, se considera el rendimiento del IPC (Índice de precios al consumidor) del mismo período analizado anteriormente, en donde los datos son extraídos desde la misma fuente que para el caso anterior. En efecto, siguiendo la misma lógica de

cálculo anterior, se obtiene un IPC promedio mensual de 0,66%, y nuevamente considerando un interés compuesto se obtiene al final un retorno promedio anual de 8,15% (para mayor detalle, revisar “Anexo 14”).

Finalmente, la tasa de retorno real anual esperada del mercado viene dada por la diferencia entre ambos rendimientos previamente calculados (retorno nominal menos inflación), obteniéndose de esta forma un valor equivalente a  $E(R_m) = 7,25\%$ .

#### **2.9.1.4 Cálculo de tasa de descuento apropiada para evaluación económica**

Considerando los datos previamente calculados en las secciones 2.9.1.1, 2.9.1.2 y 2.9.1.3 y haciendo uso de la ecuación 2.10, se obtiene una tasa de descuento equivalente a  $i = 7,15\%$ , la cual será considerada para efectos de cálculos posteriores.

#### **2.9.2 Resumen de datos necesarios y aclaraciones adicionales**

Para cada alternativa de proyecto, se calculan flujos diferenciales tomando como base comparativa la situación vigente en donde no se utiliza chatarra ferrosa triturada como materia prima en el proceso productivo. Posteriormente, para cada alternativa de proyecto se calcula el VAN y TIR asociados para determinar la conveniencia económica para la compañía entre una alternativa u otra.

En relación a las aclaraciones adicionales, en primer lugar el precio de venta del producto final (en términos generales) para la compañía es de  $700(USD/t)$ . Para un eventual posterior análisis de sensibilidad del VAN para alguna alternativa determinada, se considera una desviación estándar tomando como referencia la de la barra de acero de refuerzo. Esto es, desde la plataforma “*Trading Economics*”, se recopilan datos del precio de venta en moneda china de aquella materia prima ( $CNY/t$ ) para el primer día de cada uno de los últimos 12 meses (desde junio de 2023 hasta mayo de 2024, para mayor detalle revisar “Anexo 18”). Por otro lado, se considera el valor del tipo de cambio (de  $CNY$  a  $USD$ ) para el primer día de los mismos meses (para mayor detalle, revisar “Anexo 17”). De esta forma, multiplicando ambos valores se obtiene el precio de venta de la barra de refuerzo expresado en ( $USD/t$ ), y luego se calcula la desviación estándar de aquellos 12 datos obteniendo un valor de  $\sigma = 24,28$ . Por otro lado, el coeficiente de variación entre aquellos 12 datos es cercano al 5%, por lo cual se considera una buena referencia.

En segundo lugar, para efectos de conversión del sueldo por operario a moneda estadounidense, se recopilan datos del tipo de cambio de (*USD a CLP*) idénticamente a lo explicado en el párrafo anterior, obteniéndose una media de  $\mu = 891,78$  y una desviación estándar de  $\sigma = 62,06$ . Por lo demás, el coeficiente de variación es cercano al 7%.

En tercer lugar, en relación a los costos de la chatarra, únicamente se dispone de un rango de variabilidad para el costo de la chatarra externa procesada atribuida al producto, no así para su costo de flete unitario y para la chatarra externa liviana que se compra actualmente, Finalmente, cabe destacar que los datos representados en los Anexos 16, 17 y 18 no son necesariamente verdaderos, puesto que dada la imposibilidad de revisar datos exactos para el día 1 de cada mes, se consideraron como aproximaciones los días cercanos.

A continuación, en la tabla 2.4 se muestra un resumen con los datos necesarios para el cálculo de los flujos diferenciales, considerando que para aquellos ítems que tengan asociada una desviación estándar o un rango de variabilidad se trabaja con el valor medio.

| <i>Alternativa A: compra de planta fragmentadora</i> |                              | <i>Alternativa B: importación de chatarra ferrosa triturada</i> |                             |
|--|------------------------------|---|-----------------------------|
| Precio de venta prod. final                          | 700( <i>USD/t</i> )          | Costo unitario atribuido al producto (chatarra “E40”)           | [293 – 478]( <i>USD/t</i> ) |
| Costo total maquinaria                               | 1.800.000 ( <i>USD</i> )     |   |                             |
| Costo importación                                    | 150.000 ( <i>USD</i> )       | Costo flete unitario (chatarra “E40”)                           | 80 ( <i>USD/t</i> )         |
| Costo instalación                                    | 1.000.000 ( <i>USD</i> )     |   |                             |
| Consumo energético específico                        | 41,18 ( <i>kWh/t</i> )       | Costo unitario chatarra externa liviana                         | 300( <i>USD/t</i> )         |
| Costo por consumo energético                         | 0,085 ( <i>USD/kWh</i> )     |   |                             |
| Costo mantención                                     | 18.000 ( <i>USD/mant.</i> )  |   |                             |
| Nº de operarios requeridos                           | 4 ( <i>op.</i> )             | Cantidad anual a importar (chatarra “E40”)                      | 142.500 ( <i>t/año</i> )    |
| Sueldo mensual operario                              | 1.500.000 ( <i>CLP/op.</i> ) |   |                             |

**Tabla 2.4: Resumen de datos necesarios para realización de evaluación económica**

**Fuente: Elaboración propia**

En relación a los flujos diferenciales, bien sea para el cálculo de ingresos o egresos afectos a impuesto, gastos no desembolsables (depreciación y valor libro de la maquinaria, si corresponde) o inversión inicial éstos vienen dados por la ecuación 2.11.

$$\text{Flujo incremental}_{(B-A)} = \text{Flujo}_{(sit. B)} - \text{flujo}_{(sit. A)}$$

**Ecuación 2.11: Cálculo de flujo incremental en un ítem y período determinados**

Por otro lado, el cálculo del VAN está determinado como sigue en la ecuación 2.12

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t}$$

**Ecuación 2.12: Fórmula de cálculo de VAN**

Por último, se considera una tasa de impuesto de primera categoría de 27%.

### **2.9.3 Evaluación de situación con proyecto**

#### **2.9.3.1 Ingresos afectos a impuesto incrementales**

Suponiendo un incremento del rendimiento metálico en un 1% al incorporar chatarra ferrosa fragmentada como materia prima en el proceso productivo en comparación con la situación vigente, los ingresos operacionales están determinados por el incremento en la cantidad de palanquilla producida por hornada procesada. En vista de que la proporción típica entre chatarra y arrabio cargados es 30 es a 70 y que el rendimiento metálico promedio es de 90%, si se considera un total de carga metálica de 100 ( $t$ ), un incremento del rendimiento metálico en un 1% implica la producción de 1 tonelada más de acero líquido (de 90 a 91  $t$ ). No obstante, hay que considerar que en las etapas posteriores al proceso de conversión al oxígeno se tiene un factor de pérdida que representa la proporción de acero líquido sangrado (del total sangrado) que no logró convertirse en palanquilla al final del proceso, el cual corresponde a 3,4%. De esta forma, se logra incrementar la cantidad de toneladas de palanquilla producida por hornada procesada en un valor equivalente a 0,966 ( $t/hornada$ ).

Dado todo lo anterior, los ingresos diferenciales para un año determinado dentro del horizonte de planeación vienen dados por la ecuación 2.13:

$$\text{Ingresos dif.} = \text{precio de venta prod. final} * 0,966 \left( \frac{t}{hda.} \right) * \text{Prom. hdas procesadas al año}$$

### **Ecuación 2.13: Cálculo de ingresos diferenciales para situación con proyecto**

Haciendo uso de la ecuación 2.13 y reemplazando datos, se obtiene que:

$$\text{Ingresos dif} = 700 \left( \frac{USD}{t} \right) * 0,966 \left( \frac{t}{hda.} \right) * 22 \left( \frac{hda.}{día} \right) * 30 \left( \frac{día}{mes} \right) * 12 \left( \frac{mes}{año} \right) = 5.355.504 \left( \frac{USD}{año} \right)$$

### **2.9.3.2 Egresos afectos a impuesto incrementales**

Para la situación con proyecto, se tienen los gastos en personal, mantenimiento y asociados al consumo energético de la planta fragmentadora por tonelada de chatarra procesada. El primer ítem corresponde al monto total que debe pagarse como sueldo a los operarios en un año de operación normal de la maquinaria, el segundo corresponde al producto entre el costo por mantención y el número de mantenciones anuales requeridas, y el tercero corresponde al producto entre el costo asociado al consumo energético específico y el total de toneladas de chatarra a procesar durante un año (considerando una capacidad de procesamiento de la maquinaria de 68 (t/h)).

### **2.9.3.3 Inversión inicial**

Corresponde a la suma entre el costo de transporte de la planta fragmentadora, el costo atribuido a la maquinaria como producto y el costo de instalación del mismo.

### **2.9.3.4 Construcción de flujos de caja y cálculo de indicadores económicos**

La estructura de los flujos de caja viene dada como sigue en la tabla 2.5 (montos expresados en USD):

| <i>Año</i>                 | <i>0</i>   | <i>1</i>  | <i>2</i>  | <i>3</i>  | <i>4</i>  | <i>5</i>  |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| (+) Ingresos op.           |            | 5.355.504 | 5.355.504 | 5.355.504 | 5.355.504 | 5.355.504 |
| (+) Venta activo           |            |           |           |           |           | 800.000   |
| (-) Consumo energético     |            | 502.656   | 502.656   | 502.656   | 502.656   | 502.656   |
| (-) Gastos personal        |            | 80.737    | 80.737    | 80.737    | 80.737    | 80.737    |
| (-) Gastos manten.         |            | 864.000   | 864.000   | 864.000   | 864.000   | 864.000   |
| = EBITDA                   |            | 3.908.111 | 3.908.111 | 3.908.111 | 3.908.111 | 4.708.111 |
| (-) Depreciación           |            | 200.000   | 200.000   | 200.000   | 200.000   | 200.000   |
| (-) Valor libro            |            |           |           |           |           | 800.000   |
| = Result. antes de imp.    |            | 3.708.111 | 3.708.111 | 3.708.111 | 3.708.111 | 3.708.111 |
| (-) Impuesto               |            | 1.001.190 | 1.001.190 | 1.001.190 | 1.001.190 | 1.001.190 |
| = Result. después de imp.  |            | 2.706.921 | 2.706.921 | 2.706.921 | 2.706.921 | 2.706.921 |
| (+) Depreciación           |            | 200.000   | 200.000   | 200.000   | 200.000   | 200.000   |
| (+) Valor libro            |            |           |           |           |           | 800.000   |
| = Result. operacional neto |            | 2.906.921 | 2.906.921 | 2.906.921 | 2.906.921 | 3.706.921 |
| (-) Inversión inicial      | 2.950.000  |           |           |           |           |           |
| = Flujo de caja            | -2.950.000 | 2.906.921 | 2.906.921 | 2.906.921 | 2.906.921 | 3.706.921 |

**Tabla 2.5: Flujos de caja proyectados para situación con proyecto**

**Fuente: Elaboración propia**

Luego, haciendo uso de la ecuación 2.12 y considerando una tasa de descuento de  $i = 7,15\%$ , se obtiene un VAN equivalente a 9.486.952 (*USD*). Por otro lado, se obtiene una TIR equivalente a 96%. Considerando que esta última es tan elevada, quiere decir que el proyecto soportará prácticamente cualquier tasa de descuento que desee aplicarse y por ende siempre resultará económicamente conveniente la adquisición de una planta fragmentadora en comparación con la situación actual.

## **2.9.4 Evaluación de situación sin proyecto**

### **2.9.4.1 Ingresos afectos a impuesto incrementales**

Éstos se calculan idénticamente a como fueron calculados para la evaluación de la alternativa anterior, ya que entre una alternativa y otra sólo está cambiando la forma en la que se obtiene la chatarra ferrosa procesada para usarla como materia prima en el proceso productivo.

### **2.9.4.2 Egresos afectos a impuesto incrementales**

En este caso, únicamente se tienen los gastos de importación de chatarra ferrosa fragmentada. El costo total unitario por tonelada de chatarra “E40” corresponde a la suma entre el costo

unitario atribuido al producto y el costo de flete unitario. De esta forma, los gastos de importación (para cada período) corresponden al producto entre diferencia entre el costo total unitario de la chatarra “E40” y el costo unitario de la chatarra externa liviana que tradicionalmente es comprada por CAP Acero y el total de toneladas necesarias de importar anualmente.

### 2.9.4.3 Construcción de flujos de caja y cálculo de indicadores económicos

La estructura de los flujos de caja viene dada como sigue en la tabla 2.6 (montos expresados en *USD*)

| <i>Año</i>                 | <i>0</i> | <i>1</i>    | <i>2</i>    | <i>3</i>    | <i>4</i>    | <i>5</i>    |
|----------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| (+) Ingresos op.           |          | 5.355.504   | 5.355.504   | 5.355.504   | 5.355.504   | 5.355.504   |
| (-) Gastos importación     |          | 23.583.750  | 23.583.750  | 23.583.750  | 23.583.750  | 23.583.750  |
| = EBITDA                   |          | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 |
| = Result. antes de imp.    |          | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 |
| (-) Impuesto               |          |             |             |             |             |             |
| = Result. después de imp.  |          | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 |
| = Result. operacional neto |          | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 |
| (-) Inversión inicial      |          |             |             |             |             |             |
| = Flujo de caja            | 0        | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 | -18.228.246 |

**Tabla 2.6: Flujos de caja proyectados para situación sin proyecto**

**Fuente: Elaboración propia**

Luego, haciendo uso de la ecuación 2.12 y considerando una tasa de descuento de  $i = 7,15\%$ , se obtiene un VAN equivalente a  $-74.436.213$  (*USD*). Más aún, con cualquier tasa de descuento se obtendrá un VAN negativo. De esta forma, nunca será económicamente conveniente la alternativa de importar chatarra ferrosa fragmentada en comparación con la situación actual.

### 2.9.5 Análisis de sensibilidad del VAN para alternativa seleccionada

En vista de los resultados obtenidos en las secciones 2.9.3 y 2.9.4, se determina que la inversión inicial en la planta fragmentadora de chatarra es económicamente rentable para la compañía y es la alternativa a seleccionar. De esta forma, el siguiente paso consiste en definir las variables de entrada que influirán en el cálculo del VAN bajo diferentes escenarios

simulados (habiendo previamente ajustado una función de distribución de probabilidad para cada una de ellas). Dicha simulación se realiza a través del software Crystal Ball para determinar, finalmente, cuál es la probabilidad de obtener un VAN positivo bajo los valores de los parámetros, tasa de descuento y variables de entrada seleccionadas.

De todos los datos que aparecen en la tabla 2.4, más precisamente para la alternativa de adquirir la planta fragmentadora, se opta por considerar como variables de entrada, por sentido común y para realizar un análisis bidimensional (sin demasiadas variables), al precio de venta del producto final y el tipo de cambio (entre *USD* y *CLP*), puesto que ambos están determinados por las condiciones del mercado las cuales son dinámicas en el tiempo (el primero de ellos determina los ingresos y el segundo determina los gastos en personal). Por otro lado, los costos que componen la inversión inicial en la planta fragmentadora son desembolsos que se hacen en el presente (año 0), y el costo por mantención está determinado por las características propias de la planta fragmentadora a adquirir.

Cabe destacar que se optó por no sensibilizar el monto total de la inversión inicial, puesto que se determinó que para la tasa  $i = 7,15\%$  el VAN se hace igual a 0 cuando la inversión inicial es de 12.436.952 (*USD*), lo que equivale a más de cuatro veces el monto considerado en la tabla 2.5 y por lo tanto constituye un escenario con bajísima probabilidad de ocurrencia.

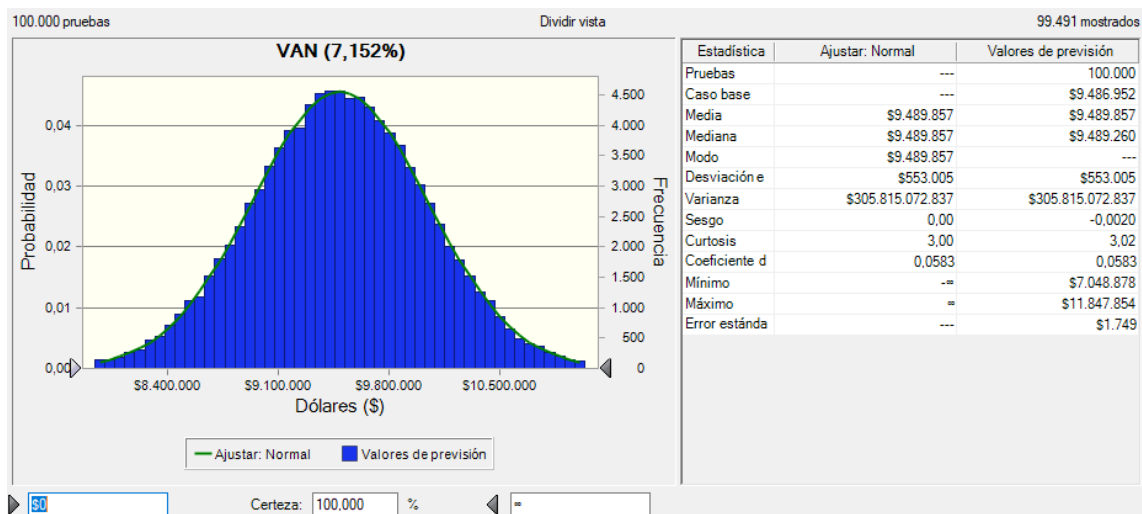
Para ambas variables de entrada se ajustó una distribución normal, donde para cada una su media y desviación estándar fueron indicadas anteriormente. Cabe destacar que para el tipo de cambio se opta por definir un límite inferior de 850(*CLP/USD*), en vista de que en los últimos 12 meses éste muestra una tendencia hacia valores por encima de 900(*CLP/USD*). De esta forma, se evita que el programa trabaje con datos considerablemente inferiores a este último valor. Las distribuciones de probabilidad de ambas variables se muestran en la figura 2.11.



**Figura 2.11: Distribución de probabilidades de variables de entrada en análisis de sensibilidad del VAN**

Fuente: Software Crystal Ball

Se hace uso del método de simulación Montecarlo, para el cual se consideran 100.000 iteraciones y un nivel de confianza de 95%. Los resultados muestran que a la variable de salida se le puede ajustar una distribución normal (con una media de 9.489.857 (*USD*) y una desviación estándar de 553.005 (*USD*)), y que además la probabilidad de que el VAN sea positivo es de prácticamente 100%. Esto se muestra en detalle en la figura 2.12.



**Figura 2.12: Distribución de probabilidades de VAN sensibilizado**

Fuente: Software Crystal Ball

Por último, el gráfico de sensibilidad obtenido (representado en la figura 2.13) permite concluir que el precio de venta del producto final es la variable más influyente en el cálculo

del VAN, con un 99,9% de influencia sobre este último. Esto es de esperar, ya que si ambas variables toman su valor medio, los ingresos operacionales son casi 66 veces mayores a los gastos en personal. Por lo tanto, es lógico que el tipo de cambio tenga casi nula influencia en el VAN obtenido.

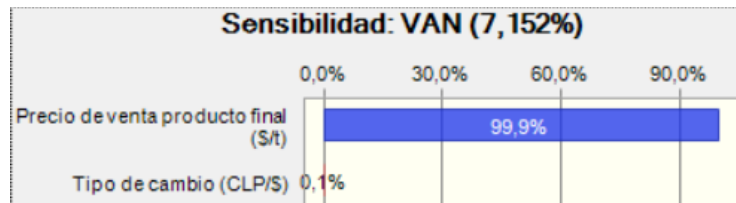


Figura 2.13: Gráfico de sensibilidad el VAN obtenido

Fuente: Software Crystal Ball

### 3 Capítulo 3: DISCUSIÓN

#### 3.1 Sobre justificación teórica de realización del proyecto y resultados de evaluación económica

En la sección 2.1.3 se logra concluir en base a la información recopilada en artículos científicos que efectivamente una chatarra de menores dimensiones y con mayor contenido ferroso contribuye a un incremento en el rendimiento metálico y a una disminución en las emisiones de gases (particularmente, de  $CO_2$ ) desde el convertidor.

Ahora bien, otra forma de poder llegar a la misma conclusión pudo haber sido a través del contraste entre el uso exclusivo de chatarra ferrosa triturada y el uso del mix tradicional de carga de chatarra en términos del rendimiento metálico y emisiones fugitivas. Si bien, ya hubo una experiencia al respecto (enero 2020), la prueba fue realizada con sólo 7 hornadas para cada caso, lo cual si bien es un buen antecedente para la evaluación del proyecto, es una cantidad muy poco representativa. Por ende, la compañía podría experimentar durante un cierto tiempo tal que se pueda procesar una cantidad lo suficientemente grande de hornadas tanto con el mix tradicional de carga como con chatarra ferrosa triturada únicamente, por ejemplo una semana de producción normal.

Sin embargo, histórica y actualmente, el costo por tonelada de chatarra ferrosa triturada es considerablemente más alto que el de la chatarra externa liviana que tradicionalmente se compra. De hecho, en la evaluación de la situación sin proyecto esto se hace evidente, pues

la chatarra procesada cuesta casi 1.5 veces lo que cuesta la chatarra externa liviana y eso hace que para la compañía sea completamente inviable económicamente cubrir los requerimientos de chatarra anuales con la compra de la chatarra previamente tratada. En efecto, los egresos afectos a impuestos son mayores a 23.000.000 USD, por lo cual el rendimiento metálico debiera aumentar por encima de un 4% para que los ingresos puedan cubrir a los egresos, lo cual es poco realista considerando que el rendimiento metálico promedio del convertidor es de un 90%.

Ahora bien, en relación a la sensibilización del VAN realizada para la alternativa de adquirir la planta fragmentadora, para la variable tipo de cambio inicialmente se pensaba ajustar una distribución de probabilidades más concentrada a la derecha (para representar valores de tipo de cambio más cercanos a los observados en los últimos meses de 2024). Sin embargo, únicamente se disponía de los datos media y desviación estándar, optando por el ajuste de una distribución normal con la aclaración hecha en la sección 2.9.5. Mientras que, para el precio de venta del producto final, no se dispone de mayor información acerca de tendencias por lo cual se opta por una distribución normal, respaldado además por el hecho de que la desviación estándar es casi el 3% de la media (poca dispersión de los datos).

Por último, cabe destacar que, en vista del gráfico de sensibilidad obtenido, la determinación precisa de cuál es la distribución de probabilidades más adecuada de ajustar para la variable tipo de cambio es muy poco determinante para el cálculo del VAN.

### **3.2 Sobre implicancias de la tenencia de una planta fragmentadora de chatarra en la industria del acero**

A nivel mundial, el énfasis cada vez mayor que se le da a las emisiones de carbono desde los procesos de producción llevados a cabo en los hornos de las acerías vuelve bastante interesante, como para el caso de CAP Acero, el tomar una medida que vaya en línea con lo anterior. Así, por ejemplo, existe la estrategia de producción de acero verde con ayuda de fuentes de energía renovables.

Ahora bien, se logró concluir que el uso de chatarra procesada como materia prima en un convertidor aminora las emisiones ambientales de carbono y por ende la incorporación de una planta fragmentadora de chatarra representa, finalmente, una estrategia para disminuir las emisiones de carbono en la ruta de producción de acero.

Cabe recordar que, dependiendo del diseño de la planta fragmentadora, la recuperación de metales no ferrosos y/o elementos no metálicos puede traer beneficios económicos derivados de la venta de aquellos productos, aunque esto depende de las necesidades de cada empresa acerera. Más aún, el incremento en el IRM por la adquisición del equipo industrial sumado a lo ya expuesto en el presente párrafo y en el anterior, podría significar un mayor nivel de competitividad en el mercado del acero para alguna empresa acerera determinada (por los beneficios económicos y ambientales que trae), esto sujeto al momento en que se compre la maquinaria y el período que comprende su vida útil. Sin embargo, cabe resaltar que la utilización de un convertidor al oxígeno en lugar de un convertidor de arco eléctrico (el segundo sólo incorpora chatarra como carga metálica) puede ser una limitante para la posición competitiva que la empresa, como por ejemplo CAP Acero, tenga en el mercado desde la perspectiva medioambiental.

## **4 Capítulo 4: CONCLUSIONES**

### **4.1 Sobre viabilidad técnica (objetivo específico)**

Si bien en el interior de la compañía existe el espacio físico disponible para la instalación de la maquinaria “PSX-80104”, en relación a las necesidades de mano de obra no se pudo averiguar con certeza cuántos operarios se necesitan para la operación normal de dicha instalación durante un turno de 8 horas puesto que dicha información no fue proporcionada por la empresa seleccionada (se supuso que se necesitan de 4 personas en total). Por esto, se concluye que el objetivo específico no fue cumplido a cabalidad dada la incertidumbre acerca de la veracidad del supuesto establecido.

### **4.2 Sobre viabilidad económica (objetivo específico)**

Considerando que se trata de un estudio de pre factibilidad, el objetivo específico fue cumplido a cabalidad puesto que bajo los parámetros y tasa de descuento consideradas para la evaluación económica se concluye a toda luz que es económicamente rentable para la empresa optar por adquirir una planta fragmentadora (esto ocurre con cualquier tasa de descuento aplicada por debajo del 96%). De esta forma, se concluye que es adecuado continuar con el estudio en niveles más profundos de información, en vista de que tanto el

costo de instalación de la planta fragmentadora costo el costo por mantención de la misma fueron estimados en base a supuestos.

#### **4.3 Sobre viabilidad medioambiental (objetivo específico)**

Pese a que se logró determinar que efectivamente una mejor composición química de la chatarra (gracias a la etapa de separación magnética en la planta de tratamiento) contribuye a aminorar las emisiones ambientales desde el proceso de conversión al oxígeno, se concluye que debiera profundizarse en la recopilación de información asociada al consumo de agua por hora de operación de la instalación “PSX 80-104” puesto que, como se explicó en la sección 2.8, con la información disponible actualmente no es suficiente para determinar a cabalidad si la operación de la instalación de fragmentación cumple con la normativa ambiental local vigente.

#### **4.4 Recomendaciones futuras**

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo en relación a cómo impacta el tamaño y composición química de la chatarra en el rendimiento metálico y emisiones desde el convertidor aplican para cualquier acería del mundo (sin importar si se opera con convertidor de arco eléctrico o convertidor al oxígeno). De esta forma, el presente trabajo constituye una importante fuente de información que puede ser usada como respaldo teórico para la evaluación de algún proyecto de adquisición de chatarra ferrosa procesada en alguna siderúrgica determinada.

## 5 Capítulo 5: REFERENCIAS

*Adelca – Primera acería del Ecuador* (s.f.). Adelca. Recuperado el 22 de septiembre de 2023, de [https://www.adelca.com/quienes\\_somos.html](https://www.adelca.com/quienes_somos.html).

Álvarez, C. (2016). *Valorización de residuos siderúrgicos: escorias de acería ld, lodos de horno alto y lodos de acería ld; en la industria cerámica ladrillera*. Tesis doctoral, Programa de Doctorado en Minería, Obra Civil y Medio Ambiente, Universidad de Oviedo, España.

Bruna, R., & Suárez, J. (2016). *DISEÑO DE TRITURADORA DE BOTELLAS PET*. Trabajo de grado, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

*CORAREII - Inicio de Cobertura - VF @ PEN 1.20 – Mantener* (2023). KALLPA SAB. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://kallpasab.com/REPORTES/CORAREII-IniciodeCobertura-VF@PEN1.20-Mantener.pdf>

Cruz, A. (2020). *Qué es el OEE y cómo se calcula*. Gemba Academy. Recuperado en [https://www.gembaacademy.com/blog/es/2020/01/10/que-es-el-oee-y-como-se-calcula#:~:text=OEE%20%3D%20Availability%20x%20Performance%20x,que%20se%20demora%2030%20minutos](https://www.gembaacademy.com/blog/es/2020/01/10/que-es-el-oee-y-como-se-calcula#:~:text=OEE%20%3D%20Availability%20x%20Performance%20x,que%20se%20demora%2030%20minutos.). [2023, 8 de septiembre].

Corporación Financiera Internacional (2007). *Guía sobre medioambiente, salud y seguridad para las acerías integradas*. World Bank Group. Recuperado en <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2007-integrated-steel-mills-ehs-guidelines-es.pdf> [2023, 3 de septiembre].

Campos, G. (2016). *Elaboración de balances de materia y calor en convertidores BOF de CAP Acero Huachipato para la implementación y cálculo de carga en PI-SYSTEM*. Trabajo de pregrado, Universidad de Concepción, Chile.

Cano, P. (2009). *Fabricación de acero en convertidores al oxígeno – LD*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Carrillo, F. (2018). *Mejoras en el control de soplado en el convertidor y su incidencia en la disminución de defectos tipo porosidades en producto semiterminado, CAP Acero*. Trabajo de pregrado, Universidad de Concepción, Chile.

Cocunubo, C. (2018). *Estandarización composicional de chatarra para mejorar el rendimiento metálico en convertidor LWS de Acerías Paz del Río*. Trabajo de Grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica, Colombia.

Coronado, J. (2018). *Balance de masa, energía y simulación del Convertidor LD*. Trabajo Fin de Máster, Master en Ingeniería de Minas, Universidad de Oviedo, España.

Deproin S.A (s.f.). *Diseño de filtro de mangas en Guayaquil*. [Figura]. Recuperado de <https://deproinsa.com.ec/proyectos-industriales/filtro-de-mangas/>

Di Maggio, D. (2023). *Las 50 mayores acerías mundiales*. Expometals. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.expometals.net/es/news/las-50-mayores-acerias-mundiales>

*Ecoinnovación en Euskadi* (s.f.). Izaité. Recuperado el 3 de diciembre de 2023, de <https://www.izaite.net/archivos-documentacion/Izaite-105-proyectos-ecoinnocacion-euskadi.pdf>

*Economía circular, regenerativa y Net Zero* (s.f.). AZA. Recuperado el 22 de septiembre de 2023, de <https://www.aza.cl/reporte-sostenibilidad-2021/pdf/ReporteAZA2021-Cap3.pdf>.

*Empresa Siderúrgica líder* (s.f.). Aceros Arequipa. Recuperado el 20 de septiembre de 2023, de <https://acerosarequipa.com/pe/es/conocenos>.

*Filtro de mangas: funcionamiento* (2021, 25 de enero). Grupo Calero. Recuperado el 24 de marzo de 2024, de <https://www.calero-group.com/filtro-de-mangas-funcionamiento-2/>

González, M. (2018). *Propuesta de mejora de la productividad en el procesamiento de chatarra metálica ferrosa mediante el levantamiento de KPIS en una empresa acerera*. Tesis de Máster, Dirección de Operaciones y Seguridad Industrial, Universidad de Las Américas, Ecuador.

*Guía de buenas prácticas para el reciclaje de metales en Cataluña* (s.f.). Agència de Residus de Catalunya. Recuperado el 29 de septiembre de 2023, de [https://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/prevencio/guia\\_metals\\_ok.pdf](https://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/prevencio/guia_metals_ok.pdf).

Gutiérrez, T. (2021). *RECICLADO DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS*. Trabajo de grado, Universidad de Valladolid, España.

Hill, C. (2022). *ArcelorMittal acquires Dutch scrap metal recycling Company*. Steel Times International. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.steeltimesint.com/news/arcelormittal-acquires-dutch-scrap-metal-recycling-company>

Hill, C. (2022). *ArcelorMittal acquires metals recycling company John Lawrie Metals*. Steel Times International. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.steeltimesint.com/news/arcelormittal-acquires-metals-recycling-company-john-lawrie-metals>

Hill, C. (2023). *ArcelorMittal acquires Polish scrap metal recycler*. Steel Times International. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.steeltimesint.com/news/arcelormittal-acquires-polish-scrap-metal-recycler>

*Inicio* (s.f.). SV Recycling Equipment. Recuperado el 5 de diciembre de 2023, de <https://sv-recycling.com/>

Iluțiu–Varvara, D. A., Tintelecan, M., Aciu, C., Sas–Boca, I. M., Hădărean, A., Rus, T., & Mare, R. (2019). An Assessment of the Substance Losses from Charge Composition Used to the Steelmaking–Key Factor for Sustainable Steel Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 32, 15-21.

*Kopia CENTER – Double Shaft Shredder (Metal Shredder)* (s.f.). SV Recycling Equipment. Recuperado el 5 de diciembre de 2023, de <https://sv-recycling.com/catalogos/trituradora-doble-eje-center.pdf>

Layton, J.C. (2017, marzo). Ternium va por las 200 mil toneladas de producción. *La Patria* [en línea]. Recuperado de <https://archivo.lapatria.com/economia/ternium-va-por-las-200-mil-toneladas-de-produccion-356354> [2023, 25 de septiembre].

Lu Ming, Xue Kui, Guo Hongmin, Liang Shaopeng, Zhang Zhaohui, & Liu Hairui. Quality control and structural optimization of converter steelmaking scrap. *Steel*, 58(5), 51-58.

Muñoz, C. (2012). *Evaluación medioambiental del sistema integral de gestión de vehículos al final de su vida útil*. Tesis de Doctorado, Proyectos de Innovación Tecnológica en Ingeniería del Producto y del Proceso, Universidad Jaime I, España.

Madías, J. (2013). El impacto de las recientes innovaciones en los hornos eléctricos de arco. *Acero Latinoamericano*.

Manouchehri (2018). *Looking at shredding plant configuration and its performance for developing shredding product stream*. [Figura]. Recuperado de <https://www.jernkontoret.se/globalassets/publicerat/forskning/d-rapporter/d823.pdf>

Manouchehri (2018). Looking at shredding plant configuration and its performance for developing shredding product stream. *Jernkontorets Forskning*.

Matino, I., Colla, V., & Baragiola, S. (2017). Quantification of energy and environmental impacts in uncommon electric steelmaking scenarios to improve process sustainability. *Applied Energy*, 207, 543-552.

*Nuestros clientes* (s.f.). TSR Recycling. Recuperado el 14 de diciembre de 2023, de <https://www.tsr.ey/en/our-customers/steelworks-and-foundries/>

Nascimento, C., Scal, M., & Castro, J. (2009). ESTUDO DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO 1 RENDIMENTO METÁLICO DE UMA ACIARIA ELÉTRICA. 40º *Seminário de Aciaria*, 313-324.

*Negocio de excelencia* (s.f.). AZA. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.aza.cl/reporte-sostenibilidad-2021/pdf/ReporteAZA2021-Cap5.pdf>

*NEWSLETTER ACERO ABRIL 5* (2023, 5 de abril). Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. Recuperado el 5 de diciembre de 2023, de <https://www.andi.com.co/Uploads/boletin%2017.pdf>

Pak, Y. A., Shakhpazov, E. K., Filippov, G. A., Levada, A. G., & Vaganov, E. Y. (2011). Effect of additions on the production cost of steel and the cost-effectiveness of converter steelmaking. *Metallurgist*, 55, 558-566.

*Paz del Río invertirá US\$2,5mn en fragmentadora de chatarra* (2004, 14 de diciembre). BNamericas. Recuperado el 29 de septiembre de 2023, de [https://www.bnamericas.com/es/noticias/Paz del Río invertira US\\*2,5mn en fragmentadora de chatarra](https://www.bnamericas.com/es/noticias/Paz%20del%20Rio%20invertira%20US*2,5mn%20en%20fragmentadora%20de%20chatarra)

Penz, Florian & Schenk, Johannes & Bundschuh, Philip & Panhofer, Harald & Pastucha, Krzysztof & Maunz, Bernhard. (2017). SCRAP MELTING IN BOF: INFLUENCE OF PARTICLE SURFACE AND SIZE DURING DYNAMIC CONVERTER MODELLING. 85-96. 10.5151/1982-9345-30158.

Penz, F. M., Schenk, J., Ammer, R., Klösch, G., & Pastucha, K. (2019). Evaluation of the influences of scrap melting and Dissolution during dynamic linz–donawitz (LD) converter modelling. *Processes*, 7(4), 186.

Premasid (s.f.). *Riesgos y medidas preventivas en el proceso de obtención del arrabio (El horno alto)*. Plataforma Tecnológica Española del Acero, PLATEA. Recuperado en [https://aceroplatea.es/assets/uploads/documents/doc\\_6385bb1adc36a.pdf](https://aceroplatea.es/assets/uploads/documents/doc_6385bb1adc36a.pdf) [2023, 6 de septiembre].

Pulgar, J. (2018). *Perfil de solidificación de acero bajo distintas condiciones operacionales en colada continua de palanquillas*. Trabajo de pregrado, Universidad de Concepción, Chile.

*Quiénes somos* (s.f.). Ternium Argentina. Recuperado el 21 de septiembre de 2023, de <https://ar.ternium.com/es/nuestra-empresa>.

Recycling Technology Worldwide (s.f.). *Vibratory screen improves scrap metal quality*. [Figura]. Recuperado de <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/vibratory-screen-improves-scrap-metal-quality-3187686.html>

Ryman, C., & Larsson, M. (2006). Reduction of CO2 emissions from integrated steelmaking by optimised scrap strategies: Application of process integration models on the BF–BOF system. *ISIJ international*, 46(12), 1752-1758.

Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014 a). Preparación y evaluación de proyectos. En *Preparación y Evaluación de Proyectos* (p. 1) (6a. ed.). México: Mc Graw-Hill.

Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014 b). Tipología de proyectos. En *Preparación y Evaluación de Proyectos* (p. 4-5) (6a. ed.). México: Mc Graw-Hill.

Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014 c). Alcances del estudio del proyecto. En *Preparación y Evaluación de Proyectos* (p. 25-26) (6a. ed.). México: Mc Graw-Hill.

Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014 d). El estudio del proyecto como proceso cíclico. En *Preparación y Evaluación de Proyectos* (p. 27-29) (6a. ed.). México: Mc Graw-Hill.

Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014 e). Costos diferenciales. En *Preparación y Evaluación de Proyectos* (p. 89) (6a. ed.). México: Mc Graw-Hill.

*Scrubber* (s.f.). TECAM. Recuperado el 24 de marzo de 2024, de <https://tecamgroup.com/es/tratamiento-de-emisiones/scrubber/#:~:text=El%20scrubber%20es%20un%20equipamiento,scrubbers%20para%20tratamientos%20de%20olores.>

Shukla, A. K., Deo, B., Millman, S., Snoeijer, B., Overbosch, A., & Kapilashrami, A. (2010). An insight into the mechanism and kinetics of reactions in BOF steelmaking: theory vs practice. *steel research international*, 81(11), 940-948.

Sigaryov, E.M., Lobanov, Y.S., Semiryagin S.V., Pohvalitiy A. A. (2020). Simulation of melting of metal scrap of different density in oxygen-converter swimming. *Metallurgy*, 2(37), 3-8.

*Sistemas de colección de polvo* (2021, 20 de octubre). Air Quality de México. Recuperado el 23 de marzo de 2024, de <https://www.aqdemexico.com/sistemas-de-coleccion-de-polvo/>

*SV Recycling Equipment, la ingeniería para el procesamiento de metales y RCD* (2022). Revista Demolición y Reciclaje. Recuperado el 5 de diciembre de 2023, de <https://www.demolicionyreciclaje.es/demolicion-reciclaje/3398-sv-recycling-equipment-la-ingenieria>

SV Recycling Equipment (s.f.). *Product portfolio*. [Figura]. Recuperado de <https://sv-recycling.com/catalogos/presentation-simvic.pdf>

TECAM (s.f.). *Scrubber*. [Figura]. Recuperado de <https://tecamgroup.com/es/tratamiento-de-emisiones/scrubber/#:~:text=El%20scrubber%20es%20un%20equipamiento,scrubbers%20para%20tratamientos%20de%20colores>.

Trindade, J. (2013). *Obtenção, Mercado e Reciclagem de Sucatas Ferrosas na Indústria Siderúrgica Brasileira*. Trabajo de grado, Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.

*TSR Recycling GmbH & Co. KG* (s.f.). Environmental XPRT. Recuperado el 15 de diciembre de 2023, de <https://www.environmental-expert.com/companies/tsr-recycling-gmbh-co-kg-10303/>

*TSR's list of steel scrap* (s.f.). TSR Recycling. Recuperado el 14 de diciembre de 2023, de [https://www.tsr.eu/fileadmin/user\\_upload/tsr\\_2018/downloads/TSR\\_Schrottsortenliste\\_EN.pdf](https://www.tsr.eu/fileadmin/user_upload/tsr_2018/downloads/TSR_Schrottsortenliste_EN.pdf)

Universitat Politècnica de Catalunya (s.f.). Índice Anexos. Recuperado en [http://www.lis.edu.es/uploads/8bd55ee6\\_53b5\\_4e44\\_8cfb\\_410f116ebcf7.pdf](http://www.lis.edu.es/uploads/8bd55ee6_53b5_4e44_8cfb_410f116ebcf7.pdf) [2023, 15 de septiembre].

VERLEK INGENIERIA (2018, 11 de mayo). *Lavador de gases Tipo venturi*. [Figura]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=gd0-J7MZ6FU&t=330s>

VERLEK INGENIERIA. (2018, 11 de mayo). *Lavador de gases Tipo venturi* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=gd0-J7MZ6FU&t=330s>

Voraberger, B., Wimmer, G., Diéguez, U., Wimmer, E., Pastucha, K., & Fleischanderl, A. (2022). Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO<sub>2</sub> Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*, 12 (3), 1-17.

Zuliani, D. J., Scipolo, V., & Born, C. (2009). Opportunities to reduce costs and lower GHG emissions in EAF and BOF steelmaking. *stahl und eisen*, 129(9), S10.

2021 (s.f.). Aceros Arequipa. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://investors.acerosarequipa.com/storage/memorias/May2022/4rnvyUWuBDWzTkT4hWoT.pdf>

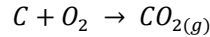
8. *RECUPERACIÓN DE CHATARRA* (s.f.). Junta de Andalucía. Recuperado el 4 de octubre de 2023, de

<https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/60-157-MANUAL-PRACTICO-DE-RECOMENDACIONES-TECNICAS-Y-DE-GESTION-MEDIOAMBIENTAL-VEHICULOS-A-MOTOR-Y-R/60-157/9-RECUPERACION-DE-CHATARRA.PDF>.

## 6 Capítulo 6: ANEXOS

### Anexo 1: Detalle de cálculo de emisiones de $CO_2$ por tonelada de arrabio en Alto Horno

Para determinar las emisiones de  $CO_2$  por tonelada de coque utilizada, hay que considerar la reacción de oxidación del carbono que ocurre en el interior del equipo (L. G. Arqueros, comunicación personal, 15 de febrero, 2024).



De la reacción anterior, se observa que 1 mol de  $C$  reacciona para formar 1 mol de  $CO_{2(g)}$ . Por lo tanto, puede obtenerse la cantidad de toneladas de carbono contenidas en una tonelada de  $CO_2$  de acuerdo a la ecuación 6.1:

$$\frac{\text{masa } (C)}{\text{masa molar } (C)} = \frac{\text{masa } (CO_2)}{\text{masa molar } (CO_2)}$$

#### Ecuación 6.1: Relación entre masas y masas molares de $C$ y de $CO_2$

De la relación anterior, se tiene que:

$$\frac{\text{masa } (CO_2)}{\text{masa } (C)} = \frac{\text{masa molar } (CO_2)}{\text{masa molar } (C)} = \frac{44 \left(\frac{gr}{mol}\right)}{12 \left(\frac{gr}{mol}\right)} = 3,67 \left(\frac{t (CO_2)}{t (C)}\right)$$

Multiplicando el valor obtenido recientemente por la pureza del coque, se tiene que:

$$3,67 \left(\frac{t (CO_2)}{t (C)}\right) * 0,8635 \left(\frac{t (C)}{t (coque)}\right) = 3,169 \left(\frac{t (CO_2)}{t (coque)}\right)$$

Por otro lado, el consumo de coque necesario para producir una tonelada de arrabio corresponde a  $0,462 (t (coque)/ t (arrabio))$ . De esta forma, se obtiene la cantidad de emisiones de  $CO_2$  por tonelada de arrabio producida en Alto Horno como sigue:

$$3,169 \frac{t(CO_2)}{t(coque)} * 0,462 \frac{t(coque)}{t(arrabio)} = 1,464 \frac{t(CO_2)}{t(arrabio)}$$

## Anexo 2: Detalle de cálculo de emisiones de $CO_2$ por tonelada de arrabio en BOF

Para la etapa del convertidor, el flujo de carbono de entrada y salida es representado en la figura 6.1. Cabe destacar que no están considerados los flujos con un contenido de carbono despreciable, y que además se consideran las masas promedio de entrada de chatarra y arrabio, además de sus contenidos de carbono promedio.



**Figura 6. 1: Diagrama de flujo de carbono en BOF**

**Fuente: Elaboración propia**

De esta forma, puede calcularse la masa total de carbono promedio que ingresa al convertidor por hornada. Dicho valor viene dado por la ecuación 6.2:

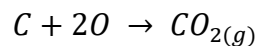
$$masa C_{(entrada)} = masa\ total_{(arrabio)} * masa\ C_{(arrabio)} + masa\ total_{(chatarra)} * masa\ C_{(chatarra)}$$

**Ecuación 6.2: Masa de carbono de entrada teórica (promedio) al BOF por hornada**

Considerando la ecuación 6.2 y reemplazando los datos provenientes de la figura 6.1, se tiene:

$$77 \frac{(t\ (arrabio))}{(hornada)} * 0,045 \frac{(t\ (C))}{(t\ (arrabio))} + 10 \frac{(t\ (chatarra))}{(hornada)} * 0,01 \frac{(t\ (C))}{(t\ (chatarra))} + 16 \frac{(t\ (chatarra))}{(hornada)} * 0,004 \frac{(t\ (C))}{(t\ (chatarra))} = 3,629 \frac{(t\ (C))}{(hornada)}$$

El siguiente paso consiste en calcular la cantidad promedio de toneladas de  $CO_2$  emitidas desde el convertidor por hornada hay que considerar la siguiente reacción química de oxidación del carbono que ocurre dentro del convertidor (Campos, 2016, p.27).



De la reacción anterior, haciendo uso de la ecuación 6.1 se obtiene finalmente un valor de 3,67 (t (CO<sub>2</sub>) / t (C)). De esta forma, puede obtenerse la cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> teóricas emitidas (en promedio) por hornada como sigue:

$$3,629 \frac{(t (C))}{(hornada)} * 3,67 \left( \frac{t (CO_2)}{t (C)} \right) = 13,318 \left( \frac{t (CO_2)}{hornada} \right)$$

Finalmente, con el valor anterior calculado y considerando el promedio de masa de arrabio cargada por hornada, puede obtenerse el total de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de arrabio utilizada como materia prima en el BOF como sigue:

$$13,318 \left( \frac{ton (CO_2)}{hornada} \right) * \frac{1 (hornada)}{77 (ton (arrabio))} = 0,173 \left( \frac{ton (CO_2)}{ton (arrabio)} \right)$$

### Anexo 3: Mediciones de gases 2023 y cálculos realizados

| Mes        | Arrabio (kg) | Chatarra (kg) | Acero (kg) | CO (kg) | CO <sub>2</sub> (kg) | $\frac{CO}{CO_2}$ | $\frac{CO_2}{arrabio}$ | $\frac{CO_2}{acero}$ |
|------------|--------------|---------------|------------|---------|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| Enero      | 83267        | 23667         | 94900      | 992     | 12433                | 0,0797            | 0,149                  | 0,131                |
| Marzo      | 72250        | 22300         | 84750      | 356     | 11894                | 0,0299            | 0,164                  | 0,140                |
| Abril      | 75600        | 22600         | 91600      | 843     | 11355                | 0,0742            | 0,150                  | 0,123                |
| Mayo       | 83167        | 28067         | 98500      | 667     | 13368                | 0,0498            | 0,160                  | 0,135                |
| Junio      | 73400        | 25200         | 88400      | 863     | 10717                | 0,0805            | 0,146                  | 0,121                |
| Julio      | 76600        | 23467         | 89933      | 408     | 11813                | 0,0345            | 0,154                  | 0,131                |
| Agosto     | 78233        | 26133         | 94700      | 367     | 12755                | 0,0287            | 0,163                  | 0,134                |
| Septiembre | 80267        | 19067         | 89767      | 354     | 12734                | 0,0277            | 0,158                  | 0,141                |

**Anexo 4: Tiempos de carga de chatarra para 2 cajas**

| Hornada | Tiempo de carga (s) | Hornada | Tiempo de carga (s) |
|---------|---------------------|---------|---------------------|
| 1       | 423                 | 16      | 504                 |
| 2       | 337                 | 17      | 207                 |
| 3       | 313                 | 18      | 463                 |
| 4       | 312                 | 19      | 257                 |
| 5       | 439                 | 20      | 323                 |
| 6       | 428                 | 21      | 487                 |
| 7       | 323                 | 22      | 380                 |
| 8       | 393                 | 23      | 425                 |
| 9       | 385                 | 24      | 346                 |
| 10      | 378                 | 25      | 297                 |
| 11      | 348                 | 26      | 296                 |
| 12      | 493                 | 27      | 327                 |
| 13      | 429                 | 28      | 299                 |
| 14      | 388                 | 29      | 370                 |
| 15      | 445                 | 30      | 367                 |

**Anexo 5: Tiempos de carga de chatarra para 3 cajas**

| Hornada | Tiempo de carga (s) | Hornada | Tiempo de carga (s) |
|---------|---------------------|---------|---------------------|
| 1       | 568                 | 16      | 483                 |
| 2       | 405                 | 17      | 461                 |
| 3       | 681                 | 18      | 610                 |
| 4       | 493                 | 19      | 597                 |
| 5       | 631                 | 20      | 603                 |
| 6       | 626                 | 21      | 552                 |
| 7       | 474                 | 22      | 498                 |
| 8       | 607                 | 23      | 574                 |
| 9       | 620                 | 24      | 503                 |
| 10      | 481                 | 25      | 600                 |
| 11      | 484                 | 26      | 480                 |
| 12      | 510                 | 27      | 551                 |
| 13      | 438                 | 28      | 562                 |
| 14      | 478                 | 29      | 577                 |
| 15      | 520                 | 30      | 610                 |

**Anexo 6: Tiempos de carga de chatarra para 4 cajas**

| Hornada | Tiempo de carga (s) | Hornada | Tiempo de carga (s) |
|---------|---------------------|---------|---------------------|
| 1       | 620                 | 16      | 645                 |
| 2       | 642                 | 17      | 632                 |
| 3       | 605                 | 18      | 649                 |
| 4       | 573                 | 19      | 670                 |
| 5       | 748                 | 20      | 660                 |
| 6       | 669                 | 21      | 590                 |
| 7       | 683                 | 22      | 587                 |
| 8       | 554                 | 23      | 570                 |
| 9       | 554                 | 24      | 614                 |
| 10      | 610                 | 25      | 639                 |
| 11      | 577                 | 26      | 664                 |
| 12      | 598                 | 27      | 580                 |
| 13      | 661                 | 28      | 607                 |
| 14      | 672                 | 29      | 654                 |
| 15      | 642                 | 30      | 672                 |

**Anexo 7: Simulación de escenario 2.1 para cálculo de consumo específico de *tundish***

| N° hornada en sec. | Convertidor |       |      | Estación ajuste met. |       |           | Estación vacío |       |      | Colada continua |       |      | N° líneas |
|--------------------|-------------|-------|------|----------------------|-------|-----------|----------------|-------|------|-----------------|-------|------|-----------|
|                    | Inic.       | Fin   | Tap  | Inic.                | Fin   | Tap (min) | Inic.          | Fin   | Tap  | Inic.           | Fin   | Tap  |           |
| 1                  | 0:00        | 0:42  | 0:42 | 1:07                 | 2:27  | 80        | 2:37           | 3:11  | 0:34 | 3:23            | 4:03  | 0:40 | 5         |
| 2                  | 0:42        | 1:24  | 0:42 | 1:49                 | 3:12  | 83        | 3:22           | 3:51  | 0:29 | 4:03            | 4:43  | 0:40 | 5         |
| 3                  | 1:24        | 2:06  | 0:42 | 2:31                 | 3:52  | 81        | 4:02           | 4:31  | 0:29 | 4:43            | 5:23  | 0:40 | 5         |
| 4                  | 2:06        | 2:48  | 0:42 | 3:13                 | 4:32  | 79        | 4:42           | 5:11  | 0:29 | 5:23            | 6:04  | 0:40 | 5         |
| 5                  | 2:48        | 3:30  | 0:42 | 3:55                 | 5:13  | 78        | 5:23           | 5:52  | 0:29 | 6:04            | 6:44  | 0:40 | 5         |
| 6                  | 3:30        | 4:12  | 0:42 | 4:37                 | 5:53  | 76        | 6:03           | 6:32  | 0:29 | 6:44            | 7:24  | 0:40 | 5         |
| 7                  | 4:12        | 4:54  | 0:42 | 5:19                 | 6:33  | 74        | 6:43           | 7:12  | 0:29 | 7:24            | 8:04  | 0:40 | 5         |
| 8                  | 4:54        | 5:36  | 0:42 | 6:01                 | 7:13  | 73        | 7:23           | 7:52  | 0:29 | 8:04            | 8:45  | 0:40 | 5         |
| 9                  | 5:36        | 6:18  | 0:42 | 6:43                 | 7:54  | 71        | 8:04           | 8:33  | 0:29 | 8:45            | 9:25  | 0:40 | 5         |
| 10                 | 6:18        | 7:00  | 0:42 | 7:25                 | 8:34  | 69        | 8:44           | 9:13  | 0:29 | 9:25            | 10:05 | 0:40 | 5         |
| 11                 | 7:00        | 7:42  | 0:42 | 8:07                 | 9:14  | 67        | 9:24           | 9:53  | 0:29 | 10:05           | 10:46 | 0:40 | 5         |
| 12                 | 7:42        | 8:24  | 0:42 | 8:49                 | 9:55  | 66        | 10:05          | 10:34 | 0:29 | 10:46           | 11:26 | 0:40 | 5         |
| 13                 | 8:24        | 9:06  | 0:42 | 9:31                 | 10:35 | 64        | 10:45          | 11:14 | 0:29 | 11:26           | 12:06 | 0:40 | 5         |
| 14                 | 9:06        | 9:48  | 0:42 | 10:13                | 11:15 | 62        | 11:25          | 11:54 | 0:29 | 12:06           | 12:46 | 0:40 | 5         |
| 15                 | 9:48        | 10:30 | 0:42 | 10:55                | 11:55 | 60        | 12:05          | 12:34 | 0:29 | 12:46           | 13:37 | 0:50 | 4         |

**Anexo 8: Simulación de escenario 2.2 para cálculo de consumo específico de tundish**

| N° hornada en sec. | Convertidor |      |      | Estación ajuste met. |      |           | Estación vacío |      |      | Colada continua |      |      | N° líneas |
|--------------------|-------------|------|------|----------------------|------|-----------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------|
|                    | Inic.       | Fin  | Tap  | Inic.                | Fin  | Tap (min) | Inic.          | Fin  | Tap  | Inic.           | Fin  | Tap  |           |
| 1                  | 0:00        | 0:45 | 0:45 | 1:10                 | 2:30 | 80        | 2:40           | 3:14 | 0:34 | 3:26            | 4:06 | 0:40 | 5         |
| 2                  | 0:45        | 1:30 | 0:45 | 1:55                 | 3:15 | 80        | 3:25           | 3:54 | 0:29 | 4:06            | 4:46 | 0:40 | 5         |
| 3                  | 1:30        | 2:15 | 0:45 | 2:40                 | 3:55 | 75        | 4:05           | 4:34 | 0:29 | 4:46            | 5:26 | 0:40 | 5         |
| 4                  | 2:15        | 3:00 | 0:45 | 3:25                 | 4:35 | 70        | 4:45           | 5:14 | 0:29 | 5:26            | 6:07 | 0:40 | 5         |
| 5                  | 3:00        | 3:45 | 0:45 | 4:10                 | 5:16 | 66        | 5:26           | 5:55 | 0:29 | 6:07            | 6:47 | 0:40 | 5         |
| 6                  | 3:45        | 4:30 | 0:45 | 4:55                 | 5:56 | 61        | 6:06           | 6:35 | 0:29 | 6:47            | 7:37 | 0:50 | 4         |

**Anexo 9: Simulación de escenario 2.3 para cálculo de consumo específico de tundish**

| N° hornada en sec. | Convertidor |      |      | Estación ajuste met. |      |           | Estación vacío |      |      | Colada continua |      |      | N° líneas |
|--------------------|-------------|------|------|----------------------|------|-----------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------|
|                    | Inic.       | Fin  | Tap  | Inic.                | Fin  | Tap (min) | Inic.          | Fin  | Tap  | Inic.           | Fin  | Tap  |           |
| 1                  | 0:00        | 0:46 | 0:46 | 1:11                 | 2:31 | 80        | 2:41           | 3:15 | 0:34 | 3:27            | 4:07 | 0:40 | 5         |
| 2                  | 0:46        | 1:32 | 0:46 | 1:57                 | 3:16 | 79        | 3:26           | 3:55 | 0:29 | 4:07            | 4:47 | 0:40 | 5         |
| 3                  | 1:32        | 2:18 | 0:46 | 2:43                 | 3:56 | 73        | 4:06           | 4:35 | 0:29 | 4:47            | 5:27 | 0:40 | 5         |
| 4                  | 2:18        | 3:04 | 0:46 | 3:29                 | 4:36 | 67        | 4:46           | 5:15 | 0:29 | 5:27            | 6:08 | 0:40 | 5         |
| 5                  | 3:04        | 3:50 | 0:46 | 4:15                 | 5:17 | 62        | 5:27           | 5:56 | 0:29 | 6:08            | 6:58 | 0:50 | 4         |

**Anexo 10: Simulación de escenario 2.1 para cálculo de líneas colando promedio**

| N° hornada en sec. | Convertidor |      |      | Estación ajuste met. |      |           | Estación vacío |       |      | Colada continua |       |      | N° líneas |
|--------------------|-------------|------|------|----------------------|------|-----------|----------------|-------|------|-----------------|-------|------|-----------|
|                    | Inic.       | Fin  | Tap  | Inic.                | Fin  | Tap (min) | Inic.          | Fin   | Tap  | Inic.           | Fin   | Tap  |           |
| 1                  | 0:00        | 0:42 | 0:42 | 1:07                 | 2:27 | 80        | 2:37           | 3:11  | 0:34 | 3:23            | 4:03  | 0:40 | 5         |
| 2                  | 0:42        | 1:24 | 0:42 | 1:49                 | 3:12 | 83        | 3:22           | 3:51  | 0:29 | 4:03            | 4:43  | 0:40 | 5         |
| 3                  | 1:24        | 2:06 | 0:42 | 2:31                 | 3:52 | 81        | 4:02           | 4:31  | 0:29 | 4:43            | 5:23  | 0:40 | 5         |
| 4                  | 2:06        | 2:48 | 0:42 | 3:13                 | 4:32 | 79        | 4:42           | 5:11  | 0:29 | 5:23            | 6:04  | 0:40 | 5         |
| 5                  | 2:48        | 3:30 | 0:42 | 3:55                 | 5:13 | 78        | 5:23           | 5:52  | 0:29 | 6:04            | 6:44  | 0:40 | 5         |
| 6                  | 3:30        | 4:12 | 0:42 | 4:37                 | 5:53 | 76        | 6:03           | 6:32  | 0:29 | 6:44            | 7:24  | 0:40 | 5         |
| 7                  | 4:12        | 4:54 | 0:42 | 5:19                 | 6:33 | 74        | 6:43           | 7:12  | 0:29 | 7:24            | 8:04  | 0:40 | 5         |
| 8                  | 4:54        | 5:36 | 0:42 | 6:01                 | 7:13 | 73        | 7:23           | 7:52  | 0:29 | 8:04            | 8:45  | 0:40 | 5         |
| 9                  | 5:36        | 6:18 | 0:42 | 6:43                 | 7:54 | 71        | 8:04           | 8:33  | 0:29 | 8:45            | 9:25  | 0:40 | 5         |
| 10                 | 6:18        | 7:00 | 0:42 | 7:25                 | 8:34 | 69        | 8:44           | 9:13  | 0:29 | 9:25            | 10:05 | 0:40 | 5         |
| 11                 | 7:00        | 7:42 | 0:42 | 8:07                 | 9:14 | 67        | 9:24           | 9:53  | 0:29 | 10:05           | 10:46 | 0:40 | 5         |
| 12                 | 7:42        | 8:24 | 0:42 | 8:49                 | 9:55 | 66        | 10:05          | 10:34 | 0:29 | 10:46           | 11:26 | 0:40 | 5         |

**Anexo 11: Simulación de escenario 2.2 para cálculo de líneas colando promedio**

| N° hornada en sec. | Convertidor |      |      | Estación ajuste met. |       |           | Estación vacío |       |      | Colada continua |       |      | N° líneas |
|--------------------|-------------|------|------|----------------------|-------|-----------|----------------|-------|------|-----------------|-------|------|-----------|
|                    | Inic.       | Fin  | Tap  | Inic.                | Fin   | Tap (min) | Inic.          | Fin   | Tap  | Inic.           | Fin   | Tap  |           |
| 1                  | 0:00        | 0:45 | 0:45 | 1:10                 | 2:30  | 80        | 2:40           | 3:14  | 0:34 | 3:26            | 4:06  | 0:40 | 5         |
| 2                  | 0:45        | 1:30 | 0:45 | 1:55                 | 3:15  | 80        | 3:25           | 3:54  | 0:29 | 4:06            | 4:46  | 0:40 | 5         |
| 3                  | 1:30        | 2:15 | 0:45 | 2:40                 | 3:55  | 75        | 4:05           | 4:34  | 0:29 | 4:46            | 5:26  | 0:40 | 5         |
| 4                  | 2:15        | 3:00 | 0:45 | 3:25                 | 4:35  | 70        | 4:45           | 5:14  | 0:29 | 5:26            | 6:07  | 0:40 | 5         |
| 5                  | 3:00        | 3:45 | 0:45 | 4:10                 | 5:16  | 66        | 5:26           | 5:55  | 0:29 | 6:07            | 6:47  | 0:40 | 5         |
| 6                  | 3:45        | 4:30 | 0:45 | 4:55                 | 5:56  | 61        | 6:06           | 6:35  | 0:29 | 6:47            | 7:37  | 0:50 | 4         |
| 7                  | 4:30        | 5:15 | 0:45 | 5:40                 | 6:46  | 66        | 6:56           | 7:25  | 0:29 | 7:37            | 8:28  | 0:50 | 4         |
| 8                  | 5:15        | 6:05 | 0:50 | 6:30                 | 7:37  | 66        | 7:47           | 8:16  | 0:29 | 8:28            | 9:18  | 0:50 | 4         |
| 9                  | 6:05        | 6:55 | 0:50 | 7:20                 | 8:27  | 66        | 8:37           | 9:06  | 0:29 | 9:18            | 10:08 | 0:50 | 4         |
| 10                 | 6:55        | 7:46 | 0:50 | 8:11                 | 9:17  | 66        | 9:27           | 9:56  | 0:29 | 10:08           | 10:59 | 0:50 | 4         |
| 11                 | 7:46        | 8:36 | 0:50 | 9:01                 | 10:08 | 66        | 10:18          | 10:47 | 0:29 | 10:59           | 11:49 | 0:50 | 4         |
| 12                 | 8:36        | 9:26 | 0:50 | 9:51                 | 10:58 | 66        | 11:08          | 11:37 | 0:29 | 11:49           | 12:39 | 0:50 | 4         |



**Anexo 14: Rendimiento del IPC del mercado chileno**

| Año  | Ene  | Feb       | Mar  | Abr  | May  | Jun       | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic       |
|------|------|-----------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|-----------|
| 2021 |      |           |      |      | 0,3% | 0,1%      | 0,8% | 0,4% | 1,2% | 1,3% | 0,5% | 0,8%      |
| 2022 | 1,2% | 0,3%      | 1,9% | 1,4% | 1,2% | 0,9%      | 1,4% | 1,2% | 0,9% | 0,5% | 1%   | 0,3%      |
| 2023 | 0,8% | -<br>0,1% | 1,1% | 0,3% | 0,1% | -<br>0,2% | 0,4% | 0,1% | 0,7% | 0,4% | 0,7% | -<br>0,5% |
| 2024 | 0,7% | 0,6%      | 0,4% | 0,5% |      |           |      |      |      |      |      |           |

**Anexo 15: Tasa de retorno (%) de bonos emitidos por el Banco Central de Chile (junio de 2021 hasta mayo de 2024)**

| Año  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2021 |      |      |      |      |      | 0,86 | 1,62 | 1,56 | 1,83 | 2,19 | 2,54 | 2,19 |
| 2022 | 2,25 | 2,1  | 2,01 | 1,87 | 1,9  | 1,92 | 1,86 | 1,75 | 2,06 | 2,48 | 2,5  | 1,6  |
| 2023 | 1,74 | 1,88 | 2,15 | 1,7  | 1,88 | 2,26 | 2,07 | 2,3  | 2,38 | 2,9  | 3,38 | 2,67 |
| 2024 | 2,44 | 2,45 | 2,65 | 2,5  | 2,74 |      |      |      |      |      |      |      |

**Anexo 16: Tipo de cambio (de USD a CLP) al primer día de cada mes considerado**

| Año  | Ene   | Feb | Mar   | Abr   | May | Jun | Jul   | Ago | Sep | Oct   | Nov | Dic |
|------|-------|-----|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
| 2023 |       |     |       |       |     | 809 | 801,7 | 840 | 852 | 908,2 | 897 | 856 |
| 2024 | 882,5 | 946 | 964,7 | 984,3 | 960 |     |       |     |     |       |     |     |

**Anexo 17: Tipo de cambio (de CNY a USD) al primer día de cada mes considerado**

| Año  | Ene        | Feb        | Mar        | Abr        | May       | Jun        | Jul        | Ago        | Sep        | Oct        | Nov        | Dic        |
|------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2023 |            |            |            |            |           | 0,140<br>9 | 0,137<br>8 | 0,140<br>4 | 0,139<br>7 | 0,139<br>2 | 0,139<br>3 | 0,141<br>2 |
| 2024 | 0,1<br>411 | 0,140<br>2 | 0,140<br>5 | 0,140<br>5 | 0,14<br>1 |            |            |            |            |            |            |            |

**Anexo 18: Precio por tonelada de acero (CNY/t) al primer día de cada mes considerado**

| Año  | Ene  | Feb      | Mar  | Abr  | May      | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|------|------|----------|------|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2023 |      |          |      |      |          | 3589 | 3711 | 3674 | 3757 | 3600 | 3802 | 3917 |
| 2024 | 3892 | 385<br>2 | 3758 | 3331 | 351<br>0 |      |      |      |      |      |      |      |