



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERIA

# **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PLANTA DE GASIFICACIÓN EN EL SUR DE CHILE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE CORTEZA DE ÁRBOLES**

**JOSÉ RICARDO RIVERA CARREÑO**

Actividad de Graduación para optar al grado de

Magíster en Ingeniería de la Energía

Profesor Supervisor:

**NESTOR ESCALONA BURGOS**

Santiago de Chile, (junio, 2020)

© 2020, José Rivera Carreño



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PLANTA DE GASIFICACIÓN EN EL SUR DE CHILE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE CORTEZA DE ÁRBOLES**

**JOSÉ RICARDO RIVERA CARREÑO**

Actividad de Graduación presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**NESTOR ESCALONA BURGOS**

**CÉSAR SÁEZ NAVARRETE**

**CARLOS BARRÍA SARAVIA**

**JULIO VERGARA AIMONE**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ingeniería de la Energía

Santiago de Chile, (junio, 2020)

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me han enseñado todos los hábitos y valores que al día de hoy han formado a la persona que soy. Han sido un soporte incondicional a lo largo de mi vida.

A mi familia, amigos y compañeros también dedico este trabajo, ya que sin su apoyo esto no hubiese sido posible.

¡Gracias!

.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres por estar allí en todo momento, apoyándome, aconsejándome y amándome durante cada etapa de mi vida.

A mi familia, por brindarme amor, comprensión y apoyo en todo momento.

A mis amigos, por ser un soporte vital en mi vida.

Finalmente, al Profesor Néstor Escalona Burgos, por la colaboración brindada durante la elaboración de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                |      |
|------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA .....                              | ii   |
| AGRADECIMIENTOS .....                          | III  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                         | VII  |
| ÍNDICE DE IMÁGENES .....                       | IX   |
| RESUMEN .....                                  | XII  |
| ABSTRACT .....                                 | XIII |
| Capítulo 1: Introducción .....                 | 14   |
| 1.1. Objetivo General .....                    | 17   |
| 1.2. Objetivos Específicos.....                | 17   |
| 1.3. Metodología .....                         | 17   |
| 1.3.1. Diagnostico .....                       | 18   |
| 1.3.2. Estudio de Factibilidad .....           | 18   |
| Capítulo 2: Marco Teórico.....                 | 19   |
| 2.1. ¿Que es el hidrógeno? .....               | 19   |
| 2.1.1. Estructura Atómica .....                | 19   |
| 2.1.2. Propiedades Físicas .....               | 20   |
| 2.1.3. Capacidad Energética.....               | 20   |
| 2.1.3.1. Poder Calorífico .....                | 20   |
| 2.1.3.2. Densidad Energética .....             | 22   |
| 2.2. Usos del Hidrógeno en la Actualidad ..... | 23   |
| 2.2.1. Refinación de Petróleo .....            | 24   |
| 2.2.2. Industria Química.....                  | 25   |
| 2.2.3. Producción de Acero .....               | 25   |
| 2.2.4. Transporte .....                        | 26   |
| 2.2.5. Generación de Energía .....             | 26   |
| 2.2.6. Edificación .....                       | 28   |

|          |                                                                        |    |
|----------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.     | Panorama del Hidrógeno en Chile .....                                  | 28 |
| 2.3.1.   | Usos del hidrógeno en Chile .....                                      | 28 |
| 2.3.2.   | Producción del Hidrógeno en Chile .....                                | 29 |
| 2.3.3.   | Normativas Vigentes .....                                              | 30 |
| 2.4.     | Métodos de Producción de Hidrógeno .....                               | 30 |
| 2.4.1.   | Producción a Partir de Combustibles Fósiles .....                      | 31 |
| 2.4.1.1. | Reformado de Vapor .....                                               | 31 |
| 2.4.1.2. | Gasificación de Carbón .....                                           | 33 |
| 2.4.1.3. | Reformado Auto Térmico .....                                           | 34 |
| 2.4.2.   | División de la Molécula de Agua .....                                  | 34 |
| 2.4.2.1. | Electrolisis .....                                                     | 34 |
| 2.4.2.2. | Termólisis .....                                                       | 35 |
| 2.4.3.   | Producción a Partir de Biomasa .....                                   | 35 |
| 2.4.3.1. | Pirolisis de Biomasa .....                                             | 35 |
| 2.4.3.2. | Gasificación de Biomasa .....                                          | 36 |
| 2.4.4.   | Procesos Biológicos .....                                              | 36 |
| 2.5.     | Gasificación de Biomasa para la Producción de Hidrógeno .....          | 37 |
| 2.5.1.   | Reacciones de la Gasificación .....                                    | 37 |
| 2.5.2.   | Agentes Gasificantes .....                                             | 40 |
| 2.5.3.   | Tipos de Gasificador .....                                             | 41 |
| 2.5.3.1. | Lecho Fijo .....                                                       | 42 |
| 2.5.3.2. | Lecho Fluidizado .....                                                 | 45 |
| 2.5.3.3. | Flujo Arrastrado .....                                                 | 48 |
| 2.6.     | Disponibilidad y Caracterización de la Corteza de Árbol en Chile ..... | 49 |
| 2.6.1.   | Industria de Aserraderos .....                                         | 49 |
| 2.6.1.1. | Clasificación de los aserraderos .....                                 | 49 |
| 2.6.2.   | Tipos de Residuos .....                                                | 51 |
| 2.6.3.   | Distribución de Aserraderos en Chile .....                             | 52 |
| 2.6.4.   | Disponibilidad de la Corteza de Árbol en Chile .....                   | 53 |

|             |                                                                                                        |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.        | Métodos de Separación y Purificación del Hidrógeno .....                                               | 55 |
| 2.7.1.      | Materiales Adsorbentes.....                                                                            | 56 |
| 2.7.2.      | Membranas.....                                                                                         | 57 |
| 2.7.3.      | Separación Criogénica .....                                                                            | 58 |
| 2.8.        | Tecnologías de Almacenamiento y Transporte del Hidrógeno.....                                          | 58 |
| 2.8.1.      | Almacenamiento de Hidrógeno .....                                                                      | 58 |
| 2.8.1.1.    | Gas en Alta Presión.....                                                                               | 59 |
| 2.8.1.2.    | Líquido (H <sub>2</sub> criogénico) .....                                                              | 60 |
| 2.8.1.3.    | Hidruros Metálicos.....                                                                                | 60 |
| 2.8.2.      | Transporte y Distribución de Hidrógeno .....                                                           | 60 |
| 2.8.2.1.    | Transporte Móvil .....                                                                                 | 61 |
| 2.8.2.2.    | Redes de Tuberías .....                                                                                | 61 |
| Capítulo 3: | Resultados y Discusión .....                                                                           | 63 |
| 3.1.        | Ubicación de la Planta de Gasificación .....                                                           | 63 |
| 3.2.        | Suministro de Biomasa a la Central.....                                                                | 64 |
| 3.2.1.      | Tipo de Residuo .....                                                                                  | 64 |
| 3.2.2.      | Costo de la Corteza de Árboles en Chile .....                                                          | 66 |
| 3.2.3.      | Composición Elemental de la Biomasa .....                                                              | 67 |
| 3.3.        | Estimación del Suministro de Biomasa a la Central de Gasificación.....                                 | 67 |
| 3.3.1.      | Residuo disponible en Forma de Corteza en Chile .....                                                  | 67 |
| 3.3.2.      | Residuo Disponible en Forma de Corteza Para las Regiones VII y VIII. ....                              | 69 |
| 3.4.        | Tamaño de la Central y Potencial de Generación de Hidrógeno .....                                      | 71 |
| 3.4.1.      | Estimación del Tamaño de la Central .....                                                              | 71 |
| 3.4.2.      | Potencial de Generación de Hidrógeno.....                                                              | 72 |
| 3.5.        | Descripción y Selección de Elementos Para el Proceso de Operación de la<br>Planta de Gasificación..... | 74 |
| 3.5.1.      | Selección del Tipo de Biomasa.....                                                                     | 74 |
| 3.5.2.      | Recepción, Almacenamiento y Manejo de la Biomasa .....                                                 | 74 |
| 3.5.2.1.    | Unidad Receptora.....                                                                                  | 75 |

|              |                                                                |     |
|--------------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.2.2.     | Unidad de Cribado .....                                        | 75  |
| 3.5.2.3.     | Unidad de Almacenamiento.....                                  | 76  |
| 3.5.2.4.     | Sistema de Preparación de Biomasa .....                        | 78  |
| 3.5.2.5.     | Sistema de Alimentación e Inyección.....                       | 80  |
| 3.5.2.6.     | Sistema de Transporte.....                                     | 82  |
| 3.5.3.       | Selección del Gasificador .....                                | 82  |
| 3.5.3.1.     | Tipo del Gasificador .....                                     | 82  |
| 3.5.3.2.     | Agente Gasificante.....                                        | 83  |
| 3.6.         | Método de Separación del Hidrógeno.....                        | 83  |
| 3.7.         | Almacenamiento, Transporte y Distribución del Hidrógeno.....   | 85  |
| 3.7.1.       | Almacenamiento del Hidrógeno en la Central.....                | 85  |
| 3.7.2.       | Transporte y Distribución del Hidrógeno desde la Central ..... | 87  |
| 3.8.         | Proceso Productivo Propuesto .....                             | 87  |
| 3.9.         | Diagrama de la Planta de Gasificación .....                    | 88  |
| Capítulo 4:  | Análisis de Costos de la Instalación y de Producción.....      | 91  |
| 4.1.         | Costos del Hidrógeno en la Actualidad .....                    | 91  |
| 4.2.         | Inversión Inicial .....                                        | 92  |
| 4.3.         | Costos Fijos.....                                              | 94  |
| 4.4.         | Costos Variables .....                                         | 94  |
| 4.5.         | Análisis de Sensibilidad.....                                  | 97  |
| CONCLUSIONES | .....                                                          | 102 |
| BIBLIOGRAFÍA | .....                                                          | 106 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|          |                                                                                            |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: | Tabla comparativa de HHV y LHV para distintos combustibles. ....                           | 21 |
| Tabla 2: | Tabla comparativa LHV en términos de densidad energética para distintos combustibles. .... | 22 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3: Principales reacciones producidas durante la gasificación de biomasa.....                                                                                          | 37 |
| Tabla 4: Comparativa entre los agentes gasificadores más utilizados.....                                                                                                    | 40 |
| Tabla 5: Distribución del Volumen de Residuos Madereros ( $\text{m}^3$ / año), por Región y Rango de Producción de RAE (2015).....                                          | 52 |
| Tabla 6: Distribución del Volumen de Residuos Madereros, según rango de producción de Madera Aserrada (2015). ....                                                          | 53 |
| Tabla 7: Tipos de cilindro según su material de construcción.....                                                                                                           | 59 |
| Tabla 8: Porcentaje de participación según tamaño del aserradero. ....                                                                                                      | 65 |
| Tabla 9: Desglose de la cantidad producto generados por la industria del aserrío en Chile para el año 2015.....                                                             | 67 |
| Tabla 10: Distribución de los distintos RAE generados por la industria del aserrío en Chile para el año 2015. ....                                                          | 68 |
| Tabla 11: RAE generados en forma de corteza de árboles por la industria del aserrío en las regiones VII y VIII para el año 2015.....                                        | 69 |
| Tabla 12: Destino de los RAE en forma de corteza de árbol generados en Chile. ....                                                                                          | 70 |
| Tabla 13: Destino de la corteza de árboles para las regiones VII y VIII.....                                                                                                | 70 |
| Tabla 14: Rendimiento de producción de $\text{H}_2$ para la central de gasificación de corteza de árboles.....                                                              | 73 |
| Tabla 15: Temperatura de condensación de distintos compuestos presentes en el gas de síntesis.....                                                                          | 84 |
| Tabla 16: Resumen de las características del sistema de almacenamiento criogénico de la central de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno. .... | 86 |
| Tabla 17: Resumen de los costos inversión inicial para la planta de gasificación de corteza de árboles.....                                                                 | 93 |
| Tabla 18: Tabla resumen de los costos fijos anuales.....                                                                                                                    | 94 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 19: Calculo de consumo energético para los principales elementos de la recepción y tratamiento de la biomasa. .... | 95  |
| Tabla 20: Estimación del costo anual de la energía eléctrica utilizada por la central de gasificación de biomasa. ....   | 96  |
| Tabla 21: Tabla resumen de los costos variables anuales. ....                                                            | 97  |
| Tabla 22: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario pesimista. ....                           | 98  |
| Tabla 23: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario intermedio. ....                          | 99  |
| Tabla 24: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario optimista. ....                           | 100 |

## ÍNDICE DE IMÁGENES

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Imagen 1: Fuente de producción de hidrógeno para su utilización a nivel mundial (consumo energético y no energético). ....         | 15 |
| Imagen 2: Demanda anual de hidrógeno para distintos sectores desde el año 1975. ....                                               | 24 |
| Imagen 3: Capacidad instalada y número de unidades instaladas de celdas estacionarias de combustible en el periodo 2007-2018. .... | 27 |
| Imagen 4: Fuentes de suministro de hidrógeno para refinerías en algunas regiones, año 2018. ....                                   | 31 |
| Imagen 5: Proceso de generación de hidrógeno a partir de reformado de vapor. ....                                                  | 32 |
| Imagen 6: Secuencia de las reacciones dadas durante el proceso de gasificaciones. ....                                             | 38 |
| Imagen 7: Clasificación de los distintos tipos de gasificadores. ....                                                              | 41 |
| Imagen 8: Gasificador de lecho fijo y perfil de temperatura interior. ....                                                         | 42 |
| Imagen 9: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo ascendente. ....                                                         | 43 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Imagen 10: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo descendente.....                                                                             | 44 |
| Imagen 11: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo cruzado.....                                                                                 | 44 |
| Imagen 12: Gasificador de lecho fluidizado y perfil de temperatura interior.....                                                                        | 45 |
| Imagen 13: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado burbujeante.....                                                                                 | 46 |
| Imagen 14: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado circulante.....                                                                                  | 47 |
| Imagen 15: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado dual.....                                                                                        | 48 |
| Imagen 16: Gasificador de flujo arrastrado y perfil de temperatura interior. ....                                                                       | 49 |
| Imagen 17: Proceso de producción de los aserraderos.. ....                                                                                              | 50 |
| Imagen 18: Clasificación general de los aserraderos.....                                                                                                | 50 |
| Imagen 19: Distribución del volumen de residuos madereros según tipo. ....                                                                              | 54 |
| Imagen 20: Distribución de aserraderos en la región del Biobío.....                                                                                     | 63 |
| Imagen 21: Distribución de la Producción de Madera Aserrada según Especie y Tamaño del Aserradero.....                                                  | 65 |
| Imagen 22: Porcentaje de madera aserrada en Chile según tamaño del aserradero entre los años 2006-2015. ....                                            | 66 |
| Imagen 23: Evolución del precio promedio de subproductos de la industria del aserrío de Pino radiata (en pesos de diciembre 2015 / metro estéreo). .... | 66 |
| Imagen 24: Análisis elemental para de la madera del pino radiata.....                                                                                   | 67 |
| Imagen 25: Diagrama de los sistemas de recepción, almacenamiento y manejo de la biomasa. ....                                                           | 75 |
| Imagen 26: Diagrama del silo para almacenamiento de biomasa.....                                                                                        | 76 |
| Imagen 27: Descarga de biomasa en la base del silo.....                                                                                                 | 77 |
| Imagen 28: Vista de molino de martillos (Hammermill) típico.....                                                                                        | 79 |
| Imagen 29: Diagrama del sistema de secado de biomasa. ....                                                                                              | 80 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Imagen 30: Sistema de alimentación de biomasa. ....                                                         | 81  |
| Imagen 31: Proceso productivo de la planta de generación de hidrógeno propuesta. ....                       | 88  |
| Imagen 32: Diagrama de la planta de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno..... | 90  |
| Imagen 33: Grafico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario pesimista. ....             | 99  |
| Imagen 34: Grafico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario intermedio. ....            | 100 |
| Imagen 35: Grafico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario optimista.....              | 101 |

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como propósito evaluar técnica y económicamente, a través de criterios cualitativos y cuantitativos la factibilidad de instalar una planta de producción de hidrógeno a partir de la gasificación de corteza de árboles en la zona sur de Chile. El objetivo de la planta es utilizar los residuos madereros en forma de corteza como combustible en un gasificador para obtener un gas de síntesis, del cual se extraerá el hidrógeno para su posterior comercialización.

Se examinó el mercado de la industria maderera en Chile con el objetivo de cuantificar la cantidad de corteza por tipo de especies en cada región, que fuesen aprovechables para la alimentación del proyecto. Se seleccionó para su uso en la planta la corteza del pino radiata, debido a que esta es la especie más comercializada en la región. Los principales criterios considerados para la evaluación de la corteza a utilizar fueron su composición elemental, contenido de humedad, poder calorífico inferior y superior.

Los equipos necesarios para la operación de la planta de gasificación fueron seleccionados en base a sus características técnicas, y las ventajas que demuestran para su aplicación en proyectos de manejo de biomasa proveniente de árboles. La planta evaluada en este proyecto posee una capacidad de producción de entre 104.268 y 118.170 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno al día. La planta estará ubicada entre la VII y VIII región, en los alrededores de las ciudades de Concepción, Coronel o Chillan, zonas que concentran la mayor cantidad de aserraderos de la región.

En cuanto a la evaluación económica del proyecto se analizaron tres escenarios de producción, con costos de ventas del hidrógeno puro a gran escala que oscilaban entre los 3,50 USD \$/kg y los 6,00 USD \$/kg. Se pudo concluir, que la implementación de una planta de gasificación de corteza de árboles en el sur de Chile es una alternativa factible, desde el punto de vista técnico y económico, considerando un precio de venta del kg de hidrógeno a un valor rondando los USD \$4.00, para grandes volúmenes.

Palabras claves: corteza de árboles, gasificador, gas de síntesis, hidrógeno.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project is to evaluate technically and economically, through qualitative and quantitative criteria, the feasibility of installing a hydrogen production plant from the gasification of bark in the southern zone of Chile. The objective of the plant is to use wood residues in the form of bark as fuel in a gasifier to obtain a syngas, from which the hydrogen will be extracted for its subsequent commercialization.

The timber industry market in Chile was examined with the objective of quantifying the amount of bark by type of species in each region, which could be used to feed the project. The bark of *pinus radiata* was selected to feed the plant, since this is the most commercialized species in the region. The main criteria considered for the evaluation of the bark to be used were its ultimate analysis, moisture content, higher and lower heating value.

The equipment necessary for the operation of the gasification plant was selected based on its technical characteristics, and the advantages it demonstrates for its application in biomass from trees projects. The plant evaluated in this project has a production capacity of between 104.268 and 118.170 Nm<sup>3</sup> of hydrogen per day. The plant will be located between the VII and VIII regions, in the surroundings of the cities of Concepción, Coronel or Chillán, areas that concentrate the largest number of sawmills in the region.

Regarding the economic evaluation of the project, three production scenarios were analyzed, with large-scale costs of sales of pure hydrogen that varies from 3,50 USD \$/kg to 6,00 USD \$/kg. It could be concluded that the implementation of a tree bark gasification plant in southern Chile is a feasible alternative, from a technical and economic point of view, considering a sale price of kg of hydrogen at a value of around USD \$ 4.00, for large-scale volumes.

Keywords: wood bark, gasifier, syngas, hydrogen.

## **Capítulo 1: Introducción**

Según datos del Balance Nacional de Energía de Chile (CNE, 2017)<sup>1</sup> aproximadamente un 42% de la energía primaria producida en el país corresponde a biomasa. De la oferta total de energía, la biomasa corresponde a un 20% del total. En cuanto al consumo energético, un 13%, principalmente en sector industrial y residencial, corresponde al uso de biomasa.

La biomasa en forma de leña sigue siendo parte del estilo de vida del sur de Chile (Ministerio de Energía, 2015), desde la región del Biobío hasta la región de Aysen, para su quema directa con el propósito de cocinar, brindar calefacción en residencias y generar vapor utilizado en procesos dentro de la industria del papel y celulosa.

La utilización directa de leña para generación de energía térmica, principalmente en el sur de Chile, ha traído consigo grandes consecuencias medioambientales puesto que en la mayoría de los casos se utiliza leña con un alto contenido de humedad, lo que genera una baja considerable en la eficiencia de los sistemas y un aumento en las emisiones de material particulado. Adicionalmente, gran cantidad de esta leña proviene de bosques sin planes de manejo, lo que ha provocado una progresiva degradación de los bosques nativos.

En la actualidad, se están realizando grandes esfuerzos en Chile por mejorar la calidad del aire, principalmente en las ciudades más afectadas; y a nivel mundial, por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la quema de combustibles fósiles para suplir la demanda energética de los sectores transporte, residencial e industrial.

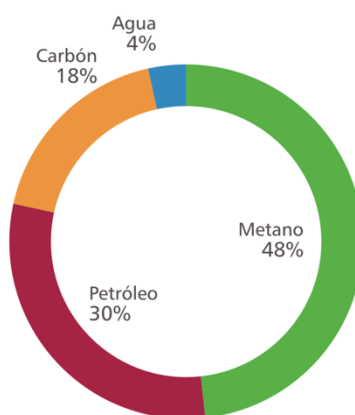
Como una solución para reducir estas emisiones, se ha propuesto el uso de distintas aplicaciones del hidrógeno como fuente de energía. El hidrógeno es un combustible, que se puede producir a partir de diversos procesos y recursos. Los principales procesos utilizados para la producción de hidrógeno son termoquímicos, electrolíticos y biológicos (Ministerio de Energía, 2018). Este tiene como principales características un alto poder calorífico por kilogramo y es considerado un combustible limpio, esto debido

---

<sup>1</sup> CNE: Comisión Nacional de Energía de Chile

que al ser consumido en una celda de combustible el único desecho que esta emite es agua.

Sin embargo, en la actualidad la mayor parte de la producción de hidrógeno tanto en Chile como a nivel mundial proviene de procesos que emiten una gran cantidad de GEI<sup>2</sup>, por lo cual no se podría considerar al hidrógeno como un combustible que ayudaría a reducir dichas emisiones.



*Imagen 1: Fuente de producción de hidrógeno para su utilización a nivel mundial (consumo energético y no energético). Fuente: (IEA, 2013)*

Se considera necesaria la realización de este estudio, puesto que la mayoría de las ciudades en las cuales se utiliza biomasa y leña como fuente energética poseen gran cantidad de este insumo. Por medio de un proceso de gasificación y posterior separación del gas de síntesis de los residuos de esta industria, se podrían generar cantidades considerables de hidrógeno, a partir de fuentes renovables. Este hidrógeno pudiese ser comercializados con el propósito de abastecer la demanda local o ser exportado.

Según datos del Anuario Forestal del año 2018, el consumo de madera en trozos en la industria forestal primaria <sup>3</sup>llegó en el 2017 a 45,8 millones de metros cúbicos sólidos sin corteza (m<sup>3</sup>ssc), un 2,7% más que en el año 2016. La mayor industria consumidora de madera es la de pulpa, con una participación del 37,7% del consumo total, le sigue de

<sup>2</sup> GEI: Gases de Efecto Invernadero

<sup>3</sup> La industria forestal primaria realiza el primer proceso a la madera como materia prima proveniente directamente del bosque

cerca la industria del aserrío con el 35,1% de participación, y luego la industria de astillas con el 16,5% y la de tableros y chapas con el 9,7%. Por especies, el 67,0% del consumo de madera en trozos para uso industrial corresponde a pino radiata, en tanto que *Eucalyptus nitens* participa con el 17,3% y *Eucalyptus globulus* con el 14,3%, dejando el restante 1,4% a otras especies (Ministerio de Agricultura, 2018).

De los procesos industriales en la industria maderera se obtienen como residuos la corteza (capa externa de la madera), lampazo (secciones laterales de la troza), aserrín (partículas de tamaño pequeño), viruta (cintas delgadas), y despunte (residuos de diverso tamaño provenientes del dimensionado) (Paneque, et al., 2011).

Según datos del informe de la Industria Forestal Primaria (periodo 2006-2015) (Gysling & Soto, 2016), para el año 2015 se obtuvo un volumen de residuos madereros en forma de corteza de árbol 1.319.154 m<sup>3</sup>, únicamente producto de la industria del aserrío. La corteza de árbol fue principalmente utilizada para su comercialización, autoconsumo, acumulación y ser regalada.

Actualmente solamente dos empresas, Linde Gas Chile S.A e Hidrógenos Biobío, tienen plantas de producción de hidrógeno. La producción de hidrógeno comercial en Chile se basa en la tecnología de reformación de gas metano con vapor (Ministerio de Energía, 2018).

Es importante mencionar que, a pesar de existir una normativa específica que dicta el manejo y uso de gases industriales, no hay una que trate exclusivamente sobre la utilización del hidrógeno.

Este estudio se centra en realizar una evaluación del estado de la producción y consumo de hidrógeno en Chile. Además, en evaluar las características de implementación de una planta de gasificación de corteza de árboles entre las regiones del Biobío y Aysén, considerando aspectos como la cadena de suministros, tipo de corteza a utilizar, tipos de gasificadores a implementar, métodos de separación del gas de síntesis, sistemas de almacenamiento, presurización y costo de producción del hidrógeno.

### **1.1. Objetivo General**

El objetivo general de la presente investigación es evaluar la factibilidad de instalar una planta de producción de hidrógeno a partir de gasificación de corteza de árboles en la zona sur de Chile.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica a fin de identificar las especies de árbol a utilizar.
- Evaluar distintos tipos de gasificadores y agentes de gasificación a utilizar.
- Calcular el potencial de generación de hidrógeno a partir de una instalación de gasificación.
- Estimar el tamaño y ubicación de la planta en función de la disponibilidad del recurso.
- Evaluar los métodos para lograr la separación del hidrógeno del gas de síntesis.
- Describir la tecnología de almacenamiento de hidrógeno.
- Realizar una estimación de costos para la instalación.
- Evaluar el costo por unidad de producción y almacenamiento de hidrógeno.

### **1.3. Metodología**

La metodología de investigación que se utilizará en el desarrollo de este estudio será la de proyecto factible. La metodología de proyecto factible consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo que sea viable para la solución de un problema o necesidad (UPEL, 1998).

En el sentido estricto de esta investigación, se buscará formular y verificar la factibilidad de emplear la tecnología de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno en Chile. Con el propósito de verificar la factibilidad de dicha instalación, se abordará el estudio de las fuentes de información para argumentar conceptualmente la factibilidad de aplicación de dicha tecnología en la región sur del país.

### 1.3.1. Diagnostico

Para efectuar el diagnóstico de la situación actual se harán revisiones bibliográficas a fin de poder entender la disponibilidad del recurso (corteza) y poder realizar su caracterización, a fin de entender su composición elemental. Posteriormente, se harán revisiones bibliográficas para entender los principios de operación y parámetros de diseño de los distintos métodos para realizar la gasificación de biomasa, separación del hidrógeno del gas de síntesis, almacenamiento por compresión o tecnologías criogénicas y su distribución.

### 1.3.2. Estudio de Factibilidad

Para establecer la factibilidad o no del proyecto se recurre al análisis de ciertos criterios cuantitativos y cualitativos. Los criterios cuantitativos corresponden a atributos que describen la realidad manera objetiva. Por otra parte, los criterios cualitativos son aquellos relacionados a una opinión subjetivo.

Los criterios cuantitativos seleccionados para estudiar la factibilidad del proyecto están:

- Disponibilidad de la corteza de árbol en Chile.
- Características físicas y químicas de la corteza de árbol.
- Humedad de la corteza de árbol.
- Costo del recurso combustible.
- Costo de la tecnología de gasificación.

Los criterios cualitativos seleccionados para estudiar la factibilidad del proyecto están:

- Condiciones de almacenamiento y tratamiento para la corteza de árboles.
- Estado actual del desarrollo tecnológico de la gasificación de biomasa.
- Procesos productivos.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1. ¿Que es el hidrógeno?

#### 2.1.1. Estructura Atómica

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, y se caracteriza por ser el más simple de todos. Un átomo de hidrógeno puede observarse como un núcleo central denso con un solo electrón en órbita.

En la mayor parte de los átomos de hidrógeno, el núcleo consiste en un solo protón; sin embargo, existen formas menos comunes del hidrógeno denominadas isotopos<sup>4</sup>, que contienen tanto un protón como un neutrón o dos neutrones y un protón. La primera forma de hidrógeno se llama deuterio y la segunda tritio.

La disposición atómica del hidrógeno, que consiste en un solo electrón orbitando alrededor de un núcleo es altamente reactiva. Por esta razón, los átomos de hidrógeno tienden a combinarse de manera natural en pares moleculares (molécula diatómica), es decir en H<sub>2</sub> en lugar de H.

Cada protón en una molécula diatómica de hidrógeno tiene un campo asociado que se puede visualizar y describir matemáticamente como un “spin”. Las moléculas en las que ambos electrones tienen el mismo giro se conocen como moléculas “orto”. Las moléculas en las que los protones tienen espines opuestos se conocen como moléculas “para”. Más del 75% del hidrógeno existente, a temperatura ambiente, corresponden a moléculas “orto”.

La diferencia entre moléculas “orto” y “para” es importante cuando el hidrógeno se maneja a temperaturas muy bajas, ya que la molécula de hidrógeno “orto” se vuelve inestable, cambiando el giro hacia la molécula de hidrógeno “para”, su forma más estable. Este proceso se caracteriza por liberar calor, lo que complica los procesos industriales a los cuales se somete el hidrógeno.

---

<sup>4</sup> Isotopo: Átomo que pertenece al mismo elemento químico que otro, tiene su mismo número atómico, pero distinta masa atómica.

### 2.1.2. Propiedades Físicas

El hidrógeno puro tiene como principales características ser inodoro, incoloro, insípido y no tóxico para el ser humano. Sin embargo, el hidrógeno puede causar asfixia, al desplazar el oxígeno en una mezcla de aire.

Las moléculas de hidrógeno gaseoso son más pequeñas que todos los demás gases, y pueden difundirse a través de materiales considerados herméticos a otros gases, esta propiedad hace que el hidrógeno sea más difícil de contener en envases o transportar en tuberías.

El hidrógeno es el elemento que tiene el segundo punto de ebullición y de fusión más bajos de todas las sustancias, solo es superado por el helio. El hidrógeno se puede encontrar en fase líquida por debajo de 20 K ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y en fase sólida por debajo de su punto de fusión de 14 K ( $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a presión atmosférica. Cuando se trabaja con hidrógeno, generalmente se habla de temperaturas criogénicas, estas son temperaturas inferiores a 200 K ( $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

El punto de ebullición del hidrógeno solo puede aumentarse a un máximo de 33 K ( $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) presurizado a 13 bar. El hidrógeno, al ser utilizado como combustible para vehículos, se puede almacenar en forma gaseosa a alta presión o como líquido criogénico.

La densidad del hidrógeno a presión atmosférica y 293 K ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) es de  $0.08376\text{ kg/m}^3$  en forma gaseosa, y en forma líquida a presión atmosférica es de  $70.8\text{ kg/m}^3$ .

### 2.1.3. Capacidad Energética

#### 2.1.3.1. Poder Calorífico

El hidrógeno es un portador de energía que se puede utilizar para almacenar, mover y entregar energía producida por otras fuentes.

Los combustibles se caracterizan por liberar una cantidad fija de energía cuando reacciona completamente con oxígeno para formar agua. Este contenido de energía se

mide experimentalmente y se cuantifica mediante el poder calorífico superior (HHV) y el poder calorífico inferior (LHV) (véase Tabla 1).

El hidrógeno tiene mayor densidad energética que cualquier otro combustible, ya que el hidrógeno es el elemento más ligero y no tiene átomos de carbono pesados. El poder calorífico superior (HHV) del hidrógeno es de 141.80 MJ/kg y el poder calorífico inferior (LHV) es de 119.96 MJ/kg.

Según (Zittel, Werner, & Wurster, Advantages and Disadvantages of Hydrogen, 1996), el hidrógeno posee una densidad energética por peso de aproximadamente 33 kWh/kg (120 MJ/kg) y una densidad energética por unidad de volumen de 0.75 kWh/l al ser almacenado como gas a 30 MPa y de 2.36 kWh/l al almacenarse en estado líquido a -253 °C.

*Tabla 1: Tabla comparativa de HHV y LHV para distintos combustibles.*

| Combustible       | HHV (MJ/kg) | LHV (MJ/kg) |
|-------------------|-------------|-------------|
| Hidrógeno         | 141,80      | 119,96      |
| Metano            | 55,50       | 50,00       |
| Keroseno          | 46,20       | 43,00       |
| Diesel            | 44,80       | 43,40       |
| Propano           | 50,35       | 46,35       |
| Biomasa (madera)  | 21,20       | 17,00       |
| Carbón Bituminoso | 30,20       | 29,00       |

Fuente: Elaboración Propia.

### 2.1.3.2. Densidad Energética

La densidad de energía de un combustible consiste en la cantidad de energía disponible para un volumen dado de combustible. Por lo tanto, la densidad de energía es el producto del contenido de energía (HHV o LHV) y la densidad de dicho combustible.

La densidad de energética del hidrógeno se caracteriza por ser baja, dado que al estar formado en una molécula muy ligera su densidad es muy baja; sin embargo, su relación de energía a peso (como se pudo observar en el punto anterior) es la mejor de todos los combustibles (véase Tabla 2).

La densidad energética de un combustible se ve alterada por la forma en la cual se almacena el combustible, es decir, si se encuentra en fase líquida o gaseosa, y si se almacena en forma gaseosa influye de manera importante la presión a la cual se almacena. Generalmente los combustibles almacenados en forma líquida poden una densidad energética por volumen mayor que los almacenados de forma gaseosa.

*Tabla 2: Tabla comparativa LHV en términos de densidad energética para distintos combustibles.*

| Combustible | LHV (MJ/m <sup>3</sup> ) | Condición          |
|-------------|--------------------------|--------------------|
| Hidrógeno   | 10                       | Gas @1 atm, 15 °C  |
| Hidrógeno   | 1.825                    | Gas @200bar, 15 °C |
| Hidrógeno   | 4.500                    | Gas @690bar, 15 °C |
| Hidrógeno   | 8.491                    | Líquido            |
| Metano      | 6.860                    | Gas @200bar, 15 °C |
| Metano      | 20.920                   | Líquido            |
| Diesel      | 31.435                   | Líquido            |

|          |        |         |
|----------|--------|---------|
| Gasolina | 31.150 | Líquido |
|----------|--------|---------|

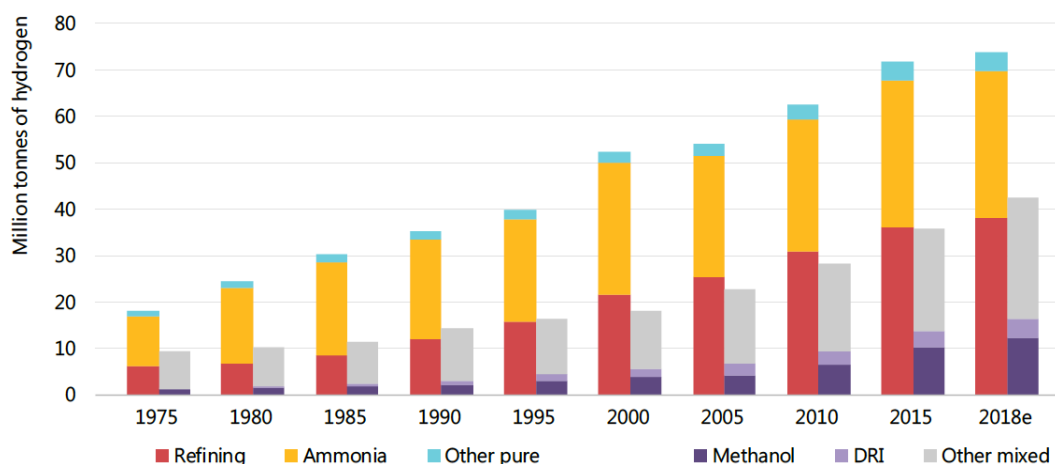
Fuente: Elaboración Propia.

## 2.2. Usos del Hidrógeno en la Actualidad

La demanda actual de hidrógeno puro es de alrededor de 70 millones de toneladas por año (Mt H<sub>2</sub> al año) (IEA, 2019) (véase Imagen 2). El principal uso de hidrógeno en la actualidad está orientado hacia las aplicaciones industriales. Los cuatro principales usos del hidrógeno en la actualidad (tanto en forma pura como mixta) son: refinación de petróleo 33%, producción de amoníaco 27%, producción de metanol 11% y producción de acero mediante la reducción directa del mineral de hierro 3%. Prácticamente todo este hidrógeno se suministra utilizando combustibles fósiles (IEA, 2019).

El hidrógeno promete ser, a largo plazo y en diversos sectores, una importante alternativa como combustible más allá de las aplicaciones industriales existentes. Los sectores de transporte, edificaciones y generación de energía tienen potencial para usar hidrógeno si los costos de producción y utilización se desarrollan favorablemente en relación con otras opciones de combustibles actualmente utilizados.

El aumento en la demanda de hidrógeno en el futuro dependerá principalmente de la evolución de la demanda de productos fabricados a partir de él, particularmente combustibles refinados para el transporte, fertilizantes para la producción de alimentos y materiales de construcción.



*Imagen 2: Demanda anual de hidrógeno para distintos sectores desde el año 1975.*

*Fuente: (IEA, 2019).*

### 2.2.1. Refinación de Petróleo

Refinar el petróleo crudo para convertirlo en productos listo para su consumo, como los combustibles utilizados en el sector de transporte y en materia prima para otros procesos, es uno de los mayores usuarios de hidrógeno en la actualidad. Alrededor de 38 Mt H<sub>2</sub> al año, o el 33% de la demanda global total de hidrógeno (tanto en forma pura como mixta), es consumida por refinerías como materia prima, reactivo y fuente de energía (IEA, 2019). Alrededor del 66% de este hidrógeno se produce en instalaciones dedicadas dentro de las mismas refinerías. El uso de hidrógeno en procesos de refinación es responsable de aproximadamente el 20% de las emisiones totales de la refinería, y produce alrededor de 230 Mt CO<sub>2</sub> al año (IEA, 2019).

El hidrotratamiento y el hidrocrackeo son los principales procesos que consumen hidrógeno en la refinería.

El hidrotratamiento se usa para eliminar impurezas, como el azufre principalmente. El hidrógeno es utilizado para el hidrotratamiento, tanto de combustibles fósiles como de biocombustibles.

El hidrocrackeo es un proceso que utiliza hidrógeno para mejorar los productos residuales pesados de la industria petrolera en productos petroleros de mayor valor. La

demanda de productos destilados ligeros y medios está creciendo y la demanda de productos pesados el petróleo residual está disminuyendo, lo que lleva a un aumento en el uso de hidrocrackeo.

En la actualidad, la demanda de hidrógeno para la industria petrolera se ha incrementado debido a que la demanda de los productos de dicha industria ha aumentado. Adicionalmente, conforme los requerimientos de nivel de azufre en los productos de dicha industria disminuyan menor será la demanda de hidrógeno.

### 2.2.2. Industria Química

El sector químico representa aproximadamente un 40% de la demanda total de hidrógeno, siendo el origen de la segunda y tercera fuente de demanda de hidrógeno en la actualidad: síntesis de amoníaco a 31 Mt H<sub>2</sub> al año y metanol a 12 Mt H<sub>2</sub> al año. Adicionalmente, se consumen aproximadamente otros 2 Mt H<sub>2</sub> al año en procesos que están orientados a la producción de peróxido de hidrógeno y ciclohexano.

El amoníaco es utilizado principalmente en la industria agrícola para la producción de fertilizantes y urea. El metanol es utilizado en procesos industriales para la producción de formaldehído y solventes.

### 2.2.3. Producción de Acero

El método de producción de acero a partir del mineral de hierro DRI (Direct Reduced Iron) constituye la cuarta mayor fuente de demanda de hidrógeno en la actualidad, aproximadamente 4 Mt H<sub>2</sub> al año, o alrededor del 3% del hidrógeno.

Las dos principales vías para producir acero son BF-BOF (blast furnace-basic oxygen furnace) con un 90% de la producción global de acero, y DRI-EAF (direct reduction of iron-electric arc furnace) con aproximadamente un 7% de la producción global de acero.

Aunque ambos métodos utilizan hidrógeno durante el proceso de manufactura, en el proceso BF-BOF el hidrógeno utilizado es un subproducto de la utilización de carbón; mientras que en el método DRI-EAF, el hidrógeno es generado por fabricantes especializados.

#### 2.2.4. Transporte

En la actualidad se considera el hidrógeno como una posible alternativa de combustible con bajas emisiones de GEI para el sector transporte, en comparación a los productos de petróleo refinado y gas natural.

El transporte por carretera es el que ha tenido hasta el momento el mayor potencial en cuanto a la utilización de hidrógeno como combustible, principalmente a través de los FCEV<sup>5</sup> livianos (vehículos ligeros). Los vehículos basados en la tecnología de celdas de combustible (FCEV) utilizan celdas con potencias entre 80 y 120 kW, con una eficiencia del “tanque a la rueda” de 43 a 60 %, con costos entre los 60.000 y 100.000 USD (Ministerio de Energía, 2018).

Los principales fabricantes de automóviles de tipo FCEV en la actualidad son Toyota y Hyundai. Dentro de sus proyecciones esta incrementar el número de unidades producidas de 3.000 anuales hoy en día a 30.000 anuales después del año 2020 para Toyota; y Hyundai es aún más ambicioso, espera aumentar el número de unidades producidas de 3.000 anuales hoy en día a 700.000 para el año 2030.

Los FCEV también se han implementado en otras aplicaciones, como máquinas elevadoras, autobuses, trenes y camiones.

En cuanto al transporte marítimo y aeronáutico, el uso del hidrógeno como una alternativa de combustible es escaso, y diversas aplicaciones en estos sectores se encuentran bajo investigación y desarrollo.

#### 2.2.5. Generación de Energía

El hidrógeno cubre hoy en día apenas el 0.2% de la generación de electricidad a nivel mundial. Su uso para aplicaciones de generación de energía eléctrica está relacionado principalmente con el uso de gases ricos en hidrógeno producto de la industria del acero, plantas petroquímicas y refinerías.

---

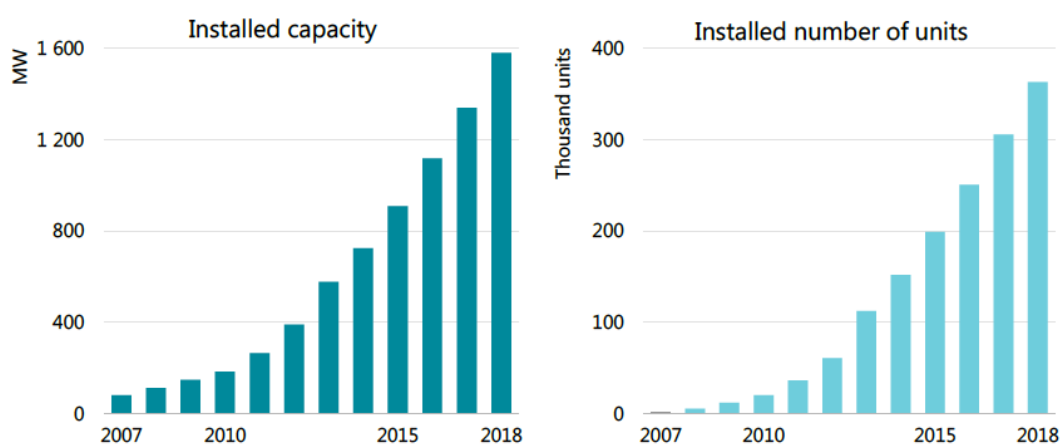
<sup>5</sup> FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle): Vehículos eléctricos alimentados a partir de celdas de combustibles de hidrógeno.

En los próximos años, debido a los esfuerzos realizados en algunos países, como Japón, han establecido objetivos explícitos para el uso de hidrógeno o combustibles a base de hidrógeno en el sector eléctrico. En Japón se están llevando a cabo proyectos de investigación y desarrollo para introducir hidrógeno y amoníaco como combustible para turbinas de gas y plantas de carbón ya existentes.

Los principales roles del hidrógeno dentro del campo de la generación de energía eléctrica son:

- Facilitar la integración de energías renovables variables.
- Quemado conjunto de carbón con amoníaco.
- Generación de potencia en sistemas off-grid (redes aisladas).
- Generación de potencia de respaldo mediante celdas de combustible.
- Almacenamiento de energía a largo plazo y gran escala.

La capacidad global instalada de celdas de combustible estacionarias ha crecido rápidamente en los últimos años, llegando a casi 1.600 MW en año 2018, mientras que el número de unidades de celdas de combustible instaladas a nivel mundial es de alrededor de 363 000 (IEA, 2019) (véase Imagen 3).



*Imagen 3: Capacidad instalada y número de unidades instaladas de celdas estacionarias de combustible en el periodo 2007-2018. Fuente: (IEA, 2019)*

### 2.2.6. Edificación

El sector de la edificación representa el 30% del uso final de energía global, de los cuales aproximadamente tres cuartos se utilizan para calefacción, producción de agua caliente y cocina.

Los potenciales roles del hidrógeno dentro del sector de la edificación son:

- Mezcla de hidrógeno en las redes de gas natural existentes, con el propósito de reducir las emisiones de GEI producto de la quema del mismo.
- Producción de metano a partir de hidrógeno limpio.
- Uso directo hidrógeno para la producción de calor en edificios.
- El hidrógeno también podría usarse indirectamente para calentar o enfriar las redes de energía distrital que abastecen un grupo de edificios.
- Uso en celdas de combustible o sistemas de cogeneración.

## 2.3. Panorama del Hidrógeno en Chile

### 2.3.1. Usos del hidrógeno en Chile

Diversas industrias utilizan hidrógeno dentro de sus procesos, entre las principales aplicaciones a las cuales se ha destinado el uso del hidrógeno en las industrias chilenas están:

- Refinerías: la mayor parte de la demanda del hidrógeno en Chile corresponde a este sector, y se destina principalmente al hidrotratamiento, hidrocracking y desulfuración de los combustibles.
- Industria Alimentaria: es utilizado en la industria de la producción de margarina y de aceites, mediante el proceso de hidrogenación de grasas.
- Producción de Vidrio: se utiliza para realizar el pulido superficial de artículos de vidrio y el requemado de bordes tras el proceso de conformado<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Conformado de materiales: procedimientos que permiten una deformación plástica de metales y aleaciones metálicas mediante presión, y puede darse en combinación con altas temperaturas.

- Generación de Energía Eléctrica: se utiliza como refrigerante de turbogeneradores.
- Tratamientos Térmicos: es utilizado en procesos de recocido, soldaduras, creación de atmosferas para prevenir la oxidación y creación de atmosferas inertes.

A pesar que diversas industrias demandan hidrógeno para la realización de sus procesos, los usos que se le da son distintos a los sectores que demandan la mayor cantidad de hidrógeno a nivel global.

### 2.3.2. Producción del Hidrógeno en Chile

Son aproximadamente seis las empresas que se dedican a la producción y venta de gases industriales. Actualmente, en Chile solamente dos empresas, Linde Gas Chile S.A e Hidrógenos Biobío, tienen plantas de producción de hidrógeno (Ministerio de Energía, 2018). La producción de hidrógeno comercial en Chile se basa en la tecnología de reformación de gas metano con vapor (Ministerio de Energía, 2018).

Las dos plantas de producción de hidrógeno que existen actualmente en Chile son:

- Linde Gas Chile S.A: esta planta ubicada en Concón entró en operación en el año 2006 a un costo aproximado 70 millones de dólares, y se sustentó su construcción en un contrato otorgado por ENAP para el suministro de hidrógeno con el propósito de reducir el contenido de azufre del diésel producido en la refinería Aconcagua. La tecnología utilizada para la producción de hidrógeno es reformado de gas metano. La capacidad de producción es de 4.200 kg/h de hidrógeno (46.700 Nm<sup>3</sup>/h) a 21 bar y 30 °C, para suplir la demanda de hidrógeno de ENAP de 3.000 kg/h (36.000 Nm<sup>3</sup>/h),
- Hidrógenos Biobío: esta planta ubicada en Hualpen entró en operación en el año 2005 a un costo aproximado 32 millones de dólares, y se sustentó su construcción en un contrato por 15 años otorgado por ENAP para el suministro de hidrógeno. La tecnología utilizada para la producción de hidrógeno es reformado de gas metano con vapor de agua.

### 2.3.3. Normativas Vigentes

En Chile no existen en la actualidad normas específicas en cuanto a la producción, uso y manejo del hidrógeno, pero sí para el manejo de gases industriales. Estas normativas para el manejo de gases industriales, en conjunto con normas internacionales, son las que se han utilizado para normar todo lo referente a los usos de hidrógeno en Chile.

Las principales normativas para manejo de gases industriales, aplicadas al sector del hidrógeno son:

- NCh1377.Of1990 Gases comprimidos - Cilindros de gas para uso industrial – Marcas para identificación del contenido y de los riesgos inherentes.
- NCh1025.Of1990 Gases comprimidos - Cilindros de gas para uso médico y para esterilización - Marcas de identificación del contenido y de los riesgos inherentes.
- DS N°280, de 2009, del Ministerio de Economía, Reglamento de Seguridad del Transporte y Distribución de Gas de Red.

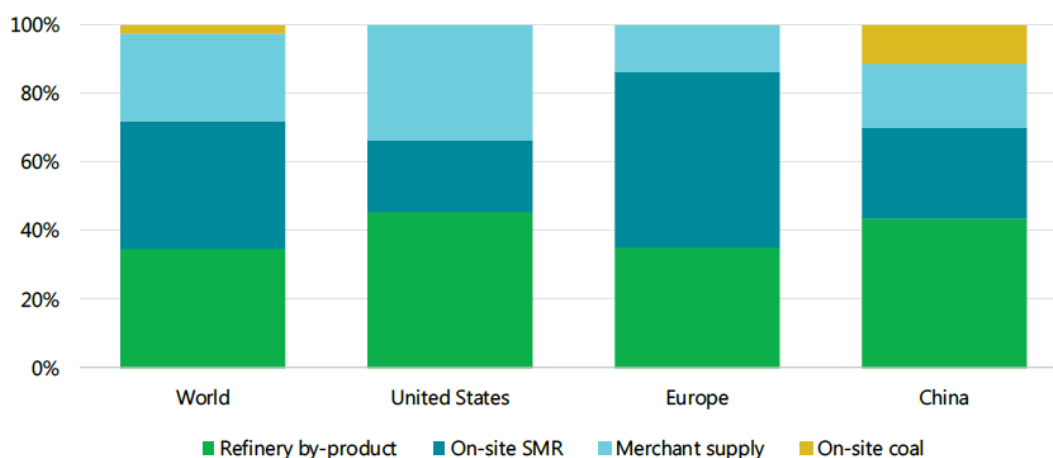
### 2.4. Métodos de Producción de Hidrógeno

Es importante mencionar que la producción de hidrógeno en la actualidad se realiza a partir de diversas fuentes, como lo son los combustibles fósiles, división de la molécula de agua, productos y residuos de la biomasa, procesos biológicos y recuperación a través de gases de desechos.

Casi el 50% del hidrógeno producido a nivel mundial se deriva del gas natural (véase Imagen 4), principalmente a través del reformado de metano con vapor, el hidrógeno restante se produce a partir del petróleo 30%, a partir del carbón 19% y el 4% restante a través de electrólisis del agua (Kayfeci, Kecebaş, & Bayat, 2019).

Actualmente el hidrógeno se produce casi en su totalidad a partir de combustibles fósiles, considerando un 6% del gas natural global y un 2% del carbón global destinado a la producción de hidrógeno. Como consecuencia de esto, la producción de hidrógeno es responsable de gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Como se puede observar en el siguiente gráfico, la demanda de hidrógeno a nivel global es suplida en similares proporciones por subproductos de la industria y por reformado de metano. En China, existe aún una importante producción de hidrógeno a partir de la gasificación de carbón.



*Imagen 4: Fuentes de suministro de hidrógeno para refinerías en algunas regiones, año 2018. Fuente: (IEA, 2019).*

#### 2.4.1. Producción a Partir de Combustibles Fósiles

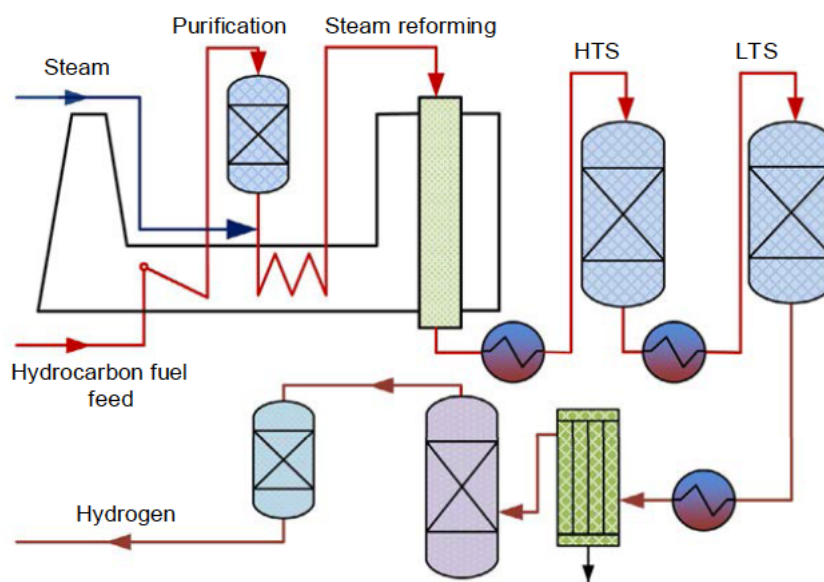
En los procesos de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, hidrocarburos, vapor, aire u oxígeno se calientan y luego se combinan en un reactor. El hidrógeno se recupera tanto del agua como de los hidrocarburos al descomponerse las moléculas, principalmente en,  $H_2$ , el CO y el  $CO_2$ . Otro método es la descomposición de los hidrocarburos en hidrógeno y carbono al agregarse calor en ausencia de vapor o aire.

##### 2.4.1.1. Reformado de Vapor

El método más utilizado en la producción de hidrógeno en la actualidad es el proceso de reformado con vapor. El proceso consiste en obtener hidrógeno y monóxido de carbono (CO) haciendo reaccionar el vapor y los hidrocarburos en presencia de un catalizador a altas temperaturas. Los hidrocarburos más utilizados en la producción de hidrógeno a

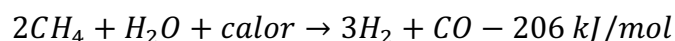
partir de reformado de vapor son gas natural ( $\text{CH}_4$ ), GLP ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), gasolina ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) y etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

El proceso de generación de hidrógeno a partir del reformado de vapor se observa en la Imagen 5: más adelante. En primer lugar, el combustible pasa por una etapa de purificación, posteriormente se ingresa al reformador y se hace reaccionar con vapor de agua, producto de esta reacción se genera hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Posteriormente, el monóxido de carbono se hace pasar a través de un reactor WGSR, generalmente de dos etapas. Una de alta temperatura (HTS) y otra de baja temperatura (LTS). En el reactor WGSR se hace reaccionar el  $\text{CO}$  en presencia de catalizadores junto con vapor de agua para generar como productos hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Finalmente, el gas producido se condensa para separar el dióxido de carbono del hidrógeno.

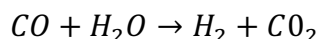


*Imagen 5: Proceso de generación de hidrógeno a partir de reformado de vapor. Fuente: (Kayfeci, Kecebaş, & Bayat, 2019)*

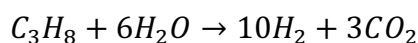
Las reacciones que rigen el proceso de reformado de vapor, según el tipo de combustible utilizado son:



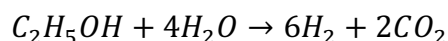
*Ecuación 1: Reacción química que describe el proceso de gasificación del GN.*



*Ecuación 2: Reacción química que describe el proceso de un WGSR.*



*Ecuación 3: Reacción química que describe el proceso de gasificación del GLP.*

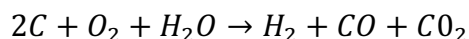


*Ecuación 4: Reacción química que describe el proceso de gasificación del etanol.*

#### 2.4.1.2. Gasificación de Carbón

La gasificación de carbón es el método de producción de hidrógeno comercial más antiguo. El gas producido en plantas de gasificación de carbón contiene aproximadamente 60% de hidrógeno y grandes cantidades de CO. En la actualidad, el 18% de la producción de hidrógeno a nivel mundial se obtiene mediante este proceso. Este método es poco utilizado debido a que se requieren altas temperaturas y genera gran cantidad de GEI. La gasificación de carbón es una tecnología probada y madura.

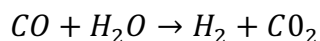
El proceso consiste en calentar el carbón hasta temperaturas cercanas a los 900 °C para transformarlo a estado gaseoso, luego se hace reaccionar con vapor y el oxígeno, y hace pasar a través de un catalizador para mejorar la reacción.



*Ecuación 5: Reacción química que describe el proceso de gasificación del carbón.*

La gasificación de carbón generalmente ocurre en recipientes de alta temperatura y presión, donde el oxígeno y el vapor se ponen en contacto directo con el carbón. Esto provoca una serie de reacciones químicas que convierten el combustible en un gas de síntesis compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) y residuos como las cenizas y escorias. Para producir H<sub>2</sub> puro, el CO en el gas de síntesis se puede convertir en más H<sub>2</sub> y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agregando vapor y reaccionando sobre un catalizador en un reactor WGSR (Water Gas Shift Reactor).

Posteriormente, se separa el hidrógeno puro a través de un proceso de adsorción PSA (Pressure Swing Adsorption).



*Ecuación 6: Reacción química que describe el proceso de un WGSR.*

#### 2.4.1.3. Reformado Auto Térmico

El reformado auto térmico es el proceso en el cual se combina la oxidación parcial y los procesos de reformado de vapor. La oxidación parcial es la incineración de hidrocarburos en un ambiente con una cantidad de oxígeno inferior a la estequiométrica.

A este tipo de proceso se le denomina auto térmico, puesto que se da un intercambio de calor entre el reformado con vapor (proceso endotérmico) y las reacciones de oxidación parcial (proceso exotérmico); por lo tanto, este reformado no necesita que se provee calor mediante alguna fuente externa.

#### 2.4.2. División de la Molécula de Agua

##### 2.4.2.1. Electrólisis

La electrólisis del agua es una tecnología madura y bien desarrollada, que constituye la técnica más efectiva para la división del agua en oxígeno e hidrógeno. La reacción, sin embargo, es muy endotérmica, por lo que requiere gran cantidad de energía, y esta es suministrada por la electricidad.

Una unidad de electrólisis o electrolizador típica consiste en un cátodo y un ánodo sumergido en un electrolito, y generalmente cuando se aplica corriente eléctrica, el agua se divide y se produce hidrógeno en el cátodo mientras se genera oxígeno en el ánodo.

La ventaja es que si se obtiene la energía eléctrica a través de una fuente renovable (como por ejemplo fuente solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, mareomotriz, etc), las emisiones de GEI producto de la generación de hidrógeno serían casi nulas. Por lo tanto, la electrólisis desde el punto de vista medio ambiental, se considera mucho más beneficiosa que los métodos tradicionales a partir de combustibles fósiles.

#### 2.4.2.2. Termólisis

La termólisis es el proceso de craqueo térmico para la producción de hidrógeno como resultado del rompimiento de la molécula de agua al alcanzar altas temperaturas. En este método, cuando la temperatura se eleva a 2500–3000 °C, las moléculas de vapor de agua comienzan a descomponerse en gases de hidrógeno y oxígeno.

#### 2.4.3. Producción a Partir de Biomasa

Para la producción de hidrógeno a partir de biomasa se utilizan una amplia variedad de recursos, entre los cuales se puede mencionar:

- Cultivos energéticos
- Residuos y desechos agrícolas: desechos de plantas y animales.
- Desechos y residuos forestales: residuos de procesamiento y cortes de madera y residuos de árboles y arbustos.
- Desechos industriales y urbanos: desechos sólidos urbanos, lodos provenientes de plantas de tratamientos de aguas y desechos industriales.

Los principales métodos a través de los cuales se produce hidrógeno a partir de la biomasa son los procesos termoquímicos, pirolisis de biomasa y gasificación de biomasa.

##### 2.4.3.1. Pirolisis de Biomasa

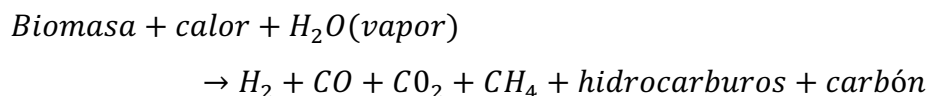
En el proceso de pirólisis de biomasa, se obtiene un líquido combustible similar al petróleo llamado bio-oil. La principal diferencia entre el petróleo y el bio-oil, es que el segundo contiene compuestos oxigenados muy reactivos debido a los carbohidratos y la lignina presentes en la biomasa.

En este proceso de producción de hidrógeno a partir de pirólisis, la biomasa se descompone térmicamente a una temperatura alta (450-550°C) en una atmósfera inerte para formar un bio-oil compuesto de aproximadamente 85% de compuestos orgánicos oxigenados y 15% de agua (Mann 1995b). Posteriormente el bio-oil pasa por un proceso de reformado de vapor usando tecnología convencional, similar al reformado de

combustibles fósiles, para producir hidrógeno. El gas producto del reformado de bio-oil se purifica utilizando un sistema estándar de adsorción (PSA).

#### 2.4.3.2. Gasificación de Biomasa

La biomasa se puede gasificar a temperaturas elevadas (más de 1000 K). El gas y el carbón se producen por la oxidación parcial de partículas de biomasa dentro del gasificador. La biomasa es convertida en un gas de síntesis, compuesto principalmente por  $H_2$ , CO,  $CO_2$  y  $CH_4$ . El proceso de gasificación de biomasa está representado por la siguiente reacción:



*Ecuación 7: Reacción química que describe el proceso de gasificación de biomasa.*

*Fuente: (Kayfeci, Kecebaş, & Bayat, 2019)*

Posteriormente, se procede a separar el hidrógeno de la corriente del gas de síntesis mediante algunos de los métodos estudiados. A partir del CO, mediante un reactor WGSR, es posible generar una cantidad adicional de  $H_2$ .

Debido que los productos del proceso de gasificación son principalmente gaseosos, el proceso de gasificación es un método de producción de hidrógeno más adecuado que la pirólisis. Cuando los gasificadores con lechos fluidizados se usan en conjunto con catalizadores adecuados, la capacidad de producción de hidrógeno se ha observado que puede alcanzar hasta en un 60%. Esta alta eficiencia de conversión dentro de este proceso hace que el método de gasificación de biomasa sea una alternativa atractiva para la producción de hidrógeno. (Kayfeci, Kecebaş, & Bayat, 2019).

#### 2.4.4. Procesos Biológicos

La producción a través de procesos biológicos de hidrógeno es la producción de hidrógeno con microalgas y bacterias. En la actualidad es poca la producción de hidrógeno a través de estos procesos, y la mayoría de las instalaciones son pequeñas y de carácter experimental.

Los principales procesos biológicos para la producción de hidrógeno son:

- Bio-fotólisis directa
- Bio-fotólisis indirecta
- Foto-fermentación
- Fermentación Oscura

## 2.5. Gasificación de Biomasa para la Producción de Hidrógeno

La gasificación es un proceso químico que convierte materiales carbonosos como la biomasa en combustibles gaseosos útiles o materia prima para la industria química. La gasificación se lleva a cabo en un medio deficiente en oxígeno y calor. El medio requerido para la reacción, puede ser aire, oxígeno, vapor subcrítico o una mezcla de estos.

Los principales objetivos que se busca lograr a través de la gasificación de biomasa es aumentar el poder calorífico del combustible mediante la eliminación de componentes no combustibles como el nitrógeno y el agua, eliminar el azufre y el nitrógeno del combustible y reducir la relación carbono/hidrógeno en el combustible.

### 2.5.1. Reacciones de la Gasificación

La composición final del gas del proceso de gasificación es el resultado de la combinación de una serie de reacciones complejas (véase Tabla 3). Estas ocurren en un grado variable, dependiendo de la composición de la biomasa y del agente gasificante utilizado.

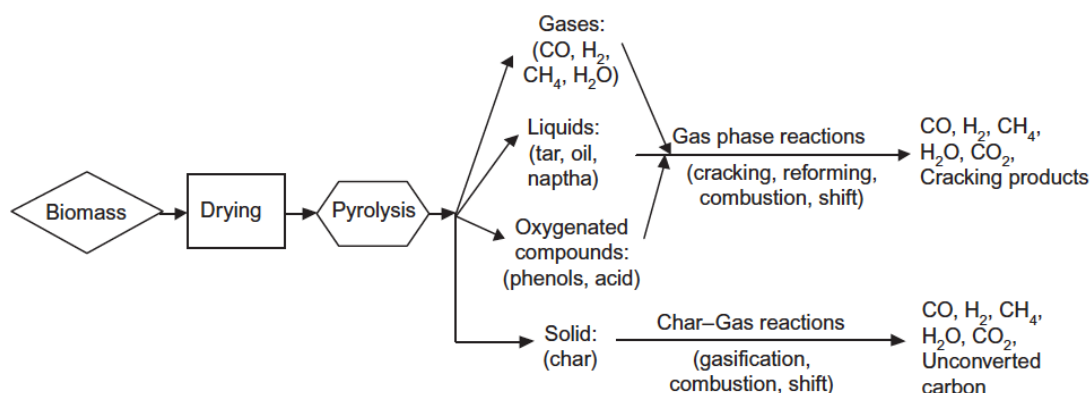
*Tabla 3: Principales reacciones producidas durante la gasificación de biomasa.*

| Tipo de Reacción | Reacción                            |
|------------------|-------------------------------------|
| Oxidación        | $C + O_2 \rightarrow CO_2$          |
| Oxidación        | $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ |

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| Boudouard              | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$          |
| Water Gas (Primaria)   | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$     |
| Water Gas (Secundaria) | $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ |
| Metanación             | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$         |
| Water Gas Shift        | $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$  |
| Reformado de Metano    | $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ |

Fuente: (Franco, Pinto, Gulyurtlu, & Cabrita, 2002).

El proceso de gasificación de biomasa ocurre principalmente a través de tres pasos, el paso inicial es el precalentamiento y secado de la biomasa, luego la pirólisis y/o la combustión, y finalmente la gasificación de los carbones (Basu, 2013) (véase Imagen 6).



*Imagen 6: Secuencia de las reacciones dadas durante el proceso de gasificaciones.*

*Fuente: (Basu, 2013)*

En cuanto a las reacciones de precalentamiento y secado de la biomasa, se sabe que cada kilogramo de humedad en la biomasa requiere aproximadamente 2242 kJ de energía proveniente del gasificador para vaporizar el agua, y esa energía no es recuperable por lo

cual se considera pérdidas. Por lo tanto, es necesaria una cierta cantidad de secado previo para eliminar humedad de la biomasa previo a su ingreso en el gasificador.

El secado final se realiza después que la biomasa ingresa al gasificador, donde recibe calor proveniente de la zona inferior, en donde se están dando las reacciones de pirólisis y oxidación. Este calor calienta la biomasa, y evapora la humedad que esta contiene. Por encima de los 100 °C, el agua que se encuentra en la biomasa se elimina de manera irreversible. A medida que la temperatura aumenta aún más, la biomasa empieza a volatilizarse. Este proceso continúa hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 200 °C.

La pirólisis implica la descomposición térmica de grandes moléculas de hidrocarburos de biomasa en moléculas de gaseosas condensables y no condensables más pequeñas, sin una reacción química con aire, gas o cualquier otro medio de gasificación. Esta reacción generalmente precede a la etapa de gasificación. Producto de la pirólisis se generan alquitranes, lo cuales suelen dificultar el desarrollo del proceso.

Posteriormente, la etapa de gasificación implica reacciones químicas entre los hidrocarburos en el combustible, vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno en el reactor, así como reacciones químicas entre los gases generados. De estos, la gasificación de carbón es la más importante. El carbón de biomasa producido a través de la pirólisis de biomasa no es necesariamente carbono puro, este contiene una cierta cantidad de carbono, hidrógeno y oxígeno. El carbón de biomasa es generalmente más poroso y reactivo que el coque producido a través de la carbonización a alta temperatura del carbón puro.

La mayoría de las reacciones durante el proceso de gasificación son endotérmicas. Para proporcionar el calor requerido para consumir las reacciones, así como el requerido para precalentado, secado y pirólisis, se permiten algunas reacciones de combustión (exotérmica) dentro del gasificador.

### 2.5.2. Agentes Gasificantes

La gasificación de biomasa se realiza en presencia de un agente gasificante que interactúa con los hidrocarburos pesados y el carbón sólido, transformándolos en CO y H<sub>2</sub>. Los agentes gasificantes pueden ser aire, oxígeno, vapor, dióxido de carbono o una mezcla de ellos. El poder calorífico del gas de síntesis depende del tipo de agente gasificante (Parthasarathy, & Narayanan, 2014).

El agente o medio de gasificación reacciona con carbono sólido e hidrocarburos más pesados para convertirlos en gases de bajo peso molecular como el CO y el H<sub>2</sub> (Basu, 2013).

*Tabla 4: Comparativa entre los agentes gasificadores más utilizados.*

|                                           | Air gasification                                                                                                                           | Oxygen gasification                                                                   | Steam gasification                                                                                                            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Product heating value, MJ/Nm <sup>3</sup> | Low 4–6                                                                                                                                    | High 10–15                                                                            | High 15–20                                                                                                                    |
| Products                                  | CO, H <sub>2</sub> , Water, CO <sub>2</sub> , HC, Tar, N <sub>2</sub>                                                                      | CO, H <sub>2</sub> , HC, CO <sub>2</sub>                                              | H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> light HC, tar                                                          |
| Average product gas composition           | H <sub>2</sub> – 15%,<br>CO – 20%,<br>CH <sub>4</sub> – 2%,<br>CO <sub>2</sub> – 15%,<br>N <sub>2</sub> – 48%,<br>H <sub>2</sub> :CO: 0.75 | H <sub>2</sub> – 40%,<br>CO – 40%,<br>CO <sub>2</sub> – 20%,<br>H <sub>2</sub> :CO: 1 | H <sub>2</sub> – 40%, CO – 25%,<br>CH <sub>4</sub> – 8%, CO <sub>2</sub> – 25%,<br>N <sub>2</sub> : 2%, H <sub>2</sub> :CO: 1 |
| Reactor temperature, °C                   | 900–1100                                                                                                                                   | 1000–1400                                                                             | 700–1200                                                                                                                      |
| Cost                                      | Cheap                                                                                                                                      | Costly                                                                                | Medium                                                                                                                        |

Fuente: (Parthasarathy, & Narayanan, 2014).

En cuanto a los productos del gas de síntesis producto del proceso de gasificación de biomasa, sin importar cuál sea el agente gasificador empleado, se suelen obtener CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e hidrocarburos (véase Tabla 4). Al utilizar aire existe la problemática que se genera nitrógeno, debido a la composición natural del aire y adicionalmente se generan alquitranes, al igual que con el vapor de agua. Por su parte, al utilizar oxígeno puro no se generan alquitranes.

En términos de la composición del gas producto del proceso de gasificación el más pobre en hidrógeno y monóxido de carbono es el generado mediante el agente

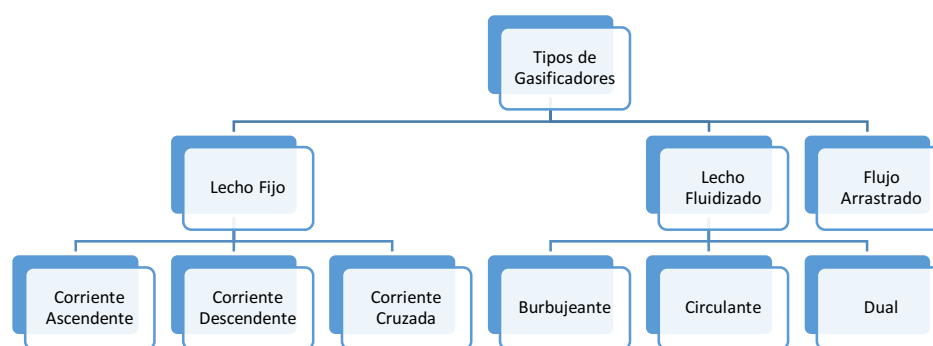
gasificador aire, siendo aproximadamente un 15% de  $H_2$  y 20% de CO; seguido por el vapor de agua, cuyas proporciones son aproximadamente 40% de  $H_2$  y 25% de CO. El agente gasificador que muestra un mejor desempeño es el oxígeno puro, con proporciones que alcanzan el 40% de  $H_2$  y 40% de CO.

En cuanto a los rangos de temperatura durante la operación del reactor, el alimentado con aire opera entre 900-1000 °C, con vapor de agua 700-1200 °C y con oxígeno 1000-1400 °C.

Desde el punto de vista técnico, el reactor operado con oxígeno puro es el de mejor desempeño; sin embargo, es el de costo más alto, seguido por el reactor operado con vapor de agua y siendo el más económico el reactor operado con aire.

### 2.5.3. Tipos de Gasificador

El gasificador es el recipiente donde tienen lugar todas las reacciones químicas y se considera una de las partes más importantes del sistema de gasificación de biomasa. Los gasificadores generalmente se clasifican en tres tipos, a saber, lecho fijo, lecho fluidizado y flujo arrastrado según el modo de interacciones de gas-sólido dentro de él.



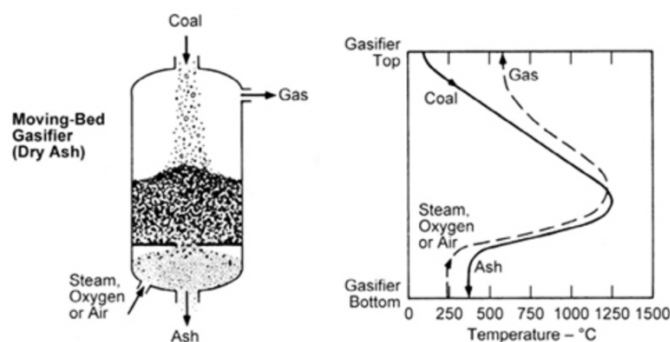
*Imagen 7: Clasificación de los distintos tipos de gasificadores. Fuente: Elaboración Propia.*

Los gasificadores de lecho fijo se clasifican como corriente ascendente, corriente descendente y corriente cruzada, en función de la dirección del flujo de aire. El lecho

fluidizado burbujeante, el lecho fluidizado circulante y el lecho fluidizado dual son los principales tipos de gasificadores de lecho fluidizado.

#### 2.5.3.1. Lecho Fijo

Los gasificadores de lecho fijo son los reactores más antiguos y más comúnmente empleados para la gasificación de materias primas de biomasa. Entre sus principales ventajas se pueden mencionar su diseño simple, operación fácil, alta eficiencia térmica junto con un pretratamiento mínimo de las materias primas. En los mercados comerciales, estos gasificadores se consideran la primera opción para plantas de gasificación a pequeña escala.

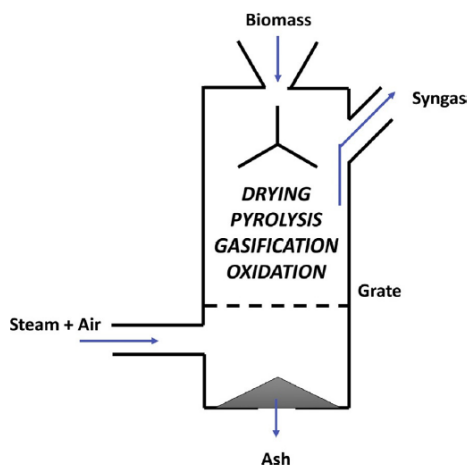


*Imagen 8: Gasificador de lecho fijo y perfil de temperatura interior. Fuente: National EnergyTechnology Laboratory.*

En los gasificadores de flujo ascendente, la biomasa se alimenta desde el extremo superior y el agente gasificante proviene de la parte inferior del gasificador (véase Imagen 8).

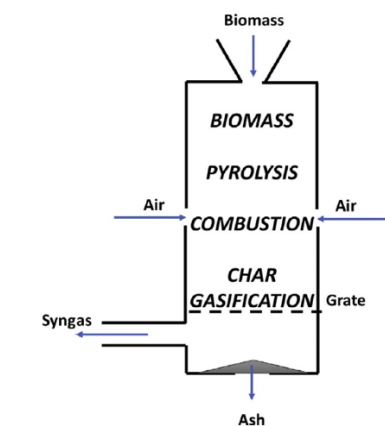
En la gasificación de corriente ascendente, el carbón generado en el fondo se encuentra primero con el agente gasificante, y se produce una reacción de combustión, produciendo  $H_2O$  y  $CO_2$  y elevando la temperatura a alrededor de 1000 °C. Los gases calientes se mueven en dirección ascendente, conduciendo reacciones endotérmicas con carbón sin reaccionar para formar  $H_2$  y  $CO$ , disminuyendo la temperatura hasta los 750 °C. Los gases generados pirolizan la biomasa seca que se mueve hacia abajo, y también secan la biomasa más cercana a la parte superior del reactor. Los gasificadores de

corriente ascendente típicamente producen 10-20% en peso de alquitranes en el gas de síntesis, lo que lo hace inapropiado para varias aplicaciones avanzadas. En los gasificadores de flujo descendente, tanto el combustible como el agente de gasificación se alimentan desde la parte superior (véase Imagen 9).



*Imagen 9: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo ascendente. Fuente: (Singh & Zhao, 2017).*

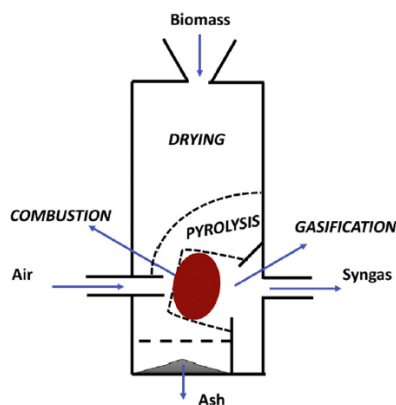
En estos gasificadores, el gas fluye de manera paralela con el combustible. Un gasificador de tiro descendente suele tener una entrada a la mitad del gasificador, por medio de la cual se agrega aire u  $O_2$ , y donde la temperatura sube hasta los  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la biomasa sufre quemado y pirolización (véase Imagen 10). Los gases de combustión luego pasan sobre el carbón caliente en el fondo del lecho, donde por medio de una reacción de reducción se transforma a  $H_2$  y  $CO$ . La temperatura elevada rompe de forma homogénea los alquitranes producidos durante la pirólisis. Como resultado se obtiene una corriente de gas de descarga más limpia, con menor cantidad de alquitranes.



*Imagen 10: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo descendente. Fuente: (Singh & Zhao, 2017).*

En los gasificadores de flujo cruzado, la biomasa proviene del extremo superior del recipiente, mientras que el aire, oxígeno o vapor se alimenta desde uno de los lados del reactor. El gas de síntesis sale del gasificador al mismo nivel que la entrada del agente gasificante, pero desde el otro lado de la unidad (véase Imagen 11).

La combustión y la gasificación tienen lugar en el área de la entrada de aire con zonas de pirólisis y secado hacia la parte superior del reactor. Las cenizas son precipitadas al fondo y la temperatura del gas de salida del producto es de alrededor de 800 a 900 °C, este gas de síntesis posee un alto contenido de alquitrán.



*Imagen 11: Diagrama de gasificador de lecho fijo por flujo cruzado. Fuente: (Singh & Zhao, 2017).*

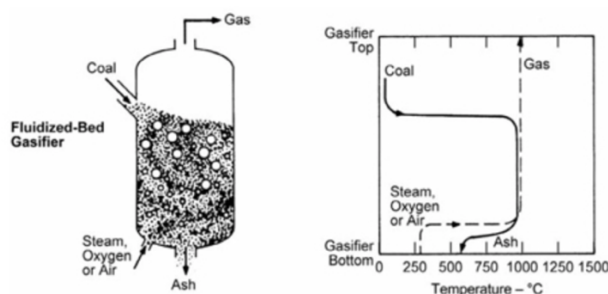
### 2.5.3.2. Lecho Fluidizado

Los gasificadores de lecho fluidizado son altamente eficientes y, por lo tanto, son la tecnología más utilizada para la gasificación de biomasa a escala comercial e industrial. El aire circula sobre un lecho de gránulos finos, por ejemplo, arena, lo que da como resultado la fluidización del lecho (véase Imagen 12).

La fluidización del lecho consiste en una mezcla fluido-sólido que posee las propiedades de un fluido. Como tal, la superficie superior del lecho es relativamente horizontal, lo que es análogo al comportamiento hidrostático. Se puede considerar que el lecho es una mezcla de fluido y sólido que se puede representar por una sola densidad.

Este comportamiento garantiza una transferencia uniforme de calor y masa entre el material del lecho, la biomasa y los gases calientes durante el proceso de gasificación. También permite que el gasificador tolere la entrada de diversos combustibles, lo cual representa una de sus principales ventajas.

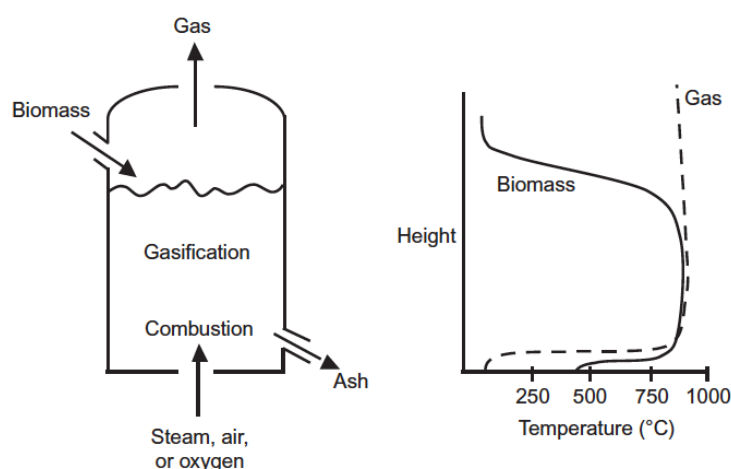
Otra de las ventajas de estos tipos de gasificadores es la posibilidad de emplear un material de lecho de bajo costo que puede actuar simultáneamente como un catalizador para las reacciones de gasificación y rompimiento de los alquitranes.



*Imagen 12: Gasificador de lecho fluidizado y perfil de temperatura interior. Fuente: National Energy Technology Laboratory.*

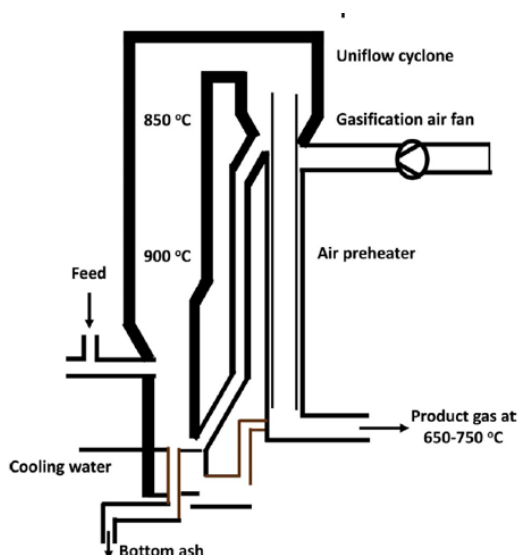
En un lecho fluidizado burbujeante, el combustible es inyectado desde la parte superior o desde los lados, y se mezcla rápidamente sobre el cuerpo del lecho fluido. El medio de gasificación (aire, oxígeno o vapor) sirve como gas de fluidización y, por lo tanto, se envía a través del fondo del reactor (véase Imagen 13).

En un gasificador de lecho fluidizado, las partículas de combustible sólido fresco se ponen en contacto con sólidos del lecho caliente, elevando la temperatura de las partículas rápidamente a la temperatura del lecho y las someten a un rápido secado y pirólisis, produciendo carbón y gases. La temperatura de operación en la cámara de gasificación de los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante oscila entre los 700-900 °C. Aunque los sólidos del lecho están bien mezclados, el gas fluidizante entra desde el fondo y sale por la parte superior.



*Imagen 13: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado burbujeante. Fuente: (Basu, 2013).*

En un gasificador de lecho fluidizado circulante, los sólidos circulan alrededor de un circuito que se caracteriza por una mezcla intensa y un tiempo de residencia más prolongado dentro de su circuito de circulación sólida. En este tipo de gasificador, el material del lecho circula entre el recipiente de reacción y un separador ciclónico (véase Imagen 14).

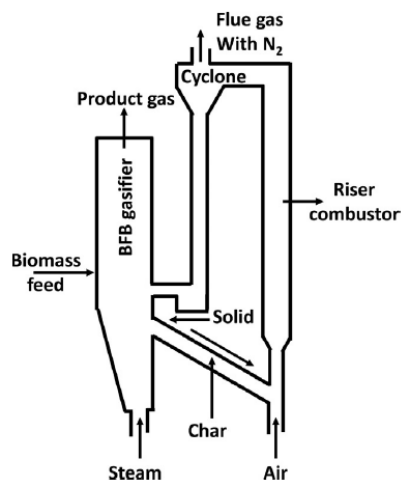


*Imagen 14: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado circulante. Fuente: (Singh & Zhao, 2017).*

El gasificador de lecho fluidizado dual se separa las partes en donde se llevan a cabo las reacciones de gasificación y combustión del proceso, empleando dos lechos fluidizados separados. La biomasa se alimenta por la parte inferior del lecho del gasificador (véase Imagen 15). El segundo lecho actúa como una cámara de combustión de carbón elevando la temperatura del material del lecho a aproximadamente 850-900 °C. El material del lecho ayuda a la transferencia de energía térmica entre ambos lechos. Esto evita la transferencia de gas, permitiendo un gas de síntesis libre de  $N_2$ . Los gases producto de la combustión pasan a través de un ciclón y se recirculan al gasificador a través de by-pass.

Los gasificadores de lecho fluidizado generalmente operan en el rango de temperatura de 800-1000 °C para evitar la aglomeración de cenizas. Esto es satisfactorio para su uso en combustibles como la biomasa, los residuos sólidos municipales (RSU) y el lignito. Dado que los gasificadores de lecho fluidizado funcionan a temperaturas relativamente

bajas, la mayoría de los combustibles con alto contenido de cenizas pueden ser gasificados sin el problema de sinterización<sup>7</sup> y aglomeración de cenizas (Basu, 2013).

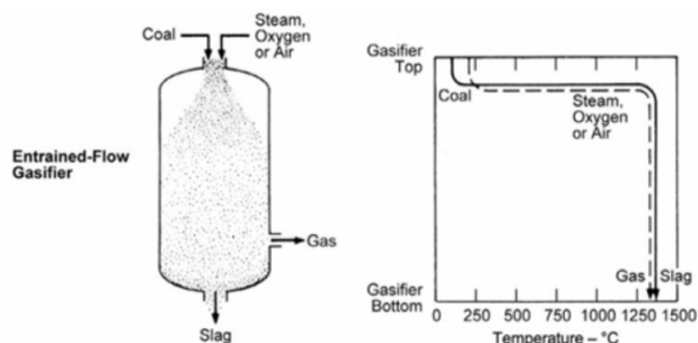


*Imagen 15: Diagrama de gasificador de lecho fluidizado dual. Fuente: (Singh & Zhao, 2017).*

#### 2.5.3.3. Flujo Arrastrado

Los gasificadores de flujo arrastrado operan típicamente a 1400 C y 2.000-70.000 kPa de presión, donde el combustible en polvo es arrastrado en el medio de gasificación. En todos estos gasificadores, el oxígeno ingresa al reactor y reacciona rápidamente con los volátiles y el carbón en reacciones exotérmicas. Estos elevan la temperatura del reactor muy por encima del punto de fusión de las cenizas, lo que resulta en la destrucción completa de los alquitranes (véase Imagen 16). Estas altas temperaturas dan un nivel muy alto de conversión de carbono.

<sup>7</sup> Sinterización: Aplicación de presión y alta temperatura, sin llegar al punto de fusión, a un material en polvo. De esta manera el material se compacta y forma una pieza sólida.



*Imagen 16: Gasificador de flujo arrastrado y perfil de temperatura interior. Fuente: National EnergyTechnology Laboratory.*

## **2.6. Disponibilidad y Caracterización de la Corteza de Árbol en Chile**

### **2.6.1. Industria de Aserraderos**

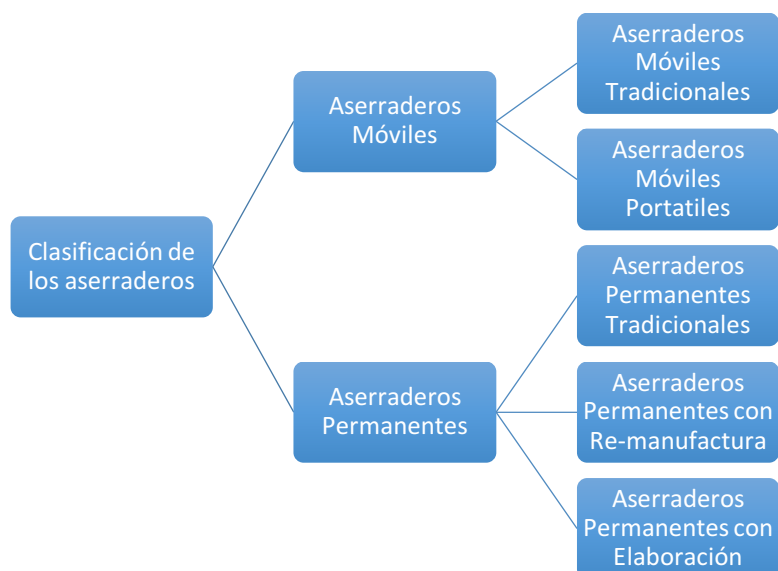
Los aserraderos son las industrias dedicadas a la transformación primaria de la madera, para que posteriormente esta sea transportada a industrias secundarias, las cuales se encargan de generar productos terminados. El proceso de producción de los aserraderos se sintetiza en la Imagen 17.

#### **2.6.1.1. Clasificación de los aserraderos**

Los aserraderos se clasifican en dos grandes grupos (véase Imagen 18): los aserraderos móviles, que a su vez se clasifican en aserraderos móviles tradicionales y aserraderos móviles portátiles, y los aserraderos permanentes que se dividen en aserraderos permanentes tradicionales, aserraderos permanentes con elaboración y aserraderos permanentes con re-manufactura.



*Imagen 17: Proceso de producción de los aserraderos. Fuente: Elaboración Propia.*



*Imagen 18: Clasificación general de los aserraderos. Fuente: Elaboración Propia*

Los aserraderos móviles tienen como característica principal que su estructura transportable le permite ser instalado muy cerca del bosque o en el mismo bosque. Por una parte, están los aserraderos móviles tradicionales que se caracterizan por utilizar una sierra circular simple de 7 mm que genera gran cantidad de residuos madereros entre lampazos y aserrín. Por otra parte, se encuentran los aserraderos móviles portátiles cuya principal característica es que son montados sobre un vehículo que permite su desplazamiento entre sitios de operación sin ser desarmado; estos utilizan una sierra de 1 mm de espesor, que permite obtener cortes con mejor rendimiento de madera, reduciendo de gran manera los residuos.

Los aserraderos permanentes son aquellas unidades localizadas en forma estable en un sitio físico. Los procesos en este tipo de equipos pueden variar y usualmente van desde la producción de madera aserrada, hasta su manufactura completa para obtener productos terminados con mayor valor agregado. Los aserraderos permanentes tradicionales producen madera aserrada sin cepillar, los aserraderos permanentes con elaboración producen madera aserrada cepillada, y los aserraderos permanentes con re-manufactura producen productos finales elaborados con la madera aserrada. Los aserraderos permanentes tienen la característica de que usualmente poseen un descortezador, por lo cual la corteza es un residuo típico en este tipo de instalaciones.

#### 2.6.2. Tipos de Residuos

Existe gran disponibilidad de residuos madereros generados en la operación de los aserraderos, que podrían ser aprovechados en la generación energética, entre estos están:

- Corteza: Es la capa externa de la madera y se obtiene en aserraderos que poseen descortezadores, quedando la corteza como residuo.
- Lampazo: corresponden a secciones laterales de la troza obtenidos en el proceso de aserrío, y se caracterizan por tener una cara limpia y otra que contiene restos de corteza.
- Aserrín: Conjunto de partículas de tamaño pequeño obtenido en el proceso de aserrado

- Viruta: Cinta delgada de espesor variable en dirección de la fibra generada por el cepillado de piezas de madera
- Despuntes: Residuos de tamaño variable provenientes de secciones terminales de piezas, que resultan del proceso de dimensionado en largo de la madera.

### 2.6.3. Distribución de Aserraderos en Chile

*Tabla 5: Distribución del Volumen de Residuos Madereros ( $m^3$ / año), por Región y Rango de Producción de RAE (2015).*

| Rango de Producción de RAE ( $m^3$ /año) | REGIÓN      |               |              |                |                  |                  |                |                |                |               |               | Total ( $m^3$ )  |
|------------------------------------------|-------------|---------------|--------------|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|------------------|
|                                          | Coquimbo    | Valparaíso    | Metrop.      | O'Higgins      | Maule            | Biobío           | Araucanía      | Los Ríos       | Los Lagos      | Aysén         | Magallanes    |                  |
| < 500                                    |             | 2.004         | 1.177        | 1.970          | 6.293            | 15.261           | 24.697         | 12.333         | 25.796         | 5.395         | 4.687         | 99.612           |
| 501 - 1.000                              |             | 1.433         |              | 1.957          | 9.717            | 28.125           | 24.141         | 14.313         | 20.315         | 3.026         | 3.817         | 106.844          |
| 1.001 - 5.000                            |             | 29.181        |              | 56.214         | 124.955          | 151.808          | 119.941        | 58.845         | 58.628         | 1.670         | 1.441         | 601.683          |
| 5.001 - 10.000                           |             |               |              | 40.323         | 236.061          | 231.276          | 83.889         | 35.918         | 21.872         |               | 5.586         | 654.834          |
| 10.001 - 25.000                          |             |               |              | 20.862         | 444.741          | 330.407          | 148.074        | 43.170         | 23.563         |               | 34.962        | 1.045.778        |
| 25.001 - 50.000                          |             |               |              | 25.538         | 174.598          | 83.558           | 27.155         |                |                |               |               | 310.849          |
| 50.001 - 100.000                         |             |               |              | 52.638         | 218.845          | 592.690          | 203.345        |                |                |               |               | 1.067.518        |
| 100.001 - 200.000                        |             |               |              |                | 167.429          | 751.840          | 115.397        | 178.152        |                |               |               | 1.212.808        |
| > 200.000                                |             |               |              |                |                  | 207.846          |                |                |                |               |               | 207.846          |
| <b>Total (<math>m^3</math>)</b>          | <b>0</b>    | <b>32.619</b> | <b>1.177</b> | <b>199.411</b> | <b>1.382.638</b> | <b>2.393.810</b> | <b>745.639</b> | <b>342.721</b> | <b>150.174</b> | <b>10.091</b> | <b>50.492</b> | <b>5.307.773</b> |
| <b>%</b>                                 | <b>0,00</b> | <b>0,6</b>    | <b>0,00</b>  | <b>3,8</b>     | <b>26,0</b>      | <b>45,1</b>      | <b>14,0</b>    | <b>6,5</b>     | <b>2,8</b>     | <b>0,2</b>    | <b>1,0</b>    | <b>100,0</b>     |

Fuente: (Gysling & Soto, 2016)

Según los datos de este estudio se puede observar que la mayor producción de residuos madereros aprovechables energéticamente, producto de la industria del aserrío, se producen principalmente en la Región del Maule, Región del Biobío y Región de la Araucanía (véase Tabla 5). Siendo la Región del Biobío, la que genera la mayor cantidad de residuos madereros (aproximadamente un 45% del total producido en Chile).

*Tabla 6: Distribución del Volumen de Residuos Madereros, según rango de producción de Madera Aserrada (2015).*

| Rango de Producción de Madera Aserrada (m³ ssc) | Nº aserraderos | Volumen RAE (m³) | %            |
|-------------------------------------------------|----------------|------------------|--------------|
| Menor a 1.000                                   | 677            | 232.540          | 4,4          |
| 1.001 - 3.000                                   | 145            | 298.452          | 5,6          |
| 3.001 - 5.000                                   | 75             | 318.351          | 6,0          |
| 5.001 - 10.000                                  | 76             | 563.362          | 10,6         |
| 10.001 - 20.000                                 | 58             | 668.795          | 12,6         |
| 20.001 - 50.000                                 | 31             | 564.636          | 10,6         |
| 50.001 - 100.000                                | 8              | 367.143          | 6,9          |
| 100.001 - 200.000                               | 9              | 860.159          | 16,2         |
| 200.001 - 300.000                               | 5              | 555.857          | 10,5         |
| Mayor a 300.000                                 | 6              | 878.478          | 16,6         |
| <b>Total</b>                                    | <b>1.090</b>   | <b>5.307.773</b> | <b>100,0</b> |

Fuente: (Gysling & Soto, 2016)

Por otra parte, se puede observar que aproximadamente el 43% de la producción de residuos madereros de la industria de los aserraderos se generan en aquellos que tienen una producción anual de más de 100.000 m³ ssc, concentrándose esta generación de residuos en únicamente 20 aserraderos de los 1.090 que existen en Chile (véase Tabla 6).

#### 2.6.4. Disponibilidad de la Corteza de Árbol en Chile

Según datos de la Balance Nacional de Energía (CNE, 2017)<sup>8</sup> aproximadamente un 42% de la energía primaria producida en el país corresponde a biomasa. De la oferta total de energía, la biomasa corresponde a un 20% del total. En cuanto al consumo energético un 13%, principalmente en sector industrial y residencial, corresponde al uso de biomasa.

En el Anuario Forestal del año 2018, el consumo de madera en trozos en la industria forestal primaria<sup>9</sup> llegó en el 2017 a 45,8 millones de metros cúbicos sólidos sin corteza (m³ ssc), un 2,7% más que en el año 2016.

La mayor industria consumidora de madera es la de pulpa, con una participación del 37,7% del consumo total, le sigue de cerca la industria del aserrío con el 35,1% de

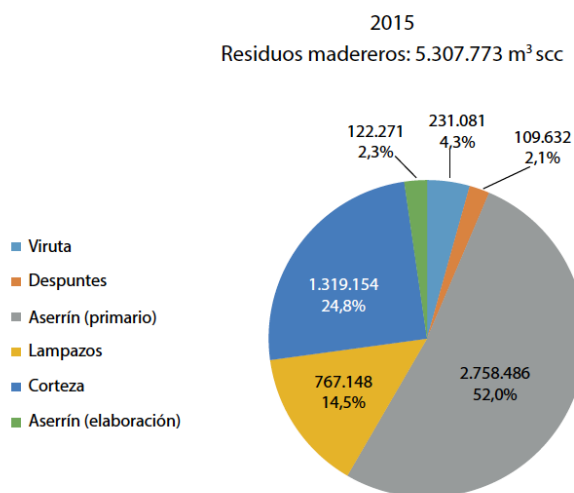
<sup>8</sup> CNE: Comisión Nacional de Energía de Chile

<sup>9</sup> La industria forestal primaria realiza el primer proceso a la madera como materia prima proveniente directamente del bosque

participación, y luego la industria de astillas con el 16,5% y la de tableros y chapas con el 9,7%. Por especies, el 67,0% del consumo de madera en trozos para uso industrial corresponde a pino radiata, en tanto que *Eucalyptus nitens* participa con el 17,3% y *Eucalyptus globulus* con el 14,3%, dejando el restante 1,4% a otras especies (Ministerio de Agricultura, 2018).

De los procesos industriales en la industria maderera se obtienen como residuos la corteza (capa externa de la madera), lampazo (secciones laterales de la troza), aserrín (partículas de tamaño pequeño), viruta (cintas delgadas), y despunte (residuos de diverso tamaño provenientes del dimensionado) (Paneque, et al., 2011).

Según datos del informe de la Industria Forestal Primaria (periodo 2006-2015) (Gysling & Soto, 2016), para el año 2015 se obtuvo un volumen de residuos madereros en forma de corteza de árbol 1.319.154 m<sup>3</sup>, únicamente producto de la industria del aserrío (véase Imagen 19). La corteza de árbol fue principalmente utilizada para su comercialización, autoconsumo, acumulación y ser regalada.



*Imagen 19: Distribución del volumen de residuos madereros según tipo. Fuente: (Gysling & Soto, 2016)*

En el año 2015, el consumo total de trozas en la industria del aserrío fue de 17.740.467 m<sup>3</sup>scc. Los resultados muestran que el volumen residual anual de lampazo alcanza a

767.148 m<sup>3</sup>ssc (4,3% del consumo total de trozos); el aserrín proveniente de la primera y segunda transformación de la madera, es de 2.880.757 m<sup>3</sup>scc (16,2%); y el de corteza de 1.319.154 m<sup>3</sup> (7,4%). El volumen anual residual proveniente de la transformación secundaria de la madera, consistente en despuntes y viruta, es de 109.632 m<sup>3</sup>scc (0,6%) y 231.081 m<sup>3</sup>scc (1,3%), respectivamente. Todo ello suma un volumen anual de Residuos Aprovechables Energéticamente (RAE) de 5.307.773 m<sup>3</sup>, correspondiente al 29,9% del volumen consumido de trozas.

En cuanto al tipo de aserraderos, para el año 2015, aproximadamente el 98% de la generación de corteza como residuo maderero en la industria de los aserraderos corresponde a instalaciones con tipo de aserradero permanente, el restante 2% es producto de instalaciones móviles. (Gysling & Soto, 2016)

## **2.7. Métodos de Separación y Purificación del Hidrógeno**

Existen diversos procesos para separar y purificar la corriente de hidrógeno, pero dado que las corrientes del gas de síntesis están disponibles en distintas proporciones de composición, flujos y presiones, el mejor método de purificación variará en función de la aplicación que tendrá. Entre los distintos factores a tenerse en consideración al seleccionar un método de purificación de hidrógeno se pueden mencionar:

- Pureza del producto
- Presión de operación
- Confiabilidad del proceso
- Costo del sistema

Para el proceso de separación del hidrógeno del gas de síntesis se suelen utilizar materiales adsorbentes o membranas especiales que pueden separar el hidrógeno de esta corriente de gas.

Otra tecnología utilizada para la separación del hidrógeno es el uso de la tecnología de separación criogénica (condensación parcial), la cual disminuye la temperatura de la corriente de gases llegando hasta la temperatura de licuefacción de las impurezas.

### 2.7.1. Materiales Adsorbentes

La tecnología de adsorción “Pressure Swing Adsorption” (PSA) se basa en la unión física de las moléculas de una corriente de gas hacia un material con características adsorbentes. La fuerza respectiva que actúa entre las moléculas de gas y el material adsorbente<sup>10</sup> depende de la composición del gas, el tipo de material adsorbente, la presión parcial de la composición del gas y la temperatura de funcionamiento.

El efecto de separación de gases se basa en las diferencias entre las fuerzas de unión al material adsorbente que posee cada uno de los elementos que componen el gas de síntesis. Los componentes volátiles con baja polaridad, como el hidrógeno, son prácticamente no adsorbibles en comparación con moléculas como el nitrógeno, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, los derivados de hidrocarburos y el vapor de agua. Es por esto, que estas impurezas pueden adsorberse de una corriente que contiene hidrógeno, y se recupera hidrógeno de alta pureza.

Las unidades de PSA utilizan lechos de material adsorbente sólido para separar las impurezas de las corrientes de gas de síntesis que conducen el hidrógeno, para producir una corriente de hidrógeno en alta presión de alta pureza y a una corriente de cola de baja presión que contiene las impurezas (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, etc) y parte del hidrógeno. Los lechos de adsorción se regeneran siendo despresurizados.

Durante este proceso gran parte del hidrógeno puede perderse en la corriente de cola. La tasa de recuperación de hidrógeno a partir de sistemas PSA es de aproximadamente 80%.

El proceso de adsorción PSA funciona a una temperatura constante y utiliza el efecto de realizar cambios en la presión para alcanzar presiones parciales de las impurezas y conseguir la adsorción y la desorción. Como no es necesario calentar o enfriar, se logran ciclos cortos dentro del rango de minutos. Este proceso permite la eliminación económica de grandes cantidades de impurezas.

---

<sup>10</sup> La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie.

La adsorción se lleva a cabo a alta presión típicamente en el rango de 10-40 bar hasta que se alcanza la carga de equilibrio. Cuando no hay más capacidad de adsorción disponible en el lecho, el material adsorbente debe ser regenerado. Esta regeneración se logra bajando la presión ligeramente por encima de la presión atmosférica. Después de la finalización de la regeneración, la presión se incrementa nuevamente al nivel de presión de adsorción, y el proceso comienza nuevamente. El proceso de adsorción por PSA es un proceso cíclico produce hidrógeno una pureza del 99.9%.

### 2.7.2. Membranas

Para la producción y purificación de hidrógeno, las membranas que se utilizan principalmente son inorgánicas, y los principales tipos utilizados son metales de fase densa, aleaciones metálicas y membranas cerámicas porosas.

El método de separación de hidrógeno a través de membranas separa los gases aprovechando la diferencia en las tasas de difusión a través de las membranas (Speight, 2019). Los gases que se difunden más rápido (por ejemplo, el hidrógeno) se convierten en la corriente en la cual la membrana es permeable y están disponibles a baja presión a la salida, mientras que los gases de difusión más lenta no logran permear la membrana. Los sistemas de separación de hidrógeno a través de membranas no contienen piezas móviles, por lo cual tienen una muy alta confiabilidad.

Las membranas se fabrican en módulos pequeños, por lo cual, para alcanzar una mayor capacidad, se añaden más módulos. Por lo tanto, el costo es prácticamente lineal con la capacidad, lo que los hace más competitivo este tipo de instalaciones a capacidades más bajas (Speight, 2019). El diseño de los sistemas de separación de hidrógeno por membrana implica una compensación entre la caída de presión y el área de superficie, así como entre la pureza y recuperación de la corriente de hidrógeno. Los sistemas de separación por membrana pueden producir hidrógeno con purezas de 90% a 98% con una tasa de recuperación mayor al 85%.

### 2.7.3. Separación Criogénica

Las unidades de separación criogénica funcionan enfriando el gas y condensando los componentes o impurezas de la corriente de gas. Dependiendo de la pureza del producto requerida, la separación puede implicar procesos de evaporación o destilación.

Las unidades criogénicas ofrecen la ventaja de poder separar una variedad de productos de una sola corriente de gases de alimentación. La recuperación de hidrógeno está en el rango del 95%, con una pureza superior al 98% obtenible.

Este método es aplicable a la separación de hidrógeno, porque las impurezas gaseosas como los hidrocarburos, vapor de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrógeno, se condensan a temperaturas mucho más altas que el hidrógeno

## 2.8. Tecnologías de Almacenamiento y Transporte del Hidrógeno

### 2.8.1. Almacenamiento de Hidrógeno

El segundo mayor desafío, en cuanto al uso del hidrógeno, es cómo almacenarlo. El hidrógeno se caracteriza por tener la densidad de gas más baja y el segundo punto de ebullición más bajo de todas las sustancias conocidas, por lo que es difícil almacenarlo en forma de gas o líquido. Como gas, requiere grandes volúmenes de almacenamiento y presiones. Como líquido, requiere un sistema de almacenamiento criogénico<sup>11</sup>.

La baja densidad del hidrógeno, tanto en estado gaseoso como líquido, da como resultado una densidad de energía muy baja. Por lo que, para un volumen dado de hidrógeno se obtiene menos energía que el mismo volumen de otros combustibles.

Lo anterior aumenta el tamaño relativo del tanque de almacenamiento, ya que se requiere más hidrógeno para cumplir con el mismo requisito energético.

A pesar de su baja densidad de energía volumétrica, el hidrógeno tiene la mayor relación energía/peso de cualquier combustible; sin embargo, esta ventaja se ve disminuida por el

---

<sup>11</sup> Criogénico: conjunto de técnicas utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas aún más bajas.

alto peso de los tanques de almacenamiento de hidrógeno y el equipo asociado. Por lo tanto, la mayoría de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno son considerablemente más voluminosos y pesados que los utilizados para combustibles convencionales (gasolina o diésel).

Según (College of the Desert, 2001), las principales tecnologías para el almacenamiento de hidrógeno son:

- Gas en alta presión
- Líquido ( $H_2$  criogénico)
- Hidruros metálicos

#### 2.8.1.1. Gas en Alta Presión

El hidrógeno a alta presión se almacena en cilindros similares a los utilizados para el gas natural comprimido. La mayoría de los cilindros tienen una sección de pared lateral de forma cilíndrica con cúpulas terminales hemisféricas. Los cilindros de gas de alta presión deben estar hechos de paredes gruesas, materiales de alta resistencia y deben ser muy duraderos. Los cilindros se clasifican en cuatro tipos según sus materiales de construcción. La compresión del gas es un proceso intensivo en energía. Cuanto mayor es la presión final, mayor es la cantidad de energía requerida.

*Tabla 7: Tipos de cilindro según su material de construcción.*

| Designation | Description                                                                                               | % Load Taken by Metal vs. Composite |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Type 1      | A cylinder made wholly of steel or aluminum                                                               | 100 / 0                             |
| Type 2      | A cylinder with a metal line of steel or aluminum and a hoop-wrapped (circumferential) composite overwrap | 55 / 45                             |
| Type 3      | A cylinder with a thin metal liner of steel or aluminum and a fully wound composite overwrap              | 20 / 80                             |
| Type 4      | A cylinder with a plastic liner and a fully wound composite overwrap                                      | 0 / 100                             |

Fuente: (College of the Desert, 2001)

### 2.8.1.2. Líquido ( $H_2$ criogénico)

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido superan muchos de los problemas de peso y tamaño asociados con los sistemas de almacenamiento de gas a alta presión, aunque a temperaturas extremadamente bajas. El hidrógeno líquido puede almacenarse justo por debajo de su punto de ebullición normal de @-253 °C o 20 K a, cerca de la presión ambiental en un tanque de doble pared, súper aislado. Los tanques de hidrógeno líquido no necesitan ser tan fuertes como los cilindros de gas de alta presión. En total, la energía requerida para el proceso de licuefacción es el equivalente de hasta el 40% del LHV del hidrógeno. Una vez en forma líquida, el hidrógeno es relativamente eficiente de transportar y fácil de usar.

### 2.8.1.3. Hidruros Metálicos

Los sistemas de almacenamiento de hidruros metálicos se basan en el principio de que algunos metales absorben el hidrógeno gaseoso en condiciones de alta presión y temperatura moderada para formar hidruros metálicos. Estos hidruros metálicos liberan el gas de hidrógeno cuando se calientan a baja presión y temperatura relativamente alta.

## 2.8.2. Transporte y Distribución de Hidrógeno

Al igual que el almacenamiento de hidrógeno, su transporte es bastante complicado y requiere de gran cuidado para poder ser realizado de una manera segura y eficiente.

El método más económico para producir y suministrar hidrógeno en la actualidad, es generarlo a partir de plantas de reformado de metano y vapor de agua a gran escala distribuirlo a través de tuberías dedicadas para hidrógeno gaseoso. En los lugares donde no existen redes de tuberías de hidrógeno, es posible transportar hidrógeno en estado gaseoso o licuado en forma móvil desde las plantas de producción hasta las estaciones de distribución. Sin embargo, la economía del transporte de hidrógeno en forma móvil (Basile & Iuanelli, 2014) limita el radio de entrega desde la planta de producción hasta el punto de abastecimiento de hidrógeno.

### 2.8.2.1. Transporte Móvil

En este medio de transporte y distribución de hidrógeno, el mismo se almacena en tanques apropiados para el método de almacenamiento de hidrógeno, ya sea en forma líquida o gaseosa, y el medio de transporte (terrestre, ferroviario o marítimo).

El hidrógeno en forma gaseosa a alta presión suele transportarse en cilindros a presiones que oscilan entre 150 a 400 bar. Sin embargo, desde el punto de vista energético este tipo de transporte de hidrógeno no es muy eficiente, debido a que el peso del hidrógeno en comparación al peso de los cilindros para transportarlo es muy bajo. Esta problemática se da debido a que las moléculas de hidrógeno gaseoso son más pequeñas que todos los demás gases, y pueden difundirse a través de materiales considerados herméticos a otros gases, haciendo que el hidrógeno sea más difícil de contener en envases.

El hidrógeno puede ser transportado en forma móvil como un líquido criogénico en tanques de doble pared y con aislamiento. El transporte de hidrógeno líquido es mucho más eficiente que como gas a alta presión, puesto que para almacenar el mismo peso de hidrógeno en forma de gas se requieren contenedores entre 4 y 8 veces más pesados. Sin embargo, los costos de mantenimiento son mucho más altos para el transporte de líquidos puesto que es necesario operar un sistema de enfriamiento que mantenga el hidrógeno por debajo de su punto de licuefacción.

### 2.8.2.2. Redes de Tuberías

A través de redes de tuberías el hidrógeno puede ser distribuida de forma líquida criogénica o gaseosa.

El transporte de hidrógeno en forma líquida a través de tuberías es bastante complejo y poco viable para tramos largos, ya que se requiere un aislamiento completo del tramo de tubería a fin de mantener las temperaturas criogénicas.

Por otra parte, el transporte de hidrógeno en forma gaseosa es más simple y viable a través de tuberías. Debe tenerse en cuenta que las tuberías deben diseñarse para

funcionar en altas presiones, y los equipos auxiliares deben ser compatibles con el hidrógeno.

Además, es importante que las tuberías de hidrógeno, tanto para su transporte en forma líquida o gaseosa, deben ser resistentes a la interacción con el hidrógeno, con el propósito de evitar fugas o desgaste producto del cambio de las propiedades mecánicas por efecto del hidrógeno en los aceros.

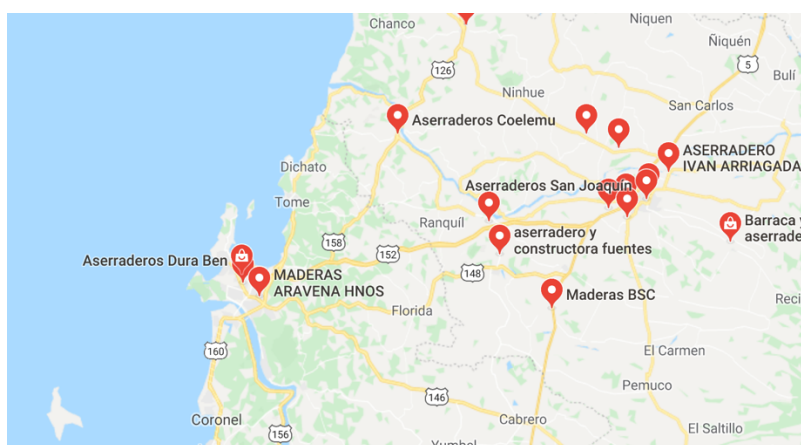
### Capítulo 3: Resultados y Discusión

#### 3.1. Ubicación de la Planta de Gasificación

Debido al potencial de generación de residuos de lignocelulosa (en forma de corteza de árboles) producto de la industria de los aserraderos se estima que la mejor área para la ubicación de la planta de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno sería en la región del Biobío o en el sur de la región del Maule.

Idealmente, la planta de gasificación debe encontrarse en las cercanías de los centros de generación de residuos con el propósito de disminuir los costos de transporte. En base a lo anterior, el área ideal sería entre la VII y VIII región, en los alrededores de las ciudades de Concepción, Coronel o Chillan, zonas que concentran la mayor cantidad de aserraderos de la región (véase Imagen 20).

Para el año 2015, en la región VII se produjo un 23.7% de la madera aserrada en Chile, mientras que en la VIII región la producción fue un 51% del total. Por lo tanto, un 74.7% de la madera aserrada en Chile se concentra en las regiones en la cual se tiene previsto ubicar la central de gasificación (Gysling & Soto, 2016).



*Imagen 20: Distribución de aserraderos en la región del Biobío. Fuente: Elaboración Propia.*

Otra de las ventajas de ubicar la planta de generación de hidrógeno a partir de corteza de árboles entre la VII y VIII región, es que estas se encuentran más cercanas a los

principales puntos de consumo, por lo cual se reducirían los costos de distribución. Los principales centros de consumo se tienen previsto que estén en la región metropolitana y en la zona norte del país, en la industria de la minería.

### **3.2. Suministro de Biomasa a la Central**

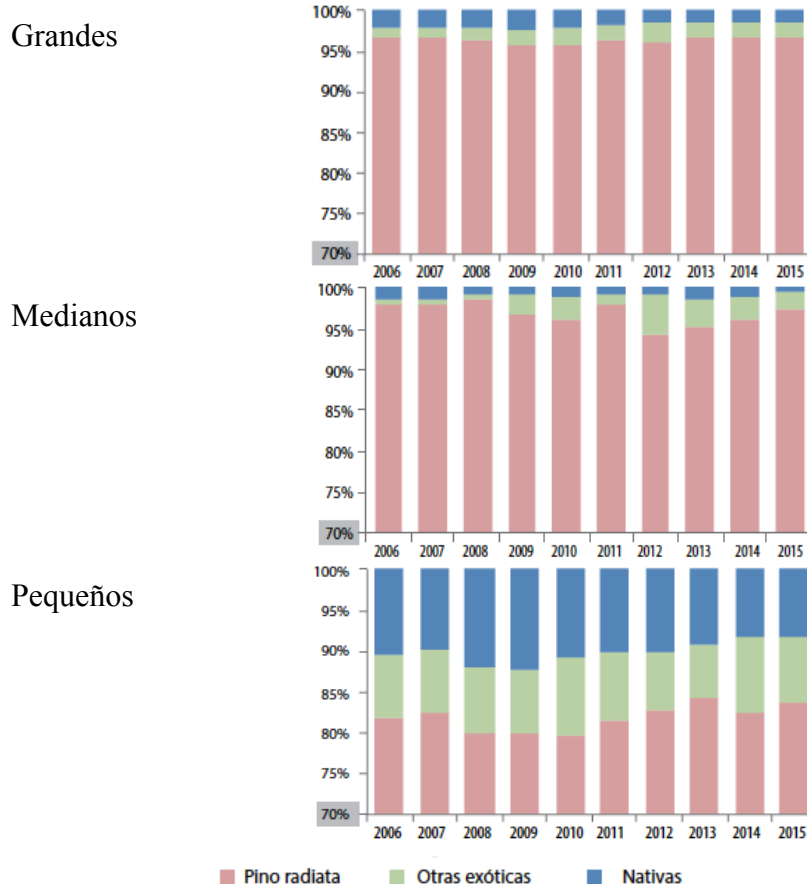
#### **3.2.1. Tipo de Residuo**

Teniendo en cuenta que el 67,0% del consumo de madera en trozos para uso industrial en Chile, corresponde a pino radiata, este sería el tipo de corteza de árbol que se utilizaría para la operación de la instalación.

Puesto que la mayor parte de la corteza de árboles de la que se abastecerá la central de gasificación provendrá aserraderos grandes (más de 100.001 m<sup>3</sup>/año) y medianos (entre 10.001 y 100.000 m<sup>3</sup>/año), y teniendo en cuenta que entre el 95% al 97% de la madera trabajada en los mismos corresponde a la especie pino radiata, queda definido que este sería el tipo de corteza a tratar.

Los aserraderos pequeños (menos de 10.000 m<sup>3</sup>/año) no han sido considerados para el suministro de corteza de árboles, puesto que el liderazgo del pino radiata en la producción de madera aserrada en este tipo de aserraderos disminuye significativamente, llegando a aproximadamente el 80%. El 20% restante se distribuye entre maderas nativas y maderas exóticas.

El objetivo de centrar el suministro de la corteza de árboles proveniente de medianos y grandes aserraderos, los cuales corresponden al 28.8% y 55.2% de la madera aserrada en Chile respectivamente (año 2015), es aumentar la cantidad de corteza recibida por la menor cantidad de proveedores (véase Tabla 8). Reducir el número de proveedores disminuirá considerablemente los problemas asociados a la logística de suministro del recurso, y además homogenizaría la calidad del mismo.

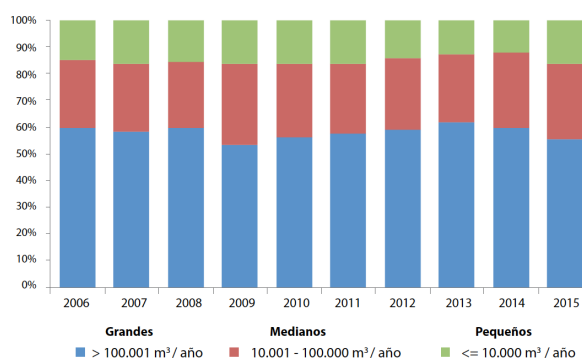


*Imagen 21: Distribución de la Producción de Madera Aserrada según Especie y Tamaño del Aserradero. Fuente: (Gysling & Soto, 2016).*

*Tabla 8: Porcentaje de participación según tamaño del aserradero.*

| Tamaño del Aserradero | Porcentaje Anual de la Producción de Madera Aserrada en Chile | Rango de Producción (m <sup>3</sup> /año) |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Grandes               | 55,2%                                                         | > de 100.000                              |
| Medianos              | 28,8%                                                         | entre 10.000 y 100.000                    |
| Pequeños              | 16,0%                                                         | < 10.000                                  |

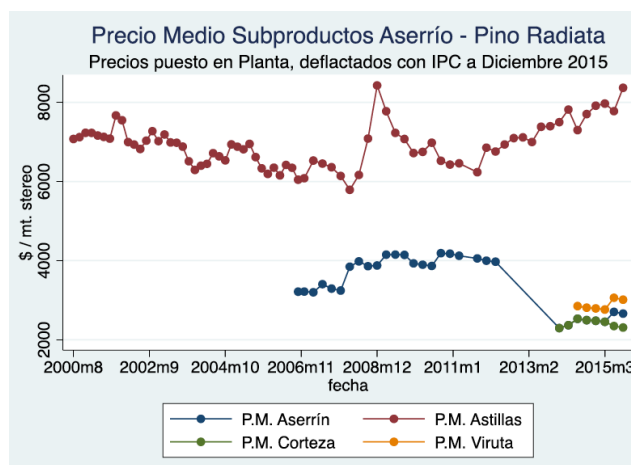
Fuente: Elaboración Propia.



*Imagen 22: Porcentaje de madera aserrada en Chile según tamaño del aserradero entre los años 2006-2015. Fuente: (Gysling & Soto, 2016).*

### 3.2.2. Costo de la Corteza de Árboles en Chile

El costo de la corteza del pino radiata durante los años 2013 a 2015 se mantuvo alrededor de los 2.300 clp/metro estéreo<sup>12</sup>, siendo el residuo de la industria forestal de menor costo por unidad de volumen (véase Imagen 23).



*Imagen 23: Evolución del precio promedio de subproductos de la industria del aserrío de Pino radiata (en pesos de diciembre 2015 / metro estéreo). Fuente: (Ministerio de Agricultura Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2016)*

<sup>12</sup> Metro estéreo: Unidad que estima por aproximación la cantidad o peso de madera (como leña, madera aserrada, o carbón) a procesar, transportar, o apilar; y se expresa obteniendo el ancho, largo, y alto promedio de un metro cúbico (1 m³) en total.

### 3.2.3. Composición Elemental de la Biomasa

Dado que la mayor parte de la biomasa a ser empleada en la central de gasificación para producción de hidrógeno será pino radiata, se puede considerar que la composición elemental del suministro será la de este tipo de madera.

| <b>Ultimate Analysis, wt% (od)</b> |      |
|------------------------------------|------|
| C                                  | 51.2 |
| H                                  | 6.1  |
| O                                  | 42.3 |
| N                                  | 0.2  |
| S                                  | 0.02 |

*Imagen 24: Análisis elemental para de la madera del pino radiata. Fuente: (Nargess Puadian, Li, & Pang, 2014)*

Según (Murphy & Cown, 2015) la densidad promedio de la corteza del pino radiata para especies jóvenes es de aproximadamente 300 kg/m<sup>3</sup> y de 400 kg/m<sup>3</sup> para especies de mayor edad.

El poder calorífico superior de la corteza de la especie pino radiata es de 20.920 kJ/kg (Carmona, 2015).

## 3.3. Estimación del Suministro de Biomasa a la Central de Gasificación

### 3.3.1. Residuo disponible en Forma de Corteza en Chile

En Chile, durante el año 2015, la cantidad de manera destinada a la industria del aserrío fue de 17.740.467 m<sup>3</sup>. Del total madera manejada por la industria del aserrío, 8.372.219 m<sup>3</sup> o el 47,3%, se convirtió en madera aserrada destinada a la comercialización. A partir de la transformación de la madera cruda en productos terminados, se generó 5.307.773 m<sup>3</sup> o el 29,9% en forma de residuos aprovechables energéticamente (RAE).

*Tabla 9: Desglose de la cantidad producto generados por la industria del aserrío en Chile para el año 2015.*

| Tipo de Madera                          | Total Anual (m <sup>3</sup> ) | Porcentaje |
|-----------------------------------------|-------------------------------|------------|
| Madera con Corteza Destinada al Aserrío | 17.740.467                    | -          |
| Madera Aserrada                         | 8.372.219                     | 47,3%      |
| RAE <sup>13</sup>                       | 5.307.773                     | 29,9%      |
| RAE en Forma de Corteza                 | 1.319.154                     | 7,4%       |
| Otros                                   | 2.741.321                     | 15,4%      |

Fuente: Elaboración Propia.

Los RAE generados por la industria del aserrío se dividen principalmente en seis tipos de residuos; viruta, despuntes, aserrín (primario), lampazo, corteza y aserrín de elaboración. Para este estudio, se consideró únicamente la utilización de corteza, cuyo aporte fue de 24,8% de los RAE totales o el 7,4% del total de la madera destinada a la industria del aserrío. El total de RAE, en forma de corteza árboles, para Chile en el año 2015 se calcula mediante la ecuación a continuación.

$$RAE \text{ en Forma de Corteza} = 17.740.467 \text{ m}^3 \times 0,0744 = 1.319.154 \text{ m}^3$$

*Ecuación 8: Calculo de la producción de RAE en forma de corteza árboles para Chile en el año 2015.*

*Tabla 10: Distribución de los distintos RAE generados por la industria del aserrío en Chile para el año 2015.*

| Tipo de RAE | Porcentaje de Participación |
|-------------|-----------------------------|
| Viruta      | 4,3%                        |

<sup>13</sup> RAE: Residuos aprovechables energéticamente.

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Despunte              | 2,1%   |
| Aserrín (Primario)    | 52,0%  |
| Lampazo               | 14,5%  |
| Corteza               | 24,8%  |
| Aserrín (Elaboración) | 2,3%   |
| Total                 | 100,0% |

Fuente: (Gysling & Soto, 2016).

### 3.3.2. Residuo Disponible en Forma de Corteza Para las Regiones VII y VIII

Para las regiones VII y VIII, las cuales en función de las múltiples ventajas que demuestran fueron seleccionadas para la ubicación de la central de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno, la producción de RAE fue del 71,1% del total en Chile para el año 2015 (Gysling & Soto, 2016).

$$RAE \text{ en Forma de Corteza} = 5.307.773 \text{ m}^3 \times 0,260 \times 0,248 = 342.245 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

*Ecuación 9: Cálculo de la producción de RAE en forma de corteza árboles para VII Región en el año 2015.*

$$RAE \text{ en Forma de Corteza} = 5.307.773 \text{ m}^3 \times 0,451 \times 0,248 = 593.664 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

*Ecuación 10: Cálculo de la producción de RAE en forma de corteza árboles para VIII Región en el año 2015.*

*Tabla 11: RAE generados en forma de corteza de árboles por la industria del aserrio en las regiones VII y VIII para el año 2015.*

| Región | % de RAE | RAE (m <sup>3</sup> /año) | % de corteza en RAE | Corteza (m <sup>3</sup> /año) |
|--------|----------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|
|--------|----------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|

|       |       |           |       |         |
|-------|-------|-----------|-------|---------|
| VII   | 26,0% | 1.380.021 | 24,8% | 342.245 |
| VIII  | 45,1% | 2.393.806 |       | 593.664 |
| Total | 71,1% | 3.773.827 | 24,8% | 935.909 |

Fuente: Elaboración Propia.

Según (Gysling & Soto, 2016) en el año 2015, del volumen total de RAE generados en forma de corteza de árboles en Chile el 71,6% se comercializa (véase Tabla 12). El restante 28,4% se destinaba al autoconsumo, acumulación y se regalaba.

*Tabla 12: Destino de los RAE en forma de corteza de árbol generados en Chile.*

| Destino del Residuo | Volumen Anual (m <sup>3</sup> ) | Porcentaje |
|---------------------|---------------------------------|------------|
| Comercialización    | 944.418,00                      | 71,6%      |
| Autoconsumo         | 360.048,00                      | 27,3%      |
| Acumulación         | 9.070,00                        | 0,7%       |
| Regala              | 5.618,00                        | 0,4%       |
| Total               | 1.319.154,00                    | 100%       |

Fuente: (Gysling & Soto, 2016).

Aplicando estos porcentajes a los 935.090 m<sup>3</sup> de RAE generados en forma de corteza de árboles para las regiones VII y VIII, se obtiene que para el año 2015 el potencial de corteza de árboles comercializable fue de 670.043 m<sup>3</sup>.

*Tabla 13: Destino de la corteza de árboles para las regiones VII y VIII.*

| Destino del Residuo | Porcentaje | Cantidad Anual de Corteza Disponible en Regiones VII y VIII (m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|---------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------|

|                  |       |         |
|------------------|-------|---------|
| Comercialización | 71,6% | 670.043 |
| Autoconsumo      | 27,3% | 255.446 |
| Acumulación      | 0,7%  | 6.435   |
| Regala           | 0,4%  | 3.986   |
| Total            | 100%  | 935.909 |

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4. Tamaño de la Central y Potencial de Generación de Hidrógeno

#### 3.4.1. Estimación del Tamaño de la Central

Se tiene como supuesto que existe el potencial de comercialización de RAE en forma de corteza de árboles de 670.043 m<sup>3</sup> en las regiones VII y VIII.

Para poder hacer una estimación de la cantidad de hidrógeno que podrá producir la planta de gasificación de corteza de árboles, es necesario hacer una estimación de la masa de corteza con la cual se alimentará el gasificador. Se utilizará como supuesto de diseño poder adquirir el 30% de la corteza disponible para la comercialización anual en dichas regiones.

Teniendo en cuenta el supuesto anterior, la cantidad de corteza de árboles (húmeda) que ingresaría a la central de gasificación sería de 201.012 m<sup>3</sup>/año.

$$RAE \text{ en Forma de Corteza Adquirida} = 670.043 \frac{m^3}{año} \times 0,30 = 201.012 \frac{m^3}{año}$$

*Ecuación 11: RAE en forma de corteza de árboles (húmeda) adquirida por la central de gasificación.*

Para estimar la masa de dicha biomasa, se toma como referencia una densidad promedio para la corteza de pino radiata de 300 kg/m<sup>3</sup> (Murphy & Cown, 2015). Por lo tanto, el

peso (húmedo) de la corteza de árbol a ser procesada por la central de gasificación es de 60.303.860 kg/año.

$$\text{Peso de la Corteza} = 201.012 \frac{m^3}{año} \times 300 \frac{kg}{m^3} = 60.303.860 \frac{kg}{año} = 66.487 \frac{ton}{año}$$

*Ecuación 12: Peso de la RAE en forma de corteza de árboles (húmeda) adquirida por la central de gasificación.*

Teniendo en cuenta una humedad aproximada del 50% para la corteza que entra a la central de gasificación, el peso de la corteza seca sería de 30.151.935 kg/año.

$$\begin{aligned} \text{Peso de la Corteza (seca)} &= 60.303.860 \frac{kg}{año} \times 0.50 = 30.151.935 \frac{kg}{año} \\ &= 33.243 \frac{ton}{año} \end{aligned}$$

*Ecuación 13: Peso de la RAE en forma de corteza de árboles (seca).*

Para realizar la estimación del flujo de biomasa que deberá manejar la central de gasificación, se asume que la misma operará de lunes a viernes, cumpliendo con turnos diarios de diez (10) horas. El flujo de alimentación de biomasa hacia el gasificador sería de 11.597 kg/hora.

$$\begin{aligned} \text{Flujo de Biomasa} &= 30.151.935 \frac{kg}{año} \times \frac{1 año}{52 semana} \times \frac{1 semana}{5 días op} \times \frac{1 días op}{10 horas op} \\ &= 11.597 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

*Ecuación 14: Flujo de alimentación de biomasa al gasificador.*

#### 3.4.2. Potencial de Generación de Hidrógeno

Para estimar el rendimiento de producción de la central de gasificación de corteza de árboles en gramos de H<sub>2</sub> por kg de corteza seca, se recurrió a la bibliografía. Existen diversos estudios en los cuales se ha desarrollado el diseño del proceso para gasificadores específicos alimentados con distintos tipos de biomasa.

Según (Lau & Bowen, 2002), el rendimiento en gramos de  $H_2$  por kg de corteza seca para un gasificador operando en condiciones similares fue de 78,1 para el bagazo, 84,1 para el panicum virgatum y 88,3 para la cascara de nuez.

La simulación del proceso para los tres casos se desarrolló utilizando un modelo de gasificador patentado por GTI (Gas Technology Institute) y el programa de diseño y simulación de proceso Hysys®. El modelo empleado en la simulación utiliza un banco de datos de GTI que contiene información detallada de distintos tipos de biomasa. El modelo predice balances de masa y energía, incluyendo composiciones de gas de síntesis, cenizas y salidas de petróleo/alquitrán, en función de las propiedades medidas en la biomasa utilizada en la alimentación.

Dado que la composición elemental y el poder calorífico superior e inferior del pino radiata es muy similar a las tres especies revisadas en el estudio en mención, se ha considerado utilizar estos valores de rendimiento de hidrógeno por cantidad de corteza luego de un proceso de secado.

Se crearán tres escenarios para la estimación de producción de hidrógeno a partir de la gasificación de corteza de árboles. Los tres escenarios serán uno pesimista, otro intermedio y uno optimista. El escenario pesimista considerara el rendimiento del bagazo, el escenario intermedio el de la especie panicum virgatum y el optimista el de la cascara de nuez.

*Tabla 14: Rendimiento de producción de  $H_2$  para la central de gasificación de corteza de árboles.*

| Tipo de Escenario                              | Pesimista | Intermedio | Optimista |
|------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| Rendimiento $gH_2/kg$ biomasa                  | 75        | 80         | 85        |
| Biomasa Seca Ingresada al Gasificador (kg/día) | 115.969   |            |           |

|                                                                |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Masa de H <sub>2</sub> Producida por día (kg)                  | 8.698   | 9.278   | 9.857   |
| Volumen de H <sub>2</sub> Producido por día (nm <sup>3</sup> ) | 104.268 | 111.219 | 118.170 |

Fuente: Elaboración Propia.

### **3.5. Descripción y Selección de Elementos Para el Proceso de Operación de la Planta de Gasificación**

#### **3.5.1. Selección del Tipo de Biomasa**

En el caso del reactor para gasificación de residuos forestales, específicamente corteza de árbol, en el sur de Chile se considera que las especies con una mejor viabilidad para ser utilizadas son el Pino Radiata, el Eucalyptus Nitens y el y Eucalyptus globulus.

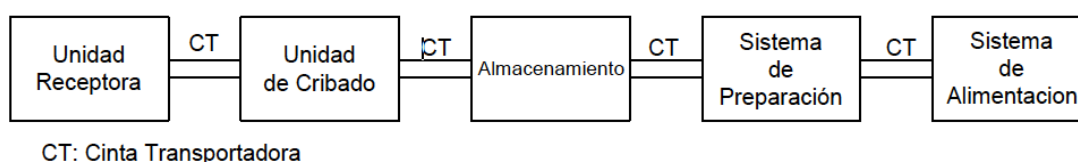
Se ha seleccionado utilizar la corteza del Pino Radiata como principal recurso combustible del gasificador puesto que el 67,0% del consumo de madera en trozos para uso industrial en Chile corresponde a esta especie de madera. En segundo lugar, se considera el uso de la corteza del Eucalyptus Nitens que participa con el 17,3% del consumo total. Por último, el Eucalyptus Globulus que participa con el 14,3%.

#### **3.5.2. Recepción, Almacenamiento y Manejo de la Biomasa**

El transporte y la manipulación de la biomasa son uno de los aspectos principales de una planta de biomasa; dado que el transporte, la preparación del combustible y la alimentación son más importantes para la biomasa que para las unidades alimentadas con carbón o gas de petróleo. Sin embargo, existe un desafío importante en el diseño de una planta de conversión de biomasa debido a la gran variabilidad de la densidad aparente de la biomasa.

El sistema de manejo de biomasa para la central de gasificación de corteza de árboles en el sur de Chile comprende los siguientes componentes:

- Unidad receptora de corteza
- Sistemas de cribado
- Unidad de almacenamiento
- Unidad de preparación de biomasa
- Sistema de transporte
- Sistema de alimentación de biomasa



*Imagen 25: Diagrama de los sistemas de recepción, almacenamiento y manejo de la biomasa. Fuente: Elaboración Propia.*

#### 3.5.2.1. Unidad Receptora

La planta de gasificación recibirá los residuos de biomasa provenientes de los aserraderos a través de camiones de distribución con elevadores que inclinarán el vagón de carga para descargar el material por gravedad.

Dentro de la planta existirá un muelle de descarga donde el elevador del camión se inclina, logrando un ángulo que permite que toda la carga caiga en el conducto receptor bajo gravedad.

Este método de recepción para los residuos a utilizarse en el gasificador ha sido seleccionado por ser rápido, sencillo, eficaz y económico.

#### 3.5.2.2. Unidad de Cribado

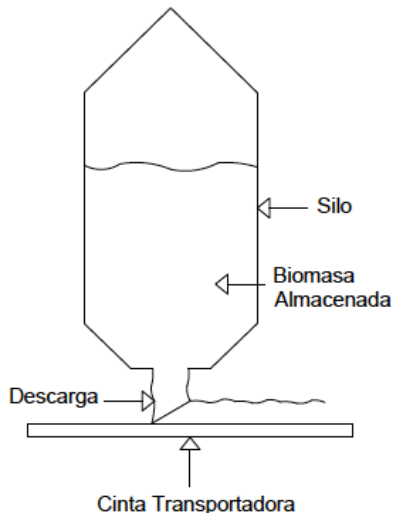
Desde la unidad receptora se mueven mediante cintas transportadora la biomasa a una estación de cribado. En esta estación se retiran los elementos extraños que puedan contener los residuos que llegan a la central de gasificación.

Después de eliminar los materiales extraños no deseados, la biomasa se tritura y se tamiza al rango de tamaño deseado y luego se transporta a las unidades de almacenamiento.

### 3.5.2.3. Unidad de Almacenamiento

El objetivo principal del almacenamiento es retener o almacenar la biomasa en condiciones óptimas y en una posición conveniente, para luego ser transferida hacia la etapa de preparación.

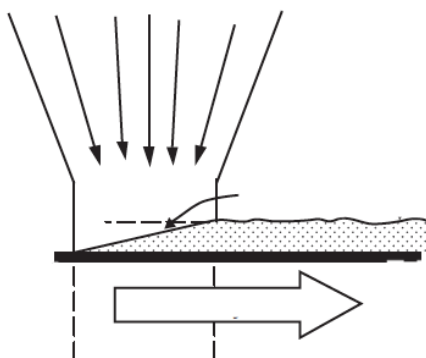
Para la planta de gasificación de corteza de árboles se propone el almacenamiento de la biomasa en silos cerrados con el fin de asegurar su cobertura. Los silos proporcionan almacenamiento temporal para la biomasa, en un entorno protector. Después de eliminar los materiales extraños no deseados en el proceso de cribado, la trituración y su tamizado al rango de tamaño deseado, se transporta la biomasa a los silos.



*Imagen 26: Diagrama del silo para almacenamiento de biomasa. Fuente: Elaboración Propia.*

Es importante considerar durante la fase de diseño del silo la presión estática, puesto que debido a su altura la presión dentro del mismo aumenta enormemente, desde la parte superior a la inferior.

Para que la operación del sistema de almacenamiento de biomasa sea exitosa, es necesario lograr un flujo de masa adecuado a la salida. Para lograr esto, se colocará la descarga de biomasa en la parte inferior del silo. La boquilla descargará a la cinta transportadora, la cual transportará la biomasa hacia el sistema de preparación (véase Imagen 27).



*Imagen 27: Descarga de biomasa en la base del silo. Fuente: Elaboración Propia.*

Sin embargo, es importante destacar que la biomasa está compuesta por partículas no uniformes. Por este motivo, posee un comportamiento distinto al de un líquido. Por lo tanto, es común que existan problemas para lograr una descarga con un flujo de masa uniforme.

Para reducir estos problemas, y evitar fallas durante la descarga debido a arqueo de biomasa en la descarga del silo o material estancado en las paredes interiores del silo, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Las paredes del silo deben ser suficientemente lisas para permitir un flujo adecuado de masa. Para mejorar la suavidad de la superficie de las paredes del silo, se aplicará un revestimiento liso de láminas de poliuretano.
- El ángulo de las paredes del silo debe ser lo suficientemente empinado para forzar el flujo de sólidos en las paredes.
- La descarga del silo debe ser lo suficientemente grande como para evitar que se arquee y para lograr la velocidad de descarga adecuada.

El diseño del silo implica determinar las propiedades de las partículas, como la fricción entre partículas, permeabilidad de las partículas, compresibilidad de las partículas y la fricción entre partículas y la pared del silo. Con estas propiedades conocidas, se encuentran el tamaño de salida, el ángulo del silo y la velocidad de descarga.

#### 3.5.2.4. Sistema de Preparación de Biomasa

La corteza de árboles recibida en la central de gasificación proveniente desde los aserraderos, no se puede alimentar directamente al gasificador para las siguientes razones debido a la presencia de materiales extraños, altos niveles de humedad y tamaños no acordes a los requeridos para la operación del gasificador.

El sistema de preparación de biomasa contiene las siguientes etapas:

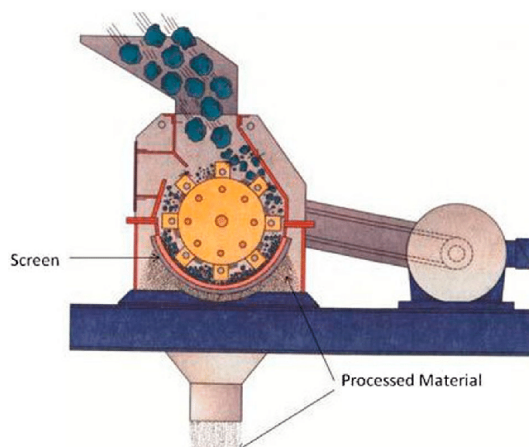
- Removedor de piedras
- Removedor de elementos metálicos
- Reductor de tamaño (cortadores)
- Secado

El dispositivo removedor de piedras a utilizar usara vibración en conjunto con un flujo de aire para estratificar materiales de mayor peso de acuerdo con su gravedad específica, separando las piedras de los residuos de biomasa.

Con el propósito de eliminar los elementos metálicos, previo al ingreso de las cortezas a los cortadores, se colocarán imanes potentes para separar el hierro y otros materiales magnéticos. Los imanes se encontrarán en varios puntos a lo largo de la cinta transportadora, suspendidos sobre esta, entre el removedor de piedras y los cortadores. Posteriormente, los elementos metálicos se descargarán en otro punto, separados de la corriente de biomasa

Una vez removidas las piedras y elementos metálicos de la corriente de corteza de árboles, la misma pasa a un molidor que reducirá el tamaño de los trozos al adecuado para alimentar al gasificador. Al ser un gasificador de lecho fluidizado burbujeante, se recomienda que el mismo sea alimentado con un tamaño de partícula fino, alrededor de

los 20 mm. Para esta aplicación se propone utilizar un molino de martillos (Hammermill), donde la corteza entrará a un molino y posteriormente será aplastada por martillos.



*Imagen 28: Vista de molino de martillos (Hammermill) típico. Fuente: Design, construction and performance evaluation of a flat screen hammer mill machine.*

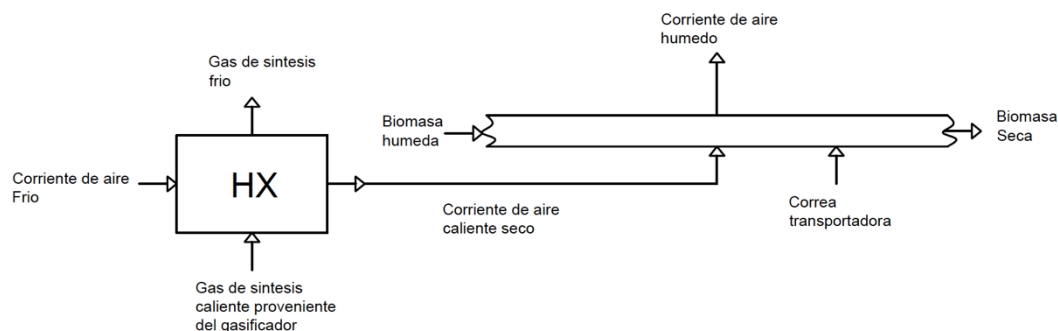
La corteza de árboles recién cortada puede contener entre un 40-60% de humedad superficial cuando se cosecha, siendo esta ligeramente más elevada que la de los trozos de madera. Dado que la gasificación de biomasa generalmente requiere un contenido de humedad alrededor del 10-15%, es necesario considerar un sistema de secado previo para la corteza de árboles que ingresara al gasificador.

El principal objetivo de reducir el contenido de humedad de la biomasa que ingresara al gasificar es disminuir la pérdida de energía dentro del gasificador. Cada kilogramo de humedad presente en la biomasa necesita aproximadamente 2300 kJ de energía para vaporizarse y otros 1500 kJ para elevarse a la temperatura típica de operación del gasificador, entre los 700-800 °C.

Es posible reducir la humedad de la superficie de la corteza de árboles mediante el uso del calor sensible en el gas de síntesis del gasificador. Para lograr el secado previo de la biomasa se propone el uso de un secador de tipo correa.

El proceso operativo del secador de tipo correa consiste en transportar la biomasa húmeda sobre una cinta transportadora perforada en movimiento con un sistema de

ventiladores por debajo, para secar el material en un proceso continuo. Los ventiladores soplan aire caliente a través de la cinta transportadora perforada. El aire caliente se genera a partir de un intercambiador de calor que transfiere el calor residual del gas de síntesis producido en el gasificador a una corriente de aire fría.



*Imagen 29: Diagrama del sistema de secado de biomasa. Fuente: Elaboración Propia.*

Según lo expuesto por (Li, et al., 2011), se ha seleccionado el secador del tipo correa dado que presentan las siguientes ventajas técnicas en relación a otras estrategias de secado:

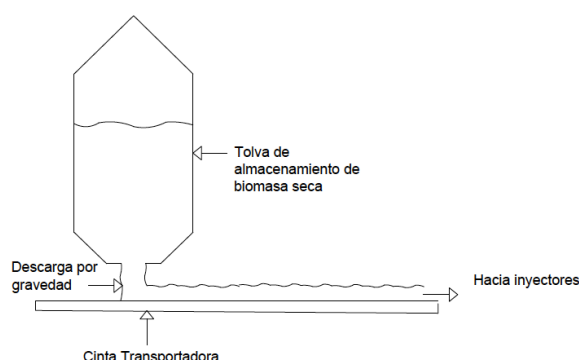
- Operación a bajas temperaturas.
- Bajo riesgo de ignición, por lo cual se reduce la posibilidad de incendios.
- Amplio rango de porcentaje de humedad de la biomasa ingresada para secado, entre 45-72%.
- Bajo requerimiento térmico.
- No requiere que la biomasa este pulverizada.
- Bajas emisiones de GEI.
- El sistema en general posee una complejidad técnica sencilla.

#### 3.5.2.5. Sistema de Alimentación e Inyección

La alimentación de la biomasa al gasificador es la última etapa del sistema de recepción, almacenamiento y manejo de la biomasa dentro de la planta de gasificación para la producción de hidrógeno.

El sistema de alimentación seleccionado para transportar la biomasa desde la tolva de biomasa seca hacia el sistema de inyección de biomasa al gasificador es un alimentador de correa (véase Imagen 30). Este tipo de sistema es recomendado para biomasa con las características de la corteza de árboles, ya que son muy efectivos para alimentar biomasa que no fluye libremente y que es cohesiva, fibrosa, gruesa, elástica, pegajosa o voluminosa (Basu, 2013).

El sistema de alimentación consiste en mover mediante una correa transportadora la biomasa, desde la salida por gravedad de la tolva de almacenamiento de biomasa seca hacia los inyectores.



*Imagen 30: Sistema de alimentación de biomasa. Fuente: Elaboración Propia.*

Como sistema de inyección de biomasa se ha seleccionado el de tipo superficial. Este tipo de inyector alimenta al gasificador con biomasa combustible por encima del lecho fluidizado.

Los sistemas de inyección por encima del lecho fluidizado se caracterizan por manejar partículas más gruesas (aproximadamente 20 mm) que los alimentados por debajo del lecho (entre 8-10 mm). Adicionalmente, los sistemas de inyección por encima del lecho permiten manejar biomasa con un mayor contenido de humedad que los inyectores por debajo del lecho.

Como se ha mencionado anteriormente, usualmente los sistemas de alimentación encima del lecho fluidizado consisten en un sistema compuesto de trituradoras, alimentadores gravimétricos, pequeños contenedores de almacenamiento y cintas transportadora.

La elección del sistema de inyección por encima del lecho fluidizado se fundamenta en que, al requerir un menor triturado de la biomasa, un menor secado previo y consistir en un sistema de complejidad relativamente representa una reducción considerable en la inversión inicial dentro la sección de recepción, almacenamiento y manejo de la biomasa dentro de la planta de gasificación en estudio.

#### 3.5.2.6. Sistema de Transporte

Para el transporte de la biomasa entre los distintos sistemas de la central de gasificación de biomasa se ha seleccionado la tecnología de cinta transportadora de cadena. Esta selección se basa en que su instalación posee una huella inferior a una cinta transportadora. Además, posee un costo de instalación y un gasto energético menor que un sistema de transporte neumático.

#### 3.5.3. Selección del Gasificador

##### 3.5.3.1. Tipo del Gasificador

Debido a la gran inercia térmica<sup>14</sup> y la adecuada mezcla del combustible en los gasificadores de lecho fluidizado, se puede gasificar una gama más amplia de combustibles o una mezcla de ellos. Esta característica es especialmente atractiva para su implementación al utilizar combustibles de biomasa, como los residuos agrícolas y la madera, que pueden estar disponibles para la gasificación en diferentes épocas del año.

Además, el hecho de poder gasificar una mezcla de cortezas de distintas especies de árboles como el Pino Radiata, Eucalyptus Nitens y Eucalyptus Globulus es fundamental para la implementación de un gasificador en el Sur de Chile. Esto, debido a que estas tres especies tienen una participación relevante en el mercado de los aserraderos en la región, por lo cual se recibirían residuos de estas tres especies.

---

<sup>14</sup> Inercia térmica: El grado de lentitud con que la temperatura de un cuerpo se aproxima a la de su entorno

Por estas razones, muchas actividades de desarrollo en la gasificación de biomasa a gran escala se centran en tecnologías de lecho fluidizado.

#### 3.5.3.2. Agente Gasificante

Como agente gasificante en el reactor de lecho fluidizado se ha seleccionado la utilización de vapor de agua. Esta selección está basada en el hecho de que el vapor de agua maximiza la producción de hidrógeno en el gas de síntesis.

A pesar de que el uso de oxígeno puro mejora la producción de CO en relación a la producción de H<sub>2</sub>, el uso de vapor de agua como agente gasificante dentro del reactor tiene las siguientes ventajas relativas en relación al oxígeno puro:

- El costo de una unidad productora de vapor de agua es mucho menor que una unidad de producción de oxígeno.
- El proceso de gasificación con vapor de agua es menos intensivo en uso energético que al utilizar oxígeno puro.

En relación al uso de aire como agente gasificante, al emplear vapor de agua se evita la dilución del gas de síntesis debido al nitrógeno presente en el aire.

### 3.6. Método de Separación del Hidrógeno

El gas de síntesis producto del proceso de gasificación resulta ser una corriente de gas uniforme, cuya composición consiste en una mezcla de distintos compuestos, principalmente en hidrógeno (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>).

Con el propósito de separar el hidrógeno de esta corriente de gases, para su posterior comercialización, es necesario utilizar un método de limpieza de gas (gas cleaning) y purificación. Durante estos procesos, además de lograr aislar el hidrógeno de la corriente de gases, también se logra eliminar impurezas gaseosas y partículas no deseadas.

El método de separación y purificación del gas de síntesis seleccionado para la planta de gasificación de corteza de árboles en estudio es a través de unidades de separación criogénica. El principio operativo del método de separación criogénica es la

condensación parcial de gases a baja temperatura. Las unidades de separación criogénica funcionan enfriando el gas y condensando algunos, o todos, los componentes de la corriente del gas de síntesis.

Se propone la implementación de este método, puesto que la temperatura de condensación del hidrógeno es mucho menor que la de los demás compuestos que componen la corriente de aire. Por este motivo, es posible enfriar el gas de síntesis mediante varias etapas, hasta alcanzar la condensación de todos los compuestos, exceptuando el hidrógeno.

*Tabla 15: Temperatura de condensación de distintos compuestos presentes en el gas de síntesis.*

| Compuesto                                   | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CO        | N <sub>2</sub> |
|---------------------------------------------|----------------|-----------------|-----------|----------------|
| Punto de Condensación a Presión Atmosférica | -252.9 °C      | -78.5 °C        | -191.5 °C | -195.8 °C      |

Fuente: Elaboración Propia.

Las unidades criogénicas ofrecen la ventaja de poder separar una variedad de productos de una corriente de alimentación única. De esta manera es posible separar los distintos compuestos que integran el gas de síntesis, teniendo una gran ventaja al lograr la separación directa del monóxido de carbono (CO).

La recuperación de hidrógeno está en el rango de 95% v/v (porcentaje de volumen/volumen), con una pureza superior al 98% v/v obtenible, por lo cual es un método bastante eficiente y que otorga un producto de una pureza alta.

La separación criogénica se considera típicamente como la tecnología de separación más termodinámicamente eficiente. Otra de las principales ventajas de este método de separación es que una tecnología probada y utilizada ampliamente en la actualidad aplicaciones de mediana a gran escala, por lo cual se reduce el desafío tecnológico durante su implementación.

El proceso para la central en estudio consiste en utilizar un proceso de separación criogénico mediante el cual el monóxido de carbono y los otros gases que componen la corriente de alimentación se licuan en varios pasos hasta que se produce hidrógeno con una pureza del orden del 98%.

El monóxido de carbono condensado, que contendría metano, se destila para producir monóxido de carbono puro. La corriente de monóxido de carbono se hará pasar a través de un reactor en donde por medio de la reacción WGSR, se logrará una producción adicional de hidrógeno ( $H_2$ ).

La corriente de hidrógeno resultante del sistema de separación se espera que tenga una pureza del orden del 99,7% v/v.

### **3.7. Almacenamiento, Transporte y Distribución del Hidrógeno**

#### **3.7.1. Almacenamiento del Hidrógeno en la Central**

Dentro de la central de producción de hidrógeno a partir de gasificación de corteza de árboles se propone almacenar el hidrógeno en forma líquida. Para esto se instalarán unidades de enfriamiento que lleven el hidrógeno producido, a una temperatura por debajo de su punto de licuefacción, a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente el hidrógeno será llevado a tanques de almacenamiento de hidrógeno criogénico, en los cuales se almacenará hasta que el mismo sea despachado hacia sus puntos de consumo.

El almacenamiento en forma criogénica ha sido seleccionado para su implementación en la central, debido a que es la tecnología más ventajosa para el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno por periodos de tiempo medios o largos. Sin embargo, la licuefacción es un proceso intensivo en energía. Las estimaciones de consumo energético son de aproximadamente 12.5 a 15.0 kWh/kg para licuefacción (Sheffield & Martin, 2014). El tamaño de los tanques puede variar de  $1.5\text{ m}^3$  (100 kg) a  $75.0\text{ m}^3$  (5,000 kg) (Sheffield & Martin, 2014).

Para estimar la capacidad de licuefacción y el tamaño de los tanques de almacenamiento criogénico de la central de gasificación, se consideran las tasas de generación de hidrógeno para cada uno de los tres escenarios, operación de la planta de licuefacción de diez (10) horas diarias y un tiempo de almacenamiento de hidrógeno en sitio de siete (7) días. Se consideran tanques de 75 m<sup>3</sup>.

$$\text{Tasa de Licuefaccion} \left( \frac{kg}{h} \right) = \frac{kg \text{ H}_2}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ dia}}{\text{horas operativas diarias}}$$

*Ecuación 15: Tasa de licuefacción de la unidad criogénica (kg/h).*

*Capacidad de Almacenamiento (m<sup>3</sup>)*

$$= \frac{kg \text{ H}_2}{\text{dia}} \times 7 \text{ dias} \times \frac{14,12 \text{ litros H}_2}{1 \text{ kg H}_2} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2}{1000 \text{ litros H}_2}$$

*Ecuación 16: Capacidad de almacenamiento de hidrógeno criogénico (m<sup>3</sup>).*

$$\# \text{ de tanques de almacenamiento} = \frac{\text{Capacidad de Almacenamiento (m}^3\text{)}}{75 \text{ m}^3}$$

*Ecuación 17: Cálculo del número de tanques de almacenamiento de hidrógeno criogénico.*

*Consumo Energetico (MWh)*

$$= \frac{kg \text{ H}_2}{\text{dia}} \times \frac{5 \text{ dias}}{1 \text{ semana}} \times 52 \text{ semanas} \times \frac{13,75 \text{ kWh}}{kg \text{ H}_2} \times \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}}$$

*Ecuación 18: Consumo energético anual de la central de licuefacción (MWh).*

El cálculo de las características del sistema de almacenamiento criogénico de la central se realizó para los tres tipos de escenario.

*Tabla 16: Resumen de las características del sistema de almacenamiento criogénico de la central de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno.*

| Tipo de Escenario                       | Pesimista | Intermedio | Optimista |
|-----------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| Rendimiento gH <sub>2</sub> /kg biomasa | 75        | 80         | 85        |

|                                                          |        |        |        |
|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Masa de H <sub>2</sub> Producida por día (kg)            | 8.698  | 9.278  | 9.857  |
| Tasa de Licuefacción (kg/h)                              | 870    | 928    | 986    |
| Capacidad de Almacenamiento (m <sup>3</sup> )            | 860    | 917    | 974    |
| # de Tanques de Almacenamiento                           | 11     | 12     | 13     |
| Consumo Energético del Proceso de Licuefacción (MWh/año) | 31.094 | 33.167 | 35.240 |

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.7.2. Transporte y Distribución del Hidrógeno desde la Central

El transporte del hidrógeno, desde la central de gasificación hacia los puntos de consumo se hará de manera terrestre y marítima.

En una primera etapa, desde la central de gasificación se moverán camiones especiales, como líquido criogénico en tanques de doble pared y con aislamiento al vacío, para evitar pérdidas. Este transporte se hará desde la central de gasificación, la cual estará ubicada entre la VII y VII hasta Puerto Coronel.

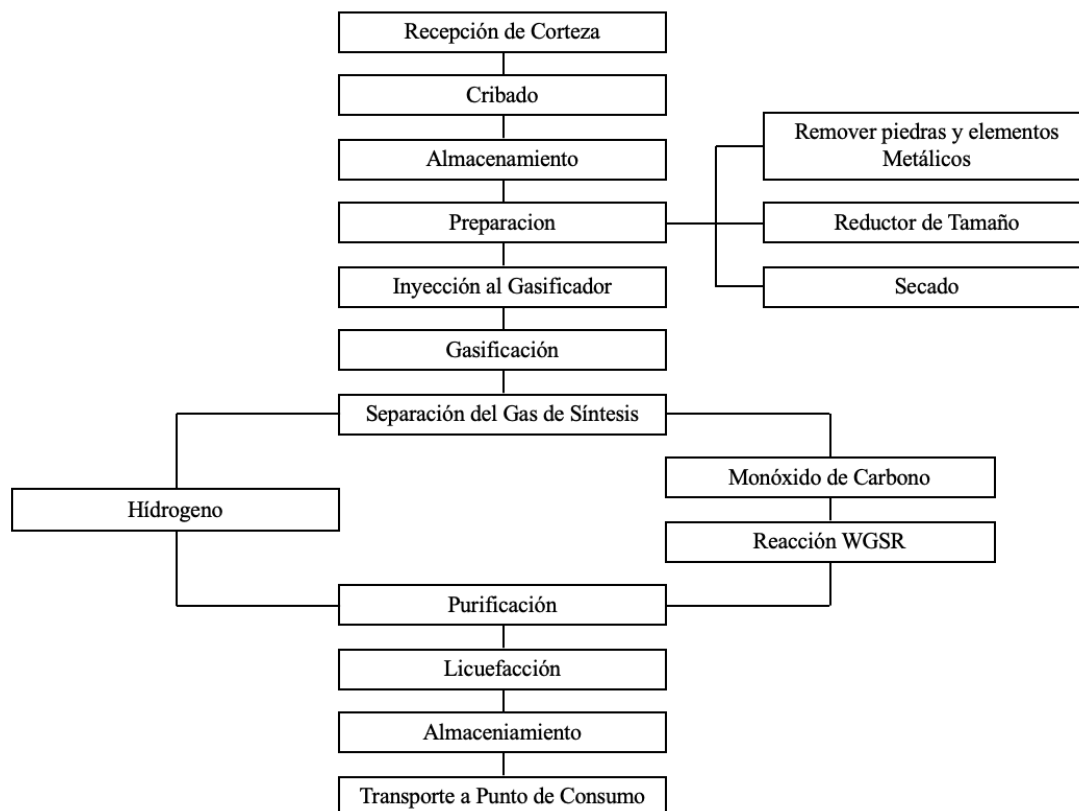
En Puerto Coronel se hará la entrega del hidrógeno criogénico, para que sea transportado hasta los puntos de consumo. El transporte marítimo del hidrógeno criogénico será proporcionado por alguna empresa especialista en transporte de combustibles.

### 3.8. Proceso Productivo Propuesto

Cada una de las etapas consideradas en el proceso productivo propuesto para la generación de hidrógeno a partir de la gasificación de corteza de árboles en el sur de Chile, fueron basadas en información bibliográfica asociada al desarrollo de la tecnología actual, proveedores de equipos e información de otros proyectos similares.

El proceso de producción de hidrógeno se ha sido utilizado durante mucho tiempo, principalmente a partir del uso de combustibles fósiles. Por lo tanto, cada uno de las etapas del proceso están basadas en tecnologías probadas.

La central de gasificación para la producción de hidrógeno se puede dividir en cuatro secciones o etapas principales; la sección de recepción y tratamiento de la biomasa, la sección del proceso de gasificación, la sección de separación y purificación del gas de síntesis y la etapa de almacenamiento y transporte del hidrógeno.



*Imagen 31: Proceso productivo de la planta de generación de hidrógeno propuesta.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

### 3.9. Diagrama de la Planta de Gasificación

El proceso de la planta de gasificación comienza con mover mediante cintas transportadores la corteza de árboles desde el almacenamiento hasta el secador. En el

secador, el contenido de humedad de la biomasa se reducirá de un 50% hasta un 10% aproximadamente. Posteriormente cintas transportadoras moverán la biomasa seca hasta el sistema de inyección.

La biomasa seca, en conjunto con vapor de agua, se inyectará al reactor para generar las reacciones de gasificación. El gas de síntesis, producto del proceso de gasificación, será extraído por gravedad, en la parte superior del reactor. El gas de síntesis caliente se hará pasar por un intercambiador de calor para disminuir su temperatura y aprovechar su energía, generando el vapor de agua necesario para las reacciones de gasificación y del WGSR. En una segunda etapa de reducción de temperatura del gas de síntesis, posterior a su ingreso por el primer intercambiador de calor, la corriente de gas se hace pasar por el secador de biomasa para aprovechar la energía que aun contiene.

La corriente fría del gas de síntesis se hace pasar por un separador criogénico de gases, el cual permite separar todos los gases que forman parte de la corriente. En esta etapa, se separa para su aprovechamiento el hidrógeno y el monóxido de carbono. El monóxido de carbono se hace pasar a través de un reactor WGSR, con el propósito de producir hidrógeno adicional.

Posteriormente, ambas corrientes de hidrógeno se hacen pasar por una planta de licuefacción para llevarlas a estado líquido y almacenarlas en los tanques de almacenamiento para su posterior despacho.

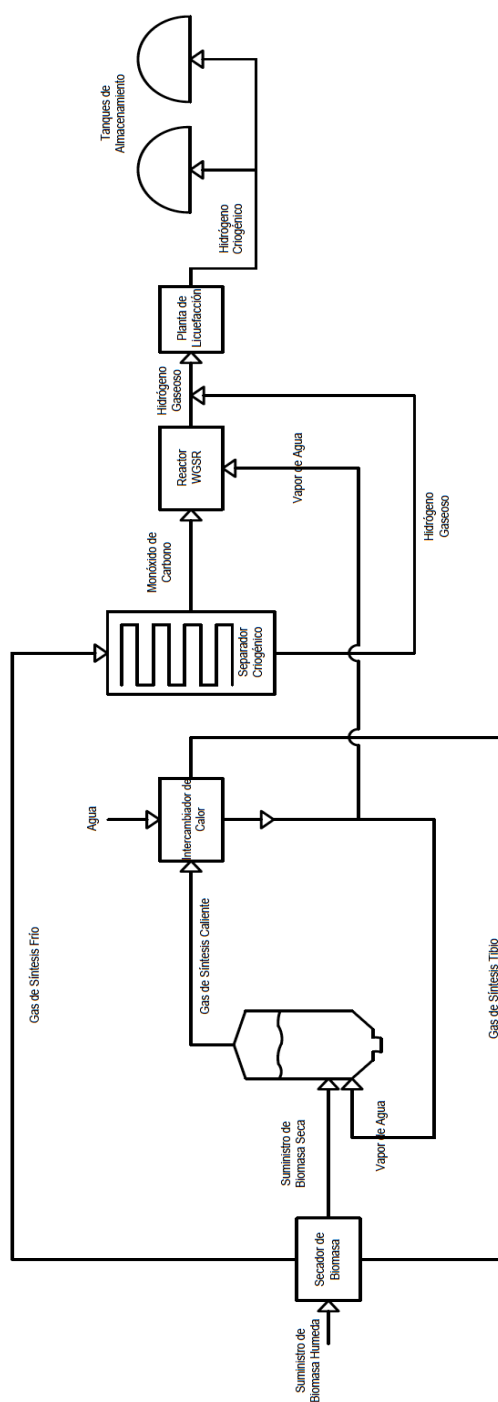


Imagen 32: Diagrama de la planta de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno. Fuente: Elaboración Propia.

## **Capítulo 4: Análisis de Costos de la Instalación y de Producción**

### **4.1. Costos del Hidrógeno en la Actualidad**

A nivel mundial, el hidrógeno tiene muchas aplicaciones. El hidrógeno que se produce y distribuye en Chile se utiliza principalmente para procesos en refinerías, así como para algunas aplicaciones en el campo de la alimentación y procesos especiales. En Chile, las empresas encargadas de la producción y comercialización de hidrógeno son Linde Chile S.A, Hidrógenos del Biobío e Indura.

Se considera que la implementación de esta central pueda suplir la demanda de hidrógeno que se produzca a partir de la industria en Chile o países aledaños, la futura demanda producto de la implementación del transporte en la industria minera o la incursión de vehículos con celdas combustibles.

En la actualidad, los costos de comercialización del hidrógeno son de entre USD \$10,00 a USD \$16,00 por kg para la venta en pequeños volúmenes, y entre USD \$5.00 a USD \$7,50 para la comercialización de grandes volúmenes. La meta actual es llevar estos costos a USD \$7,00 por kg para pequeños volúmenes y a USD \$4,00 por kg para grandes volúmenes (U.S. Department of Energy, 2017).

Para un proyecto de gasificación de biomasa para la producción de hidrógeno, poder considerarse rentable económicamente, el costo de producción debe oscilar entre los USD \$2,00 a USD \$4,00 por kg (U.S. Department of Energy, 2017). El costo de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles oscila entre los USD \$1,00 a USD \$2,00 por kg.

Hoy en día, existen proyectos de gran tamaño a nivel mundial para gasificación de biomasa para la producción de hidrógeno que están generando a USD \$0,92 el kg de hidrógeno. De igual forma, existen proyectos de tamaño medio generando entre USD \$1,21 a USD \$2,19 el kg de hidrógeno (Parthasarathy, & Narayanan, 2014).

## 4.2. Inversión Inicial

La inversión inicial del proyecto incluye todos los gastos de diseño, construcción y puesta en operación de la central. Los elementos considerados en los costos de capital para la inversión inicial son la ingeniería, costos del terreno, sistema de tratamiento de la biomasa, sistema de secado, sistema de gasificación, sistema de separación del gas de síntesis, reactor WGSR y sistema criogénico de hidrógeno.

Los costos de ingeniería, sistema de tratamiento de la biomasa, sistema de secado, sistema de gasificación, sistema de separación del gas de síntesis y reactor WGSR se estimaron en función de la energía anual (GJ/año) de biomasa que ingresan a la central (Lau & Bowen, 2002). Teniendo en cuenta la cantidad de corteza de árboles adquirida anualmente y el poder calorífico de la misma, se estimó que la energía anual ingresada al reactor es de 1.261.556 GJ.

Los costos estimados en la bibliografía fueron estimados para una central de gasificación en el año 1987, por lo cual se ajustó el valor a través el multiplicador 2,27, el cual representa adecuadamente la influencia de la inflación hasta el año 2020.

El costo del terreno se estimó en USD \$10,00 por m<sup>2</sup> para un terreno de 10.000 m<sup>2</sup>.

Por su parte, la unidad de separación criogénica de hidrógeno, la cual representa una parte importante de la inversión inicial de la central de gasificación, se estimó mediante la metodología determinada por el U.S. Department of Energy En esta ecuación N representa el número de unidades de licuefacción, en caso de ser la capacidad menor a 200.000 kg/día se colorará 1 unidad. La variable C corresponde a la cantidad de toneladas por día a licuar. La variable I ES el índice general de costos de la planta de ingeniería química (I=1,16 para las estimaciones de costos que se presentarán en 2016 USD \$) (Conelly, Penev, Elgowainy, & Hunter, 2019).

$$\text{Costo Capital de U.L} = N \times 1.000.000 \times 5,6 \times C^{0,8} \times I$$

$$\begin{aligned} \text{Costo Capital de U.L} &= 1 \times 1.000.000 \times 5,6 \times 9,278 \frac{\text{ton}^{0,8}}{\text{dia}} \times 1,16 \\ &= 38.601.973,72 \text{ USD} \end{aligned}$$

*Ecuación 19: Calculo de costo de inversión para el sistema criogénico.*

*Tabla 17: Resumen de los costos inversión inicial para la planta de gasificación de corteza de árboles.*

| Elemento                  | Corteza (GJ/ año) | Costo (USD \$-ano/GJ) a 1987 | Costo (USD \$-ano/GJ) a 2020 | Total (USD \$) |
|---------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| Terreno                   | -                 | -                            | -                            | 100.000,00     |
| Ingeniería y Construcción | -                 | -                            | -                            | 1.431.866,18   |
| Manejo de Biomasa         | 1.261.556         | 1,00                         | 2,27                         | 2.863.732,36   |
| Secado de Biomasa         |                   | 1,00                         | 2,27                         | 2.863.732,36   |
| Gasificador               |                   | 1,50                         | 3,41                         | 4.295.598,53   |
| Separado de Gas y WGSR    |                   | 1,50                         | 3,41                         | 4.295.598,53   |
| Total                     |                   |                              |                              | 15.850.527,96  |

Fuente: Elaboración Propia.

El total de costos de inversión para la central de gasificación de corteza de árboles para la producción de hidrógeno sería de USD \$54.452.500. A este valor se le asignará un 5% para considerar imprevistos, por lo cual el costo de inversión a considerar será de USD \$57.175.125.

### 4.3. Costos Fijos

Los costos fijos corresponden a los gastos en los que se debe incurrir, sin importar el nivel de producción de la planta de gasificación. Los gastos fijos considerados son:

- Diez operarios de planta con un salario de 500.000 CLP o USD \$600,00 cada uno mensuales.
- Un encargado de administración de planta con un salario de 700.000 CLP o USD \$850,00 mensuales.
- Reemplazo de piezas y mantenimiento por el monto de USD \$10.000,00 mensuales.

*Tabla 18: Tabla resumen de los costos fijos anuales.*

| Rubro                      | Unidades | Costo Mensual<br>(USD \$) | Total Anual<br>(USD \$) |
|----------------------------|----------|---------------------------|-------------------------|
| Salarios Operarios         | 10,00    | 600,00                    | 72.000,00               |
| Salarios<br>Administración | 1,00     | 850,00                    | 10.200,00               |
| Mantenición                | 1,00     | 10.000,00                 | 120.000,00              |
| Total                      |          |                           | 202.200,00              |

Fuente: Elaboración Propia.

### 4.4. Costos Variables

Los costos variables son aquellos en los cuales se incurre en el proceso productivo, y son totalmente proporcionales al volumen de producción. Los costos variables asociados al proyecto en estudio son costo de la compra de la corteza de árboles y consumo eléctrico.

Teniendo en cuenta que el costo de la materia prima (corteza de árboles) para el año 2015 es de 2.300 CLP/m<sup>3</sup>, considerando un IPC del 4,70% entre el año 2015 y la

actualidad el costo de compra seria de 2.410 CLP/m<sup>3</sup>. Se calcula el costo anual de la materia prima en función de la demanda anual del gasificador propuesto, que es de 60.303.829 kg/año.

$$\begin{aligned} \text{Costo M.P} &= 60.303.860 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{300 \text{ kg}} \times 2.410 \frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \\ &= 484.441.009 \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \times \frac{\text{USD}}{825 \text{ CLP}} = 587.201,22 \frac{\text{USD}}{\text{año}} \end{aligned}$$

*Ecuación 20: Costo anual de la corteza de árbol a utilizar en la central de gasificación.*

El consumo eléctrico de la central de gasificación se calcula considerando la potencia estimada de los elementos eléctricos de la central y multiplicándolos por el periodo de operación diario de 10 horas.

*Tabla 19: Calculo de consumo energético para los principales elementos de la recepción y tratamiento de la biomasa.*

| Elemento              | Potencia kW | Horas Diarias | Días | Semanas | MWh/año |
|-----------------------|-------------|---------------|------|---------|---------|
| Cintas Transportadora | 25          | 10            | 5    | 52      | 65,00   |
| Sistema de Cribado    | 5           | 10            | 5    | 52      | 13,00   |
| Sistema de Molienda   | 160         | 10            | 5    | 52      | 416,00  |
| Total                 | 190         |               |      |         | 494,00  |

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto al secador de biomasa, se utilizaron datos de la industria para estimar el consumo eléctrico del secador. Se considera, que la corteza ingresa a la central de gasificación con un contenido de humedad del 50%. Posterior al cribado, molienda, almacenamiento de la biomasa y aprovechamiento del calor residual del gas de síntesis se estima que el contenido de humedad de la biomasa será del 30%.

El sistema de secado de biomasa debe ser capaz de reducir el contenido de humedad de la biomasa del 30% al 10%. Se estima que el flujo de agua a evaporar a partir de la biomasa es de 4.638,75 kg/h. Según el fabricante Haarslev, se selecciona secador tipo correa de 192 kW modelo SBD 3000/13.

$$\begin{aligned}
 & M.A \text{ Evap} \left( \frac{kg}{h} \right) \\
 &= 60.303.860 \frac{kg \text{ biomasa}}{\text{año}} \times 0,2 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ biomasa}} \times \frac{\text{año}}{2600 \text{ horas operativas}} \\
 &= 4.678,75 \frac{kg}{h}
 \end{aligned}$$

*Ecuación 21: Tasa de evaporación del secador de biomasa.*

*Consumo Energetico (MWh) =*

$$= 192 \text{ kW} \times \frac{5 \text{ dias}}{1 \text{ semana}} \times 52 \text{ semanas} \times \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} = 499,2 \text{ MWh}$$

*Ecuación 22: Consumo energético del secador de biomasa.*

El consumo energético del proceso de separación y almacenamiento criogénico es de 31.094 MWh/año para el escenario pesimista, 33.167 MWh/año para el escenario intermedio y 35.240 MWh/año para el escenario optimista.

Para estimar el costo anual, se considera que la central de gasificación de biomasa adquiere un PPA (Power Purchase Agreement) a 20 años por un costo de USD \$45,00 por MWh.

*Tabla 20: Estimación del costo anual de la energía eléctrica utilizada por la central de gasificación de biomasa.*

| Tipo de Escenario       | Pesimista | Intermedio | Optimista |
|-------------------------|-----------|------------|-----------|
| Recepción y Preparación | 494,0     | 494,0      | 494,0     |
| Sistema de Secado       | 499,2     | 499,2      | 499,2     |

|                                      |              |              |              |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Proceso de Licuefacción<br>(MWh/año) | 31.094,2     | 33.167,1     | 35.240,1     |
| Total (MWh/año)                      | 32.087,4     | 34.160,3     | 36.233,3     |
| Costo PPA (USD<br>\$/MWh)            | 45,00        |              |              |
| Costo Anual (USD \$)                 | 1.443.931,28 | 1.537.213,77 | 1.630.496,25 |

Fuente: Elaboración Propia.

*Tabla 21: Tabla resumen de los costos variables anuales.*

| Tipo de Escenario                               | Pesimista    | Intermedio   | Optimista    |
|-------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Costo Anual de<br>Energía Eléctrica<br>(USD \$) | 1.443.931,28 | 1.537.213,77 | 1.630.496,25 |
| Costo Anual de<br>Materia Prima                 | 587.201,22   | 587.201,22   | 587.201,22   |
| Total Anual (USD \$)                            | 2.031.132,50 | 2.124.414,99 | 2.217.697,47 |

Tabla resumen de los costos variables anuales. Fuente: Elaboración Propia.

#### **4.5. Análisis de Sensibilidad**

Para evaluar el proyecto se estimaron los flujos de caja, y a través de los mismos se calculó el VAN y el TIR.

El valor actual neto (VAN) es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para estimar cuánto dinero se va a ganar o perder con esa inversión. Consiste en traer todos los flujos de caja al momento presente descontándolos a un tipo de interés determinado. Si el VAN del proyecto es positivo, se

considera que es factible desarrollarlo; si por el contrario el VAN es negativo, no conviene desarrollar el proyecto.

La tasa interna de retorno (TIR) se define como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado. Al igual que el VAN, es utilizada como un criterio de inversión.

Las consideraciones implementadas en la evaluación económica del proyecto son las siguiente:

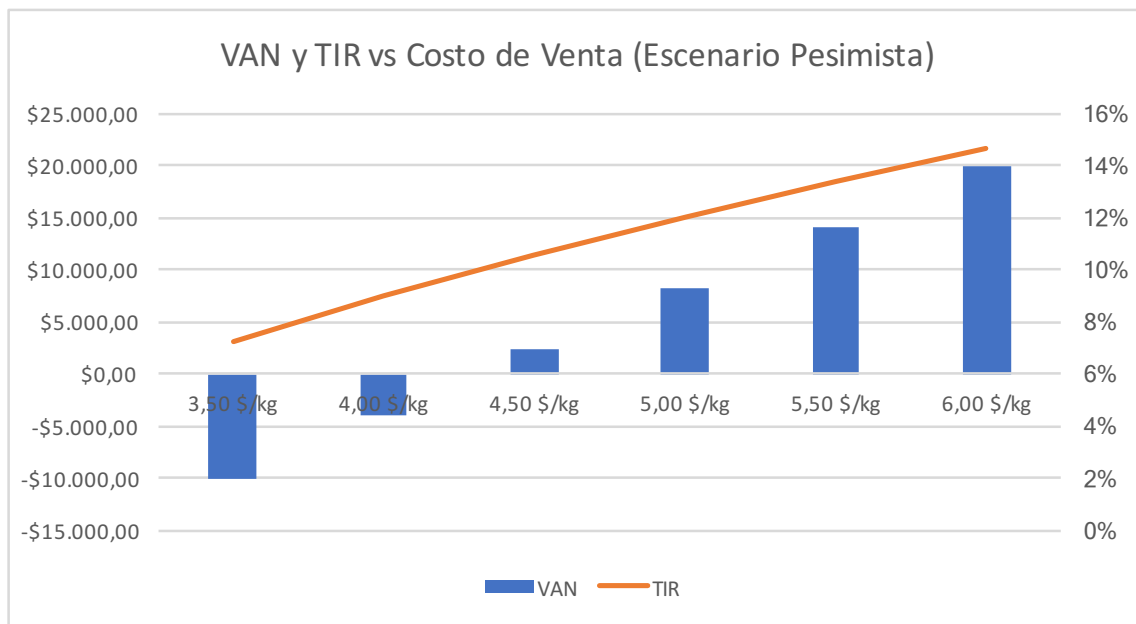
- La tasa de descuento seleccionada fue del 10%.
- El proyecto se evaluará mediante la utilización de fondos propios. No se considerará financiamiento.
- El periodo de evaluación del proyecto fue a 30 años.
- Tasa de impuesto del 19%.
- Depreciación acelerada del proyecto en 7 años.
- Construcción del proyecto en 3 años, con una asignación de fondos de 3,9% en el año -3, 29,0% en el año -2, 47,5% en el año -1 y 19,7% en el año 0.
- Los costos de venta son de hidrógeno licuado y almacenado de forma líquida en la central de gasificación. No se incluye el costo de transporte terrestre y/o marítimo.

*Tabla 22: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario pesimista.*

| Costo de Venta | VAN              | TIR |
|----------------|------------------|-----|
| 3,50 USD \$/kg | -USD \$ 10.120,5 | 7%  |
| 4,00 USD \$/kg | -USD \$ 3.898,2  | 9%  |
| 4,50 USD \$/kg | USD \$ 2.252,9   | 11% |
| 5,00 USD \$/kg | USD \$ 8.216,1   | 12% |

|                |                 |     |
|----------------|-----------------|-----|
| 5,50 USD \$/kg | USD \$ 14.113,2 | 13% |
| 6,00 USD \$/kg | USD \$ 20.010,2 | 15% |

Fuente: Elaboración Propia.



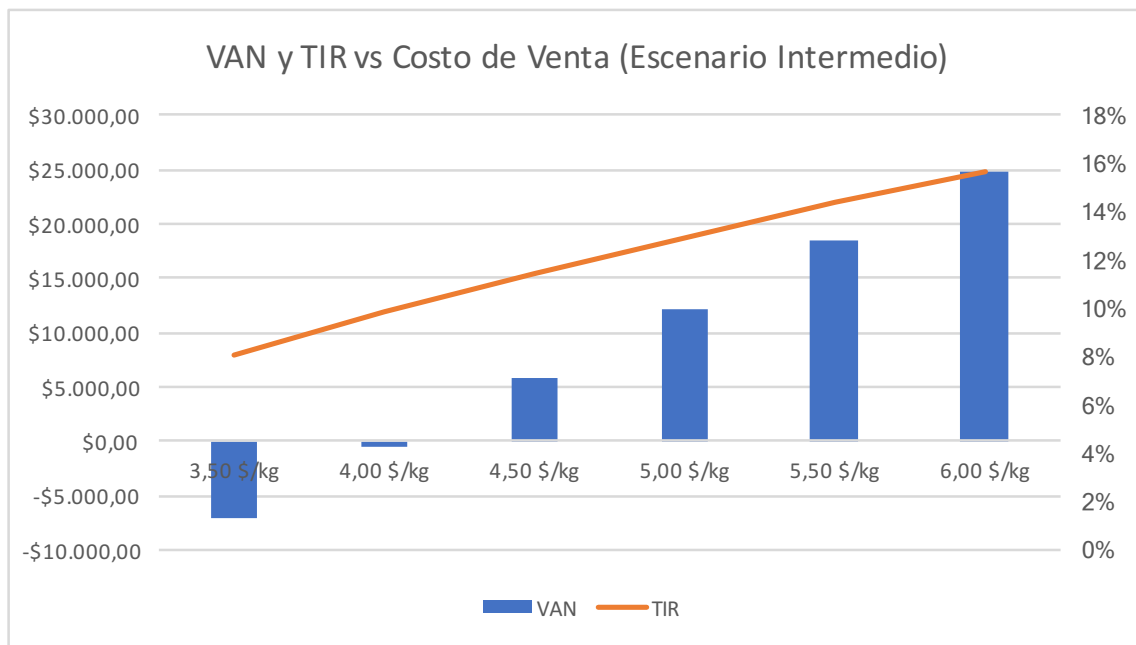
*Imagen 33: Grafico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario pesimista. Fuente: Elaboración Propia.*

*Tabla 23: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario intermedio.*

| Costo de Venta | VAN             | TIR |
|----------------|-----------------|-----|
| 3,50 USD \$/kg | -USD \$ 7.209,9 | 8%  |
| 4,00 USD \$/kg | -USD \$ 613,3   | 10% |
| 4,50 USD \$/kg | USD \$ 5.852,4  | 11% |
| 5,00 USD \$/kg | USD \$ 12.142,1 | 13% |

|                |                 |     |
|----------------|-----------------|-----|
| 5,50 USD \$/kg | USD \$ 18.431,7 | 14% |
| 6,00 USD \$/kg | USD \$ 24.721,4 | 16% |

Fuente: Elaboración Propia.



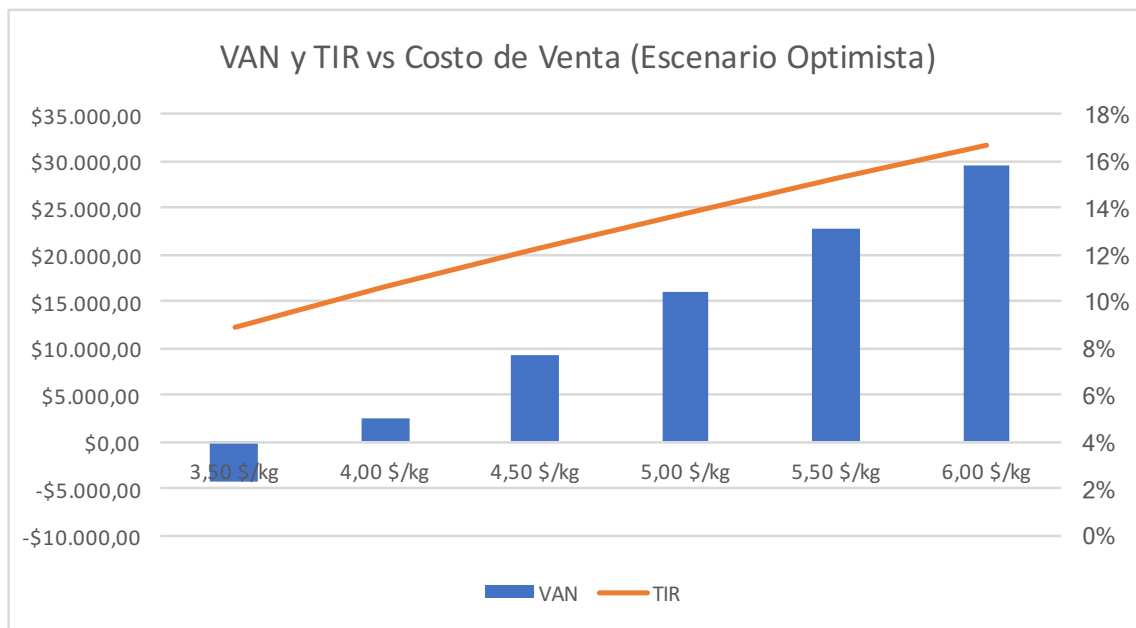
*Imagen 34: Gráfico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario intermedio. Fuente: Elaboración Propia.*

*Tabla 24: Resumen del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario optimista.*

| Costo de Venta | VAN             | TIR |
|----------------|-----------------|-----|
| 3,50 USD \$/kg | -USD \$ 4.309,3 | 9%  |
| 4,00 USD \$/kg | USD \$ 2.662,9  | 11% |
| 4,50 USD \$/kg | USD \$ 9.396,8  | 12% |
| 5,00 USD \$/kg | USD \$ 16.080,2 | 14% |

|                |                 |     |
|----------------|-----------------|-----|
| 5,50 USD \$/kg | USD \$ 22.763,7 | 15% |
| 6,00 USD \$/kg | USD \$ 29.447,1 | 17% |

Fuente: Elaboración Propia.



*Imagen 35: Gráfico del VAN y TIR vs distintos costos de venta para el escenario optimista. Fuente: Elaboración Propia.*

Según los análisis desarrollados para el escenario de potencial de generación pesimista e intermedio de hidrógeno el VAN es positivo para un precio de venta de USD \$4.00 a USD \$4.50 por kg de hidrógeno; por otra parte, en el escenario de generación optimista el VAN es positivo para precios de venta ligeramente inferiores a USD \$4.00 por kg de hidrógeno.

## CONCLUSIONES

En base al proyecto desarrollado, se puede concluir que la implementación de una planta de gasificación de corteza de árboles en el sur de Chile, es una alternativa factible desde el punto de vista técnico y económico.

Se llevó a cabo una revisión técnica del hidrógeno y sus usos en la actualidad, en la cual se pudo observar las ventajas ambientales y energéticas que entrega su uso, principalmente, cuando la fuente a partir de la cual es renovable. Los usos del hidrógeno son multisectoriales, entre las principales aplicaciones se encuentra la refinación de petróleo, industria química, producción de acero, el sector transporte, la generación de energía y el sector edificación.

A nivel nacional, la principal demanda de hidrógeno se suple a través de la producción local, desarrollada por Linde Gas Chile S.A. e Hidrógenos Biobío. Ambas centrales producen hidrógeno a partir del reformado de metano, por lo cual la fuente de producción es a través de combustibles fósiles. Es importante destacar que no existen en la actualidad normas específicas en cuanto a la producción, uso y manejo del hidrógeno, pero sí para el manejo de gases industriales.

Los principales residuos generados por la industria maderera son corteza, lampazo, aserrín, viruta y despuntes. De estos residuos se seleccionó la utilización de la corteza, debido a su abundancia y potencial de comercialización, así como al bajo costo del mismo. Las especies seleccionadas para utilizar su corteza fueron el Pino radiata, el cual aporta el 67,0% consumo de madera en trozos para uso industrial, el Eucalyptus nitens participa que con el 17,3% y Eucalyptus globulus con el 14,3%.

Se planea centrar el suministro de la corteza de árboles a partir de medianos y grandes aserraderos, los cuales corresponden al 28.8% y 55.2% de la madera aserrada, respectivamente. El propósito es aumentar la cantidad de corteza recibida por la menor cantidad de proveedores. Reducir el número de proveedores disminuirá los problemas asociados a la logística de suministro del recurso, y además homogenizaría la calidad.

La planta de gasificación debe establecerse en las cercanías de los centros de generación de residuos con el propósito de disminuir los costos de transporte de los mismos; por lo tanto, su ubicación estará entre VII y VIII región, en los alrededores de las ciudades de Concepción, Coronel o Chillán. Estas zonas concentran la mayor cantidad de aserraderos de la región, por lo cual la mayor generación de residuos en forma de corteza de árboles. Además, esta ubicación sería conveniente desde el punto de vista logístico, dada su cercanía a importantes puertos de la región del Biobío.

Durante el año 2015, la cantidad de madera destinada a la industria del aserrío fue de  $17.740.467 \text{ m}^3$ . Del total madera manejada por la industria del aserrío,  $8.372.219 \text{ m}^3$  o el 47,3%, se convirtió en madera aserrada destinada a la comercialización. A partir de la transformación de la madera cruda en productos terminados, se generó  $5.307.773 \text{ m}^3$  o el 29,9% en forma de residuos aprovechables energéticamente (RAE). El total de RAE, en forma de corteza árboles, para el año 2015 fue de  $1.319.154 \text{ m}^3$ . De este total, el 71,1% o  $935.909 \text{ m}^3$  se concentró en las regiones VII y VIII.

Del total de corteza de árboles comercializable en las regiones VII y VIII, se estimó concentrar el 30%, para ser suplido a la central de gasificación. Con este suministro, se estimó el potencial de producción de hidrógeno en  $8.659 \text{ kg/día}$  para un escenario pesimista,  $9.278 \text{ kg/día}$  para un escenario intermedio y  $9.857 \text{ kg/día}$  para un escenario optimista.

El proceso de la planta de gasificación comienza con cintas transportadoras para mover la corteza de árboles desde el almacenamiento hasta el secador. Posteriormente, cintas transportadoras moverán la biomasa seca hasta el sistema de inyección. La biomasa seca, en conjunto con vapor de agua, se inyectará al gasificador de lecho fluidizado para generar las reacciones de gasificación. El gas de síntesis, producto del proceso de gasificación, será extraído por gravedad, en la parte superior del reactor. La corriente del gas de síntesis se hace pasar por un separador criogénico de gases, el cual permite separar todos los gases que forman parte de la corriente. En esta etapa, se separa para su aprovechamiento el hidrógeno y el monóxido de carbono. El monóxido de carbono se

hace pasar a través de un reactor WGSR, con el propósito de producir hidrógeno adicional. Posteriormente, ambas corrientes de hidrógeno se hacen pasar por una planta de licuefacción para llevarlas a estado líquido y almacenarlas en los tanques de almacenamiento para su posterior despacho.

El costo de la inversión inicial es de USD \$57.175.000, y este considera los costos de ingeniería, costos del terreno, sistema de tratamiento de la biomasa, sistema de secado, sistema de gasificación, sistema de separación del gas de síntesis, reactor WGSR y sistema criogénico de hidrógeno. Los costos fijos anuales son de USD \$202.000, y se tomó en cuenta administrador, operarios y costos de mantenimiento. A su vez, los costos variables anuales fueron estimados en USD \$2.031.000 para un escenario pesimista, USD \$2.124.000 para un escenario intermedio y 2.217.000 para un escenario optimista. La diferencia entre los costos variables anuales para cada uno de los escenarios se debe al consumo energético de la central de licuefacción, ya que este consumo será directamente proporcional a la cantidad de hidrógeno generado.

El proyecto se evaluó a un horizonte de 30 años. Según los análisis desarrollados para el escenario de potencial de generación pesimista e intermedio de hidrógeno el VAN es positivo para un precio de venta de USD \$4.00 a USD \$4.50 por kg de hidrógeno; por otra parte, en el escenario de generación optimista el VAN es positivo para precios de venta ligeramente inferiores a USD \$4.00 por kg de hidrógeno. Estos costos incluyen la generación y almacenamiento criogénico del hidrógeno.

El resultado del VAN para cada uno de los escenarios estudiados puede competir con los precios actuales del mercado identificados por el U.S Department of Energy. Los precios de comercialización del hidrógeno, U.S Department of Energy, son de entre USD \$10,00 a USD \$16,00 por kg para la venta en pequeños volúmenes, y entre USD \$5.00 a USD \$7,50 para la comercialización de grandes volúmenes. Por lo tanto, teniendo en cuenta el precio de venta del kg de hidrógeno a un valor rondando los USD \$4.00, para grandes volúmenes, resulta atractivo para el desarrollo de este proyecto.

## RECOMENDACIONES

Con el propósito de profundizar el presente estudio, a fin de evaluar de manera más profunda el proyecto de cara a su futura implementación, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Incrementar las horas operativas de la central. Actualmente la misma fue evaluada para un factor de planta del 30%. La central fue diseñada para un flujo de generación horario, por lo cual esta puede operar con un factor de planta mayor. Sin embargo, es necesario considerar todos los aspectos que esto involucraría.
- Estudiar la fluctuación de los costos del suministro de la corteza de árboles como RAE, en las regiones en estudio, a fin de optimizar el modelo económico.
- Estudiar distintos escenarios de horizonte de tiempo del proyecto y estrategias de financiamiento, a fin de hacerlo más atractivo económicamente.
- Estudiar la posibilidad de inyectar al gasificador de corteza de árboles en estudio, otro tipo de RAE. Esto a fin de aprovechar fluctuaciones de costos que puedan surgir entre los distintos tipos de residuos.
- Establecer las estrategias comerciales e identificar potencial clientes, a fin que permita el ingreso del producto al mercado y se facilite su distribución.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Energía. (2018). *Tecnologías del Hidrógeno y Perspectivas Para Chile*. Santiago de Chile.
- CNE. (2017). *Balance Nacional de Energía*. Santiago de Chile.
- Ministerio de Energía. (2015). *Politica de Uso de la Leña y sus Dereivados Para Calefacción*. Santiago de Chile.
- UPEL. (1998). *El Proyecto Factible: Una Modalidad de Investigación*. Caracas.
- Ministerio de Agricultura. (2018). *Anuario Forestal 2018*. Santiago de Chile.
- Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vásquez-Panizza, R., Arriaza, J., Morales, D., & Zulantay, M. (2011). *Bioenergía en Chile*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago de Chile.
- Gysling, J., & Soto, D. (2016). *Industria Forestal Primaria en Chile (Periodo 2005-2015)*. Ministerio de Agricultura, Santiago de Chile.
- College of the Desert. (2001). *Module 1: Hydrogen Properties*.
- College of the Desert. (2001). *Module 2: Hydrogen Use*.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. International Energy Agency, Japan.
- Zittel, Werner, & Wurster. (1996). *Advantages and Disadvantages of Hydrogen*.
- U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy . (2001). *Hydrogen Use*. Estados Unidos.
- Ministerio de Agricultura Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2016). *Estudio de Caracterización de la Cadena de Producción y Comercialización de la Industria Forestal: Estructura, Agentes y Práctica*. Santiago, Chile.
- Uehara, I. (2009). Separation and Purification of Hydrogen.
- Zittel, Werner, & Wurster. (1996). *Advantages and Disadvantages of Hydrogen*.

- Basile, A., & Iuanelli, A. (2014). *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*. Rende, Italy: Woodhead Publishing Series in Energy.
- Speight, J. (2019). *Heavy Oil Recovery and Upgrading*. Laramie, WY, United States: Gulf Professional Publishing-Elsevier.
- Kayfeci, M., Kecebaş, A., & Bayat, M. (2019). *Solar Hydrogen Production (Chapter 3)*. Department of Energy Systems Engineering, Karabuk University, Karabuk. Turquia: Academic Press.
- Padro, G., & Putsche, V. (1999). *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies*. National Renewable Energy Laboratory, USA.
- Parthasarathy,, P., & Narayanan, S. (2014). *Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield e A review*. Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli. India: Elsevier.
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2002). *The Study of Reactions Influencing the Biomass Steam Gasification Process*. Portugal: Elsevier.
- Singh, V., & Zhao, M. (2017). *Biomass Gasification*. Tsinghua University. Beijing: Elsevier.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Halifax, Canadá: Academic Press.
- Li, H., Chen, Q., Zhang, X., Finney, K., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2011). *Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study*. University of Sheffield, Sheffield University Waste Incineration Centre (SUWIC), Department of Chemical and Biological Engineering. Sheffield: Elsevier.
- Speight, J. (2015). *Gasification Processes for Syngas and Hydrogen Production*. USA: Elsevier.

- Nargess Puadian, N., Li, J., & Pang, S. (2014). *Analysis of Operation Parameters in a Dual Fluidized Bed Biomass Gasifier Integrated with a Biomass Rotary Dryer: Development and Application of a System Model*. University of Canterbury, Chemical and Process Engineering Department, New Zealand.
- Murphy, G., & Cown, D. (2015). Within-tree, between-tree, and geospatial variation in estimated *Pinus radiata* bark volume and weight in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*.
- Lau, F., & Bowen, D. (2002). *Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production by Gasification of Biomass*. U.S. Department of Energy, USA.
- Sheffield, J., & Martin, K. (2014). Electricity and hydrogen as energy vectors for transportation vehicles. En *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Missouri, USA: Woodhead Publishing.
- U.S. Department of Energy. (5 de Junio de 2017). Hydrogen Production & Delivery Program. USA.
- Carmona, R. (2015). *Caracterizacion, Física, Química y Energética de Biomasa Leñosa Como Materia Prima Biocombustible*. Cordoba.
- Conelly, E., Penev, M., Elgowainy, A., & Hunter, C. (2019). *Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs*. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, USA.