



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**INGENIERÍA DE PREFACTIBILIDAD PARA PLANTA DE RECICLAJE DE
MATERIALES COMPUESTOS (FRP)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

BYRON ENRIQUE VILLASEÑOR PALOMINOS

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO JORQUERA ENCINA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONEL NÚÑEZ LAZO
RODRIGO PALMA HILLERNS

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
DE LA INGENIERÍA
POR: BYRON VILLASEÑOR PALOMINOS
FECHA: AGOSTO 2021
PROF. GUÍA: PATRICIO JORQUERA ENCINA

INGENIERÍA DE PREFACTIBILIDAD PARA PLANTA DE RECICLAJE DE MATERIALES COMPUESTOS (FRP)

Los materiales compuestos o polímeros reforzados con fibra (FRP), son materiales compuestos por una matriz de resina, y el uso de fibras como refuerzo al conjunto, siendo la fibra de vidrio la más común. Estos materiales son ampliamente utilizados en la industria, dada sus atractivas propiedades mecánicas, como la resistencia a la corrosión, que le permite trabajar en ambientes agresivos, y su alta relación resistencia/peso.

Sin embargo, su utilización, al igual que otros plásticos, conlleva la dificultad de su tratamiento de residuos al fin de su vida útil. La falta de normativa que limiten y favorezcan alternativas más sustentables, como las limitadas opciones de reutilización y reciclaje existentes, han generado que el uso de vertederos sea la opción más utilizada por productores y consumidores de FRP.

Durante el proceso de producción de productos de FRP, se genera una alta cantidad de desechos, el cual es utilizado en este trabajo como fuente de material para reciclar. Este material de desecho es especialmente atractivo porque se presenta libre de impurezas, como pinturas o ácidos, lo que facilita su proceso de reciclaje. Se estudia además el material proveniente del fin de vida útil de las aspas de aerogeneradores, dado que los parques eólicos han aumentado considerablemente en Chile, y el desmantelamiento y tratamiento de los residuos de las aspas, presenta un desafío tanto a nivel nacional como internacional.

Dentro de las tecnologías de reciclaje que se han desarrollado en la actualidad, el reciclaje mecánico, el más sencillo y económico en la actualidad, considerando el bajo valor que representa la fibra de vidrio reciclada. Los procesos químicos y térmicos, que presentan un gran potencial de uso, especialmente por la valorización energética de la matriz y recuperación de fibras necesitan aún un mayor grado de desarrollo, para ser económicamente atractivas.

Se plantea utilizar el reciclaje mecánico como método de reciclaje de FRP, cuyo producto puede ser utilizado como reemplazo parcial de áridos finos (arena) en las mezclas de cemento. El análisis de prefactibilidad económica del proyecto se realizó bajo un horizonte de evaluación de 10 años. El proyecto presenta un bajo costo de inversión, y los indicadores económicos, como el VAN y la TIR son favorables para la realización del proyecto, tanto en escenarios normal como en pesimistas. Se plantea finalmente que el reciclaje de FRP requiere aún de un mayor desarrollo de las tecnologías de reciclaje, así como de legislaciones que fomenten un tratamiento de residuos más responsable con el medio ambiente.

A mi madre y padre.

Agradecimientos

Debo comenzar agradeciendo a mi familia, a mi mamá y papá, quienes desde pequeño me apoyaron y acompañaron, en búsqueda de lo mejor para desarrollarme como persona. Sin duda, es gracias a ustedes que he llegado a ser quien soy.

Quisiera agradecer también a mis compañeros y compañeras de carrera, Carlota, Cristóbal, Emiliano, Javier, Nathaniel, Paula, Ralf, Sebastián y Víctor. Por sus ayuda, consejos, conversaciones, pero por sobre todo los buenos momentos que pasamos más allá de lo académico.

Finalmente, agradezco al profesor Patricio Jorquera, por haberme asignado este tema para mi trabajo, y por su constante y genuino apoyo a lo largo de este semestre. Agradecer también a mis profesores integrantes, por sus comentarios y consejos para mejorar mi trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.3.3. Alcances	2
2. Metodología	3
3. Antecedentes	4
3.1. Usos típicos del FRP	6
3.2. Materiales compuestos al fin de su vida útil	7
3.3. Métodos de fabricación	8
3.3.1. Laminación manual	8
3.3.2. Aspersión o Spray Up	8
3.3.3. Inyección (Infusión o vacío)	9
3.3.4. Embobinado de filamentos (Filament winding)	9
3.3.5. Pultrusión	10
3.3.6. Sheet Moulding Compound (SMC)	10
3.3.7. Bulk Moulding Compound (BMC)	11
3.4. Caracterización de la industria del FRP en Chile	12
3.5. Marco legal	16
3.6. Estimación de material disponible para reciclar	17
3.6.1. Material de desecho en producción	17
3.6.2. Material proveniente de fin de vida útil	18
3.7. Tecnologías de reciclaje	21
3.7.1. Reciclaje mecánico	21
3.7.2. Pirólisis	21
3.7.3. Lecho fluidizado	22
3.7.4. Solvólisis	22
3.7.5. Valorización energética	22
3.8. Mercado de reciclado de FRP	23
4. Resultados	25
4.1. Selección de tecnología de reciclaje	25
4.2. Selección de ubicación de la planta	28
4.3. Diagrama de flujo del reciclaje mecánico	28

5. Evaluación económica	30
5.0.1. Producto a comercializar	30
5.0.2. Condiciones de evaluación del proyecto	31
5.0.3. Estrategia de financiamiento	31
5.0.4. Costos de inversión	32
5.0.5. Costos de equipos e instalación	32
5.0.6. Costos fijos	33
5.0.7. Costos variables	34
6. Análisis y discusión de resultados	39
7. Conclusiones	41
Bibliografía	43
A. Pago préstamo	45

Índice de Tablas

3.1.	Propiedades mecánicas de las fibras [3]	5
3.2.	Propiedades mecánicas fibras de vidrio [3]	5
3.3.	Propiedades mecánicas de las resinas [3]	6
3.4.	Localización de las empresas productoras en Chile [4]	12
3.5.	Procesos y tecnologías de fabricación empleados [4]	13
3.6.	Vinculación de materiales compuestos con otros materiales [4]	13
3.7.	Productos producidos por cada empresa en Chile [4]	14
3.8.	Mercados abastecidos por los productores [4]	15
3.9.	Generación de energía eólica año 2020	19
3.10.	Masa de materiales por cada kW producido [16]	19
3.11.	Material disponible para reciclar	20
5.1.	Costos de los equipos a adquirir.	32
5.2.	Costos de instalación.	33
5.3.	Costos de salarios de personal.	33
5.4.	Costo arriendo de galpón.	33
5.5.	Costos variables de la planta.	34

Índice de Ilustraciones

3.1.	Estimación desechos de FRP en Europa para año 2020.	7
3.2.	Proceso de laminación manual [3]	8
3.3.	Proceso de Spray up [3]	9
3.4.	Proceso de inyección	9
3.5.	Proceso de embobinado de filamentos	10
3.6.	Esquema proceso de pultrusión [10]	10
3.7.	Esquema proceso sheet moulding compund [14]	11
3.8.	Esquema proceso bulk moulding compound [14]	11
3.9.	Ciclo de vida de los productos	16
3.10.	Centrales eólicas en Chile	18
3.11.	FRP grueso y fino respectivamente, producto de reciclaje mecánico. [17]	21
3.12.	Modelo de puente a partir de aspa de aerogenerador	24
3.13.	Zona recreacional a partir de aspa de aerogenerador	24
4.1.	Demanda de energía por unidad de masa para distintos procesos de reciclaje. [6]	25
4.2.	Comparación entre energía demandada para producir fibra y recuperarla por medio de reciclaje [6]	27
4.3.	Diagrama de flujo del proceso de reciclaje mecánico	28

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

Los materiales compuestos, son materiales que se componen de dos elementos, una matriz, también llamada resina, a la que se le agrega un refuerzo, principalmente fibras. Esta unión de estructuras agrega al conjunto una mejora en las propiedades físicas y mecánicas, lo que ha generado que este tipo de material sea ampliamente utilizado en variados ámbitos de la industria, así como es distintos productos de uso cotidiano.

En búsqueda de una industria más responsable con el cuidado del medio ambiente, se hace necesario considerar un tratamiento responsable de estos materiales.

A nivel internacional, se han desarrollado políticas [1] que desincentivan tanto la eliminación ilegal de este tipo de materiales, mediante incineración, como el uso de vertederos como destino final al fin de vida útil, debido a problemas de espacio disponible que se hacen patentes en territorios con escasez de terreno, como por la búsqueda de opciones más sustentables, como la reutilización o el reciclaje.

En Chile, existe desde el año 2016 la *Ley de Responsabilidad Extendida del Productos* (Ley REP) [2], que tiene por objetivo responsabilizar a la industria por los productos y desperdicios generados, mediante la prevención es estos, y de la recuperación y reciclaje.

Dentro de esta ley, se establecen 6 tipos prioritarios de productos y/o materiales, respecto de los cuales las empresas importadoras y productoras deben hacerse responsables.

Esta ley representa la primera medida regulatoria que incentiva y responsabiliza a la industria para que se responsabilice por los desechos generados.

1.2. Motivación

Durante las últimas décadas, con el crecimiento de la población, la economía y los mercados, el aumento en el consumo de distintos materiales ha crecido en conjunto con el desarrollo de la humanidad.

La protección de los mares para mantenerlos libres de plásticos, el reciclaje y reutilización de materiales para el cuidado del medio ambiente, convergen en un mismo concepto: el tratamiento responsable de materiales y desperdicios al término de su vida útil.

Dentro de los distintos materiales y productos que se pretende buscar una alternativa al desecho en vertederos, se encuentran los materiales compuestos, o polímeros reforzados con fibra (FRP). Estos materiales presentan características que los hace muy atractivos, pero que generan dificultad para su tratamiento una vez llegan al fin de su vida útil. Este trabajo pretende entonces, estudiar una alternativa de reciclaje de materiales compuestos, a fin de evitar que estos terminen en vertederos o siendo incinerados.

1.3. Objetivos

En base a los antecedentes y motivación presentados, los objetivos del presente trabajo son los siguientes.

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un estudio de prefactibilidad de una planta de reciclaje de materiales compuestos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar tecnologías de reciclajes y seleccionar la que más se adecúe al mercado chileno.
- Estimar la producción de desechos, producto del fin de la vida útil de productos.
- Evaluar y seleccionar tecnología(s) que mejor se adapten al mercado chileno.
- Establecer una zona geográfica para instalar la planta.
- Analizar tecno-económicamente el proyecto presentado.

1.3.3. Alcances

Para el desarrollo de este trabajo, se seleccionará una o dos tecnologías de reciclaje, en base a un análisis técnico de estos métodos de reciclaje.

En cuanto a la evaluación económica, se definirá el flujo de proceso, así como las evaluaciones para un proyecto de mediano plazo (10 años.). Además, se considera la ubicación de la planta, así como un layout de la misma.

Capítulo 2

Metodología

Para la realización del presente trabajo, se trabajó del siguiente modo:

- Se revisó bibliografía y estado del arte de métodos de reciclaje para materiales compuestos, tanto a nivel nacional como internacional.
- Se realizó una estimación de la cantidad de material compuesto fabricado en Chile. Para esto, se estudió información de la agrupación de productores de FRP, y se conversó con profesionales de una empresa.
- Se estableció los tipos de productos que generan un desperdicio en su producción, los cuales se considera para la estimación de material total disponible. Además, se estima el material disponible de otro producto ampliamente utilizado, e importado en su mayoría, correspondiente a las aspas de los generadores eólicos.
- Se seleccionó la zona de ubicación de la planta, considerando las distintas etapas del proceso de reciclaje, y la cercanía con los distintos involucrados en el proceso.
- Se definieron los criterios de selección de la tecnología de reciclaje, considerando su madurez y experiencia internacional, así como su factibilidad económica en base a la realidad nacional.
- Se realizó el análisis económico del proyecto, donde se establecen los costos de inversión y operacional. Se obtuvieron resultados económicos relevantes, como el VAN, en distintos escenarios.
- Se revisó y corrigieron aspectos del proyecto, hasta la generación de un informe final.

Capítulo 3

Antecedentes

Los materiales compuestos son materiales que presentan una matriz, generalmente polimérica, a la cual se agregan fibras de otro material, que presenta propiedades mecánicas favorables para el uso en diversos ámbitos de la industria. Las primeras resinas se comenzaron a utilizar a principios del siglo XX, y hacia 1940 se comenzó a utilizar fibra de vidrio como fibra de refuerzo de estas resinas. A partir de 1960, se comenzaron a utilizar otro tipo de fibras, tales como la fibra de carbono, que otorga características de resistencia mejores que la fibra de vidrio. En la actualidad, existen distintos tipos de resinas y fibras en materiales compuestos, las cuales otorgan propiedades al conjunto del material, que han permitido que este material sea utilizado en distintos tipos de productos.

Dentro de estas propiedades, destacan:

- Alta relación resistencia peso: Las fibras presentan alta resistencia mecánica, lo que favorece la resistencia del material compuesto, particularmente en la dirección de las fibras. Esta característica permite disminuir el costo y pesos de estructuras, así como el mantenimiento de las mismas.
- Resistencia a la corrosión: esta característica hace a los materiales compuestos un atractivo para utilizar en medios agresivos, como son ambientes ácidos, marinos, y permite el reemplazo de estructuras metálicas.
- Versatilidad en el diseño: Dado que la matriz de estos materiales es de carácter polimérica, permite la fabricación de piezas grandes y pequeñas, con amplio rango de complejidad. Permite además generar piezas con un número reducido de uniones.
- Facilidad de instalación: Debido a que las estructuras de FRP presentan un bajo peso, en relación con sus pares fabricadas en acero, no es necesario la utilización de grandes equipos para instalar los productos de FRP, lo que permite además poder instalar piezas sin necesidad de detener procesos por el movimiento de equipos de traslado.

Estas características, han permitido un aumento en el uso de FRP a lo largo de diversas industrias, pues se presenta como una alternativa importante al reemplazo parcial o total de acero en determinados productos o instalaciones, lo que además disminuye los costos, así como el peso de las estructuras y productos.

Dentro de las fibras utilizadas en los materiales compuestos, la más utilizada corresponde a la fibra de vidrio. A continuación se presentan las propiedades mecánicas de algunos tipos de fibra más comunes:

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de las fibras [3]

Fibra	Densidad [g/cm ³]	Resistencia tracción [MPa]	módulo de Young [MPa]	Rango del diámetro [μm]
Vidrio-E	2,54	3.500	70.000	3 - 20
Vidrio-R	2,49	4.600	85.000	8 - 13
Kevlar 49	1,44	3.600	131.000	12
Grafito	1,80 - 1,90	2.000 - 4.000	240.000 - 400.000	8 - 13
Acero	7,86	350 - 2.100	210.000	—
Aleación de aluminio	2,70	150 - 600	70.000	—

Existen distintos tipos de vidrio a partir de los cuales se generan los filamentos. Se denominan con las letras A, E, C, AR y S. Los más comúnmente utilizados para refuerzo de productos son los tipos E (eléctrico), AR (Alcali Resistente) y C (con resistencia química).

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas para los distintos tipos de vidrio para fibras:

Tabla 3.2: Propiedades mecánicas fibras de vidrio [3]

Tipo de Vidrio	E	C	S	R
Densidad [g/cm ³]	2,56	2,45	2,49	2,58
Resistencia tracción [GN/m ²]	3,60	-	4,5	4,4
Punto de ablandamiento [°C]	850	690	-	990
Conductividad térmica [W/m °C]	1,04	-	-	-
Índice de refracción	1,545	1,549	-	-
Módulo de elasticidad [GN/m ²]	75,9	-	86,2	84,8

Las fibras en materiales compuestos pueden estar tejidas y tener distintas formas, así como poseer distintos diámetros. Dentro de las más comunes, se encuentran:

- Fieltro o Mat o Chopped Strand Mat (CSM): corresponden a fibras cortadas distribuidas aleatoriamente, con un largo que varía entre 2,5 y 5 cm. Son utilizados principalmente en laminación manual, laminados continuos y algunas aplicaciones en moldes cerrados. La calidad del apresto es la que define y permite una resistencia consistente en el material independiente de la dirección del filamento.

Las principales características del CSM son laminados con poca resina, fácil remoción de aire atrapado, moldeo continuo, utilización de vidrio tipo E, con un diámetro nominal de 11 micrones, con una densidad lineal del filamento de 30 tex.

- Telas o Tejidos o Woven Roving: Corresponden a un tejido grueso de fibras continuas, colocadas en forma vertical y horizontal. Se busca mantener una alta relación fibra/resina, pues esto genera la obtención de laminados muy fuertes por moldeo por contacto. Su utilización es principalmente como último laminado en estructuras grandes y resistentes. Las principales características son la compatibilidad con resinas de poliéster, viniléster, fenólicas y epóxicas, la generación de grandes piezas por medio de moldes y su alta resistencia mecánica en laminado.

La matriz de los materiales compuestos está constituida a partir de resinas. Existen diversos tipos de resinas, como la de poliéster (ortoftálica, isoftálica), bisfenólica, viniléster, epóxica, entre otras. La más utilizada corresponde a la resina poliéster, la cual se obtiene mediante la reacción de ácidos con glicoles. A continuación, se presentan las propiedades mecánicas de las resinas más utilizadas:

Tabla 3.3: Propiedades mecánicas de las resinas [3]

Resina	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Temperatura máxima [°C]
Epóxica	1,1 - 1,4	40 - 85	2.100 - 5.500	120
Poliéster	1,1 - 1,4	40 - 85	1.300 - 4.000	80
Poliamida	1,1 - 1,4	25 - 45	1.400 - 2.700	150
Viniléster	1,2 - 1,6	30 - 50	3.500	130

Las resinas más utilizadas para la fabricación de materiales compuestos, la epoxy y poliéster, son polímeros que forman una red tridimensional, con fuertes enlaces, que generan que al elevar la temperatura, las cadenas se compactan, lo que les entregan la característica de ser termoestables. Esta característica es muy favorable para su utilización en la industria, pues el material no se ve mayormente afectado ante cambios de temperatura en operación, o trabajo en temperaturas elevadas. Sin embargo, esta característica representa también un problema para el reciclaje de los materiales compuestos, pues los métodos, ya sea químicos o térmicos deben realizarse a alta temperaturas.

3.1. Usos típicos del FRP

Los materiales compuestos han alcanzado en las últimas décadas una relevancia considerable, debido a la incorporación de fibras de mayor calidad, como las fibras de carbono,

que otorgan excelentes propiedades mecánicas, y que permiten generar piezas más livianas, situación que ha llevado al aumento sostenido en el consumo de materiales compuestos a nivel mundial. A nivel internacional, el FRP se utiliza en grandes industrias, tales como las automotrices, aeroespaciales, y naval, como material para las cubiertas de automóviles, embarcaciones, aviones, entre otros.

En Chile, su uso en la construcción es amplio, utilizados en las fabricaciones de planchas para techos, escaleras, pisos. A nivel industrial, el uso de estanques y tuberías es amplio, debido en parte a la capacidad de trabajar en ambientes ácidos, lo que lo hace una excelente alternativa para las necesidades de la industria minera y la celulosa.

Además, su uso ha permitido disminuir los costos en los parques eólicos, cuyas aspas están constituidas en un alto porcentaje por materiales compuestos.

3.2. Materiales compuestos al fin de su vida útil

Los materiales compuestos, al igual que otros materiales, tales como el plástico, representan un peligro medioambiental si no son tratados correctamente una vez concluye su vida útil. En base a la regulación existente en Chile, los materiales compuestos no están catalogados como un residuo peligroso [2]. Sin embargo, tanto a nivel nacional como internacional, existe riesgo asociado al utilizar vertederos, en muchas ocasiones irregulares, para depositar este material al fin de su vida útil [1].

En países europeos¹, así como en Estados Unidos, el FRP es ampliamente utilizado para la construcción de embarcaciones de pequeño y mediano tamaño, las cuales, al acabar su vida útil, son desechados o abandonos en costas de ríos y océanos, generando un riesgo al ecosistema existente. Ante estas situaciones, algunas naciones europeas han comenzado a endurecer las normativas referentes al tratado de residuos al fin de su vida útil, con medidas como la generación o aumento de impuestos por utilizar vertederos como destino final de los materiales y productos, o prohibir directamente la utilización de vertederos, obligando de este modo tanto a productores como usuarios a buscar alternativas más limpias y sustentables para el medio ambiente. [1]

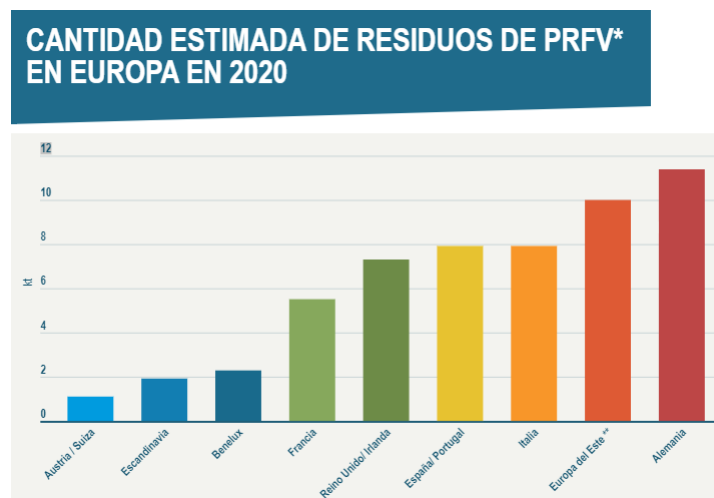


Figura 3.1: Estimación desechos de FRP en Europa para año 2020.

¹ <https://es.euronews.com/next/2019/03/11/aprendiendo-a-reciclar-miles-de-toneladas-de-fibra-de-vidrio>

En Chile, la normativa no es tan estricta, y aun cuando los materiales compuestos son altamente utilizados a todo nivel en la industria, por sus favorables características previamente mencionadas, el común de los residuos generados en la producción, así como los productos de FRP acaban en vertederos, fundamentado principalmente porque, hasta la fecha, no existe un método alternativo, más responsable con el medio ambiente, que sea económicamente viable de competir con los vertederos.

Sin embargo, existen en la actualidad iniciativas que buscan una alternativa al desecho de productos de FRP ², específicamente de las palas de aerogeneradores, dado que estos pertenecen a una generación de energía limpia, por lo que se espera que el tratamiento de los residuos en el desmantelamiento sea también amigable con el medio ambiente.

3.3. Métodos de fabricación

3.3.1. Laminación manual

Se utiliza un molde con la forma de la pieza a fabricar. Sobre este molde, se aplica en primer lugar *gelcoat*, el cual es una resina de poliéster tixotrópica, no reforzada y pigmentada que se usa para el acabado final del laminado. La utilización del *gelcoat* permite obtener una pieza con acabado liso y brillante.

En el proceso de laminación, se aplica a los moldes un desmoldante, que facilita el despegue de la pieza fabricada. Finalmente, se aplica sucesivamente el vidrio y la resina, para conformar el material.



Figura 3.2: Proceso de laminación manual [3]

3.3.2. Aspersión o Spray Up

Una unidad de cortado de vidrio (Chopper unit) introduce la fibra a un molde, y una pistola a presión introduce la resina en el molde. Es un proceso similar en su funcionamiento al proceso de laminación manual.

² <https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articulos/2020/06/nueva-vida-turbinas-eolicas-sostenibilidad>

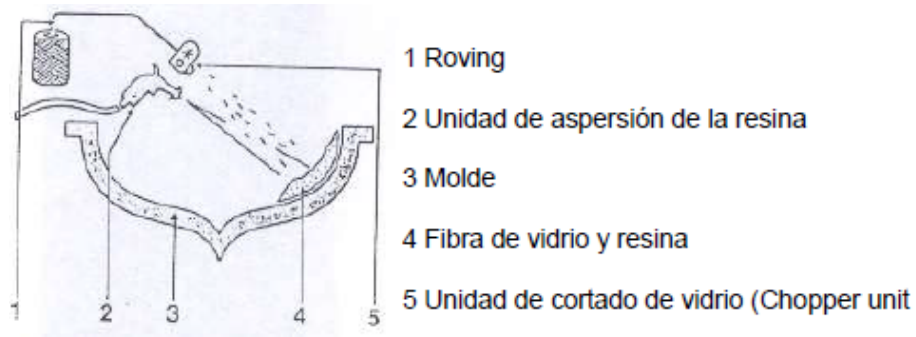


Figura 3.3: Proceso de Spray up [3]

3.3.3. Inyección (Infusión o vacío)

Este método consiste en el llenado del molde con fibra de refuerzo. Una vez se cierra el molde, se aplica la resina, y se aplica vacío (se retira el aire dentro del molde), y se mantiene hasta la gelificación.

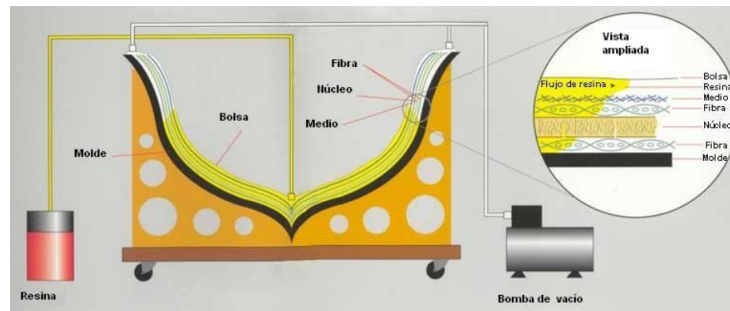


Figura 3.4: Proceso de inyección

3.3.4. Embobinado de filamentos (Filament winding)

Este método es utilizado en la fabricación de estanque, tuberías, y cualquier producto que presenta geometría de revolución.

El proceso consiste en aplicar una capa inicial de resina sobre el molde, dejarlo curar, y posteriormente aplicar hebras de filamento tipo Roving, conducidas a un recipiente con resina, y aplicar sobre un matriz giratoria. A medida que la matriz avanza, se genera un tejido helicoidal. Este avance genera zonas de vidrio impregnado con resina sobre el molde, el cual al llegar a un extremo, se desplaza en sentido contrario, generando de este modo un tejido en toda la superficie del molde.

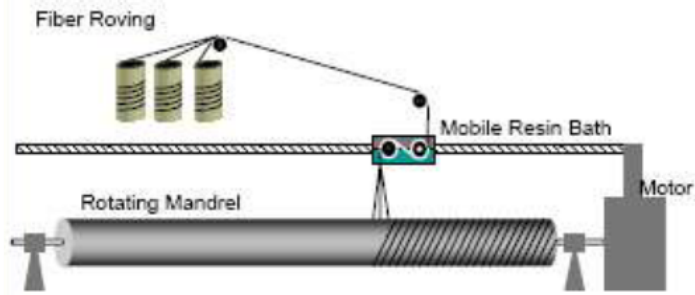


Figura 3.5: Proceso de embobinado de filamentos

3.3.5. Pultrusión

Proceso continuo que permite fabricar productos con una sección transversal constante. Las fibras de refuerzo se impregnan con un polímero termoendurecido de baja viscosidad y se tiran a través de una matriz calentada para formar perfiles compuestos. las fibras son conducidas a través de un baño de resina, que contiene resina polimérica, catalizador, agente de desmoldeo, pigmento, ultravioleta (UV), estabilizador y otros aditivos de mejora. Las fibras se atraviesan guías pre-formadas para eliminar el exceso de resina antes de entrar una matriz calentada donde se curan.

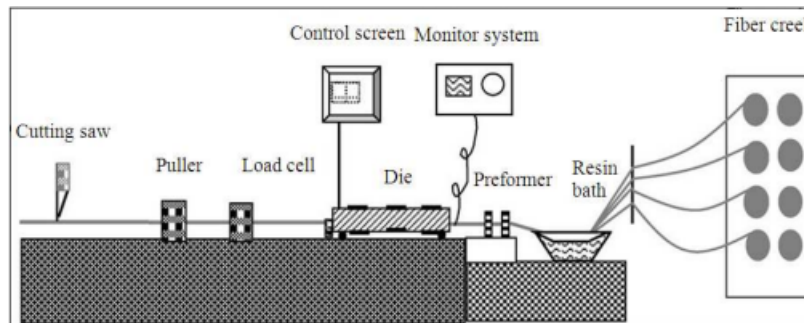


Figura 3.6: Esquema proceso de pultrusión [10]

3.3.6. Sheet Moulding Compound (SMC)

Láminas se fabrican a partir de fibra cortada y se sitúa entre dos capas del sistema termoestable (resina, sistema catalítico, cargas aditivas, etc.). Posteriormente, se pasa a través de un sistema de compactación que asegura la completa impregnación y finalmente la lámina se dispone en rollos.

Estos rollos son almacenados, lo que permite que el grosor y viscosidad sean adecuados para el posterior proceso de moldeo, el cual suele ser por compresión.

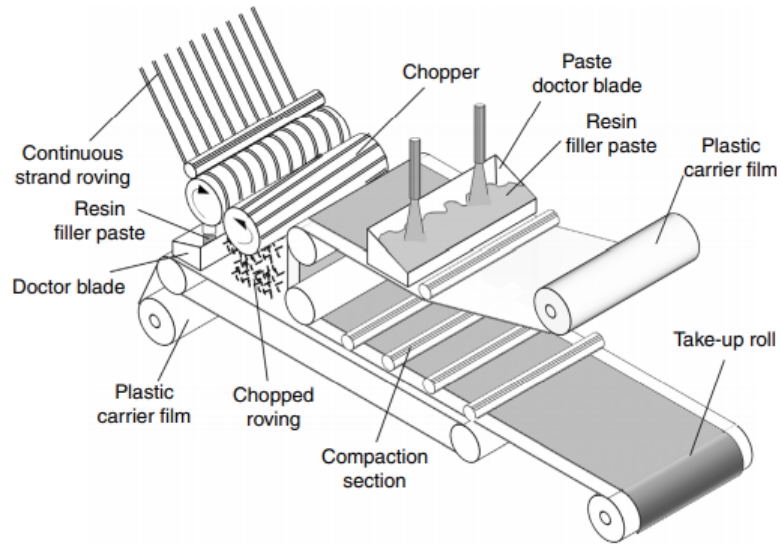


Figura 3.7: Esquema proceso sheet moulding compound [14]

3.3.7. Bulk Moulding Compound (BMC)

Proceso donde se genera una combinación de hilos de vidrio cortadas y resina (por ejemplo: resina epoxi, resina poliéster, etc.) en forma de una masa de pre-preg. El BMC es adecuado para la compresión o moldeo por inyección.

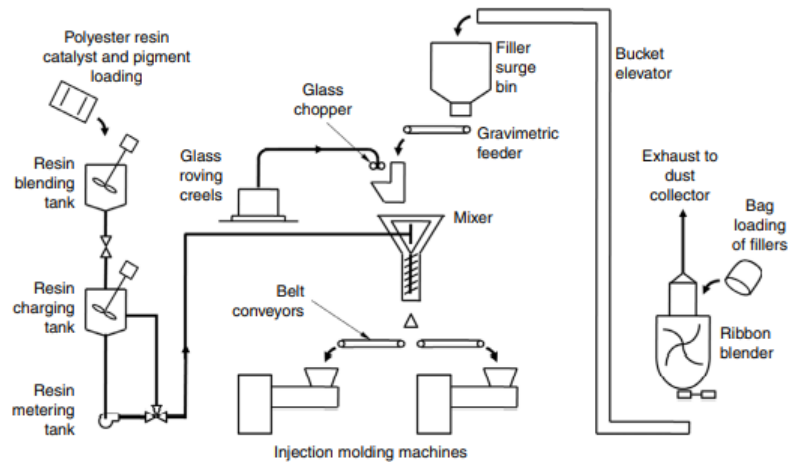


Figura 3.8: Esquema proceso bulk moulding compound [14]

3.4. Caracterización de la industria del FRP en Chile

En el año 2015, la asociación latinoamericana de materiales compuestos Chile (ALMACO Chile), presentó un Informe de Diagnóstico y Caracterización de Empresas 2015 [4], el cual tenía por objetivo caracterizar la industria chilena de productores de materiales compuestos. En este informe participaron 44 empresas del rubro y dos instituciones educacionales.

Se realizó además una reunión con el gerente de operaciones de INVENIO³, donde se comentó que casi la totalidad de los productos de FRP producidos en Chile corresponden a materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio, siendo los reforzados con fibra de carbono productos raramente fabricados en la industria chilena.

A continuación, se presentan algunos resultados presentados en el informe de ALMACO Chile:

Tabla 3.4: Localización de las empresas productoras en Chile [4]

Ubicación	Cantidad	Porcentaje del total
I Región	0	0
II Región	0	0
III Región	0	0
IV Región	1	2,17
V Región	2	4,35
VI Región	0	0
VII Región	0	0
VIII Región	0	0
IX Región	3	6,52
X Región	1	2,17
XI Región	0	0
XII Región	0	0
XIII Región	38	82,61
XIV Región	1	2,17
XV Región	0	0
TOTAL	46	100

³ <http://invenio.cl/>

Tabla 3.5: Procesos y tecnologías de fabricación empleados [4]

Proceso de fabricación	Cantidad	Porcentaje del total
Laminado manual	24	33,33
Laminado continuo	5	6,94
RTM	7	9,72
Fundición	0	0
SMC	0	0
Laminado por proyección	7	9,72
Vacío (infusión)	11	15,28
Pultrusión	3	4,17
Filament winding	8	11,11
BMC	0	0
Rotomoldeo	2	2,78
Otros	5	6,95

Tabla 3.6: Vinculación de materiales compuestos con otros materiales [4]

Tipo de material	Cantidad	Porcentaje del total
Maderas y/o celulósicos	29	29,90
Metales y/o aleaciones	26	26,80
Pétreos, cerámicos y/o gredas	5	5,15
Plásticos y/o poliméricos	28	28,87
Hormigones y/o cementos	8	8,25
Otros materiales	1	1,03

Tabla 3.7: Productos producidos por cada empresa en Chile [4]

Productos	Cantidad	Porcentaje del total
Estructuras / perfilería	13	6,13
Ductería y/o tubos	13	6,13
Planchas revestimiento	11	5,19
Postes de alumbrado	4	1,89
Maquinaria y/o mecanismos	7	3,30
Escaleras / barandas	8	3,77
Señalética / indicadores	7	3,30
Lucernarios / transparencias	1	0,47
Mobiliario doméstico / urbano	3	1,42
Textiles / membranas	1	0,47
Estanques / depósitos	19	8,96
Piscinas / tinas	9	4,25
Protectores anticorrosivos	13	6,13
Piezas especiales	26	12,26
Casetas vigilancia / baños	9	4,25
Embarcaciones / navíos	6	2,83
Accesorios industriales	15	7,08
Piezas para vehículos	13	6,13
Prototipos / modelos	15	7,08
Terminaciones	11	5,19
Otros	8	3,77

Tabla 3.8: Mercados abastecidos por los productores [4]

Mercado abastecido	Porcentaje del total
Construcción civil	9,21
Agricultura	3,29
Aeroespacial	0,26
Alimentación	3,24
Construcción industrial	5,79
Minería	25,42
Automotriz	9,58
Industria química	5,39
Institución pública	4,39
Acuicultura	3,82
Náutica / Naval	5,82
Particulares	15,03
Universidades	1,61
Aeronáutica	0,13
Entretenimiento / Ocio	4,63
Otros	2,39

A partir de las tablas presentadas, se pueden identificar aspectos de la industria de los materiales compuestos.

La tabla (3.4) presenta una concentración de empresas productoras en la región metropolitana, con más del 80 % de ellas. Además, solo 3 empresas participantes del estudio están localizadas en otras regiones de Chile.

Respecto a los procesos productivos, la tabla (3.5) presenta que un tercio de las empresas utiliza el laminado manual para producir productos, el cual es el proceso más artesanal de los presentados [4], lo que indica una industria poco estandarizada. Procesos más desarrollados, y que requieren maquinaria especializada, como la pultrusión y el rotomoldeo son escasos en la industria. Procesos más modernos, como el BMC o el SCM, no son utilizados por las empresas participantes.

Dentro de los materiales más utilizados en los procesos de fabricación, se encuentran la madera y los metales, los cuales forman parte de los moldes, en procesos como la laminación manual. Además, en la tabla (3.6), se presenta el uso de materiales plásticos y poliméricos. Dentro del informe, se expone que 23 empresas participantes contaban con estimaciones de consumo de FRP, estableciendo en Chile un consumo de 2.242 toneladas por parte de estas 23 empresas.

La tabla (3.7), presenta la variedad de productos fabricados por las empresas participantes, donde las principales fabricaciones corresponden a piezas especiales, es decir, modelos específicos solicitados por clientes, seguido por los estanques y depósitos, los cuales son ampliamente utilizados en la industria, especialmente en el rubro minero.

3.5. Marco legal

La legislación chilena regula el tratamiento de residuos, mediante la Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (ley REP, N°20.920) [2]. Este reglamento busca generar una industria que se responsabilice por sus productos a través de la prevención de generación de residuos y de su recuperación y reciclaje.



Figura 3.9: Ciclo de vida de los productos

Sin embargo, el mayor problema que se presenta en la actualidad con esta ley, es que establece metas de recolección únicamente para los 6 productos prioritarios, generando así un vacío para todo el resto de los distintos materiales que se utilizan en la industria, dentro de ellos, los materiales compuestos. La ley REP establece además la jerarquía en el manejo de residuos, donde se presentan las distintas opciones para tratar los residuos, según el orden de prioridad, las cuales son:

1. Prevención: corresponde a la etapa más importante para el manejo de residuo. Tiene como objetivo el manejo responsable de materias para la producción de materiales o producto, a fin de evitar la generación excesiva e innecesaria de residuos.
2. Reutilización: tiene por objetivo el alargar la vida de un producto o material al fin de su vida útil, mediante la reparación o mantenimiento de productos y materiales para otorgarles un nuevo uso.
3. Reciclaje: se busca utilizar el material, producto o desecho en un nuevo ámbito, otorgando una nueva vida de uso, mediante algún proceso de reciclaje, ya sea convirtiéndolo en un producto nuevo, o como una mezcla con material virgen.
4. Valorización energética: el objetivo es utilizar los residuos que no pueden ser reciclados como fuente de energía, ya sea térmica, eléctrica u otra.

5. Eliminación: corresponde a la última alternativa en el manejo de residuos. Corresponde a la incineración, o utilización de un vertedero para depositar los residuos.

3.6. Estimación de material disponible para reciclar

Para la estimación de material compuesto disponible para reciclar, se establecen dos fuentes de origen. El primero corresponde al material de desecho en el proceso de fabricación de tuberías y estanques, mediante el proceso de filament winding, el cual genera un despunte, correspondiente a los extremos del tubo o estanque que se fabrica. Este material es particularmente valioso porque es un material limpio, libre de otros agentes, como pintura o suciedad, ya que proviene directamente como desecho de producción. Se estudia además los desechos provenientes del proceso de laminado manual, el más utilizado por la industria chilena, y que genera un alto porcentaje de desechos.

La segunda fuente de origen corresponde al FRP disponible de las aspas de aerogeneradores, los cuales llegan al fin de su vida útil. Las aspas de los aerogeneradores presentan un alto porcentaje de FRP, además de otros materiales. Debido al gran tamaño de las palas, se debe considerar una forma responsable y sustentable de tratarlas al fin de su vida útil, a fin de evitar que acaben en vertederos, o el parque eólico acabe como un cementerio de palas.⁴

3.6.1. Material de desecho en producción

En base a la información presentada en la caracterización de la industria (tabla 3.7), se presenta que la fabricación de tubería y estanques en Chile corresponde a un 15,09 % del total de producción de las empresas participantes del informe .

Para conocer el porcentaje de pérdida en la producción de tuberías y estanques, se contactó con la empresa FIBRA⁵, específicamente con su coordinador de sistema de gestión integrado, quienes mediante su departamento estimaron la pérdida de material por despunte en un 10 % del total del material del producto final.

Con esta información, se estima que el porcentaje de material disponible para reciclar, proveniente del material de pérdida en la producción de tuberías y estanques, corresponde al 1,509 % del consumo anual de fibras y resinas , correspondiente al año 2015 a aproximadamente 33,83 toneladas.

Además, existen estudios [7] que han estimado que la pérdida de material durante el proceso de laminación manual alcanza el 15 %, siendo uno de los procesos que más generan desechos. Con esto, se puede estimar además la pérdida en el proceso de laminación, considerando que su utilización corresponde a un tercio de la producción en Chile (tabla 3.5), obteniéndose así una pérdida por fabricación del 4.995 % del total, equivalente a 111,99 toneladas.

⁴ <https://www.eldiario.es/economia/aerogeneradores-obsolotas-cementerios-desastre-ecologico-gamesa-acciona14925641.html>

⁵ <https://www.fibra.cl/>

3.6.2. Material proveniente de fin de vida útil

La energía eólica ha tenido un crecimiento sostenido en las últimas décadas, basado en la búsqueda de alternativas más limpias de generar electricidad. Sin embargo, la vida de funcionamiento esperada para los parques eólicos varía entre 20-30 años, por lo que se hace necesario considerar una forma responsable de desmantelar los parques al fin de su vida útil. En la actualidad, existen más de 30 centrales de generación de energía eólica, distribuidas a lo largo de todo Chile, como se presenta en la siguiente figura ⁶:



Figura 3.10: Centrales eólicas en Chile

Particularmente, las aspas o palas de los aerogeneradores contienen un porcentaje entre 11 % y el 16 % de su masa de FRP [16], el cual puede ser reciclado al fin de vida útil de las aspas.

En Chile, los primeros parques eólicos comenzaron su funcionamiento en los comienzos del 2000, con una vida base de 20 años. En el año 2018, Chile contaba con 651 torres eólicas, que generaban 1.426 MW de energía. ⁷

⁶ <https://mainstreamrp.cl/proyectos-mapa/proyectos-eolicos/>

⁷ <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>

Para mediados de 2020, existían 2.248 MW de instalaciones eólicas, equivalente a cerca de 1.000 torres eólicas. Esto implica la presencia de alrededor de 3.000 aspas

Tabla 3.9: Generación de energía eólica año 2020

Sistema	Eólica (MW)	Total (MW)	Participación energía eólica %
Sistema Eléctrico Nacional (SEN)	2.242,0	25.752,4	8,7
Sistema Eléctrico de Aysén (SEA)	3,1	56,1	5,6
Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM)	2,6	107,4	2,4
Total	2.247,7	25.916	8,7 %

El porcentaje de FRP se puede estimar a partir de la capacidad instalada. El laboratorio nacional de energía renovable de EE.UU., en el año 2015 determinó la masa de cada componente de aspas de aerogeneradores de diferentes modelos estudiados [16].

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de 7 modelos distintos de aerogeneradores.

Tabla 3.10: Masa de materiales por cada kW producido [16]

	Masa [kg/kW]						
Acero	111,2	104,5	110,1	96,3	82,2	83,9	92,2
fibra de vidrio / resina / plástico	18,8	23,8	20,9	18,2	16,0	14,1	14,2
Hierro / hierro fundido	7,2	17,3	8,7	17,8	20,5	13,3	13,3
Cobre	1,6	1,5	1,2	1,8	0,9	0,6	0,7
Aluminio	N/A	N/A	N/A	1,9	2,1	1,7	1,9
Total	139,9	148,2	141,7	138,9	124,0	115,0	124,0

Fabricante de equipo original (OEM)							
Fabricante	Micon	Nordex	Micon	Vestas	Vestas	Vestas	Vestas
Modelo	NM52	N-62	NM72	V82 1.65	V90 2.0	V100 2.0	V110 2.0
Masa [kg/kW]							
Acero	111,2	104,5	110,1	96,3	82,2	83,9	92,2
Fibra de vidrio/ resina /plástico	18,8	23,8	20,9	18,2	16,0	14,1	14,2
Hierro/ hierro fundido	7,2	17,3	8,7	17,8	20,5	13,3	13,3
Cobre	1,6	1,5	1,2	1,8	0,9	0,6	0,7
Aluminio	N/A	N/A	N/A	1,9	2,1	1,7	1,9
Total	139,9	148,2	141,7	138,9	124,0	115,0	124,0

La información presentada en la tabla (3.10), presenta un promedio de 18 kilogramos de FRP por cada kW generado, o de forma equivalente, 18 toneladas de FRP por cada MW. Dado que la estimada para las centrales eólicas se estima entre 20-25 años, y las primeras en Chile se instalaron en el comienzo del 2000, se espera que durante la actual década comience en desmantelamiento de las primeras centrales.

Al año 2013 la potencia correspondía a 289.35 MW ⁸, lo que equivale a 5.208 toneladas de FRP. Se espera que, los parques correspondientes a esta potencia sean los primeros en desmantelar en la presente década.

Este será el valor se considerará entonces, debido al horizonte de evaluación que se presenta en el apartado de evaluación económica.

De este modo, se puede resumir la cantidad de FRP que se puede reciclar en Chile, proveniente de los procesos de producción y del fin de vida útil de los parques eólicos.

Tabla 3.11: Material disponible para reciclar

Origen	Cantidad anual [ton]
Pérdida filament winding	33,83
Pérdida laminación manual	111,99
Fin de vida útil aspas	520,83
Total	666,65

⁸ <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/245691/CAPAC-INSTA-DE-GENER-SEN/>

3.7. Tecnologías de reciclaje

El reciclaje de materiales compuestos presenta distintas tecnologías, las cuales tienen distintos objetivos, puesto que algunas buscan la separación y recuperación de fibras, mientras otras no disocian el material compuesto.

3.7.1. Reciclaje mecánico

El proceso de reciclaje consiste en la reducción de tamaño de los residuos mediante un proceso de molienda, con equipos como molinos de bolas, molino de martillos, molino de rodillos, entre otros. El material puede ser tratado para reducir su tamaño hasta uno cual pueda ser procesado por un equipo de molienda.

El producto triturado es clasificado a través de mallas de tamiz de distintos tamaños.

El producto final obtenido se puede clasificar en particulado grueso, consistente en fibras unidas por resina, y material fino, consistente en materiales molidos muy finos, con un tamaño menor a 0.5 mm.

Este proceso no tiene por objetivo separar la matriz de la fibra, por lo que se considera principalmente para el reciclaje de materiales de fibra de vidrio.

Y tiene como potencial uso, la utilización como relleno en los procesos de fabricación de materiales compuestos, o como refuerzo en otros materiales.

Este método es necesario para otros procesos de reciclaje, como la pirólisis, lecho fluidizado, entre otros.



Figura 3.11: FRP grueso y fino respectivamente, producto de reciclaje mecánico. [17]

3.7.2. Pirólisis

La pirólisis es un proceso térmico, que consiste en el calentamiento de desechos en ausencia de oxígeno y se utiliza para separar el material compuesto en sus componentes originales. Este proceso permite obtener recuperación de energía, y materiales.

La temperatura de operación varía entre los 400°C y 600°C, dependiendo del tipo de matriz. Las resinas poliéster requieren menores temperaturas, mientras que las resinas epóxicas requieren las mayores temperaturas.

El proceso descompone los compuestos en gas, aceite, fibra y una pequeña cantidad de

carbono. La temperatura de funcionamiento debe adaptarse al tipo de material compuesto que se está procesando para minimizar la degradación térmica de las fibras recuperadas. Para las fibras de vidrio, se estima la pérdida de resistencia a la tracción entre un 52 % y un 64 %

3.7.3. Lecho fluidizado

Es un proceso térmico que consiste en una cámara que contiene arena que actúa como un fluido cuando se suspende en una corriente de aire. La cámara se calienta entre 450°C y 500°C. Material compuesto molido previamente se deposita en la cama de arena. Mediante la corriente de aire, la resina se evapora y separa de la fibra, y esta es impulsada por la corriente de aire a un punto de recogida para su recuperación.

El gas ingresa a una cámara de combustión para la recuperación de energía recuperada. En este proceso térmico, es fundamental el control de la temperatura en el interior de la cámara, para limitar la degradación de las fibras.

El objetivo de este proceso es separar a las fibras de la matriz, para su recuperación, y la utilización del gas como combustible. Este proceso tiene como ventaja el que se puede trabajar con material contaminado, por lo que es apto para trabajar con materiales al fin de su vida útil. Sin embargo, la alta temperatura afecta las propiedades de la fibra, de mayor medida que otros procesos térmicos.

3.7.4. Solvólisis

La solvólisis es un proceso químico, en el cual se utiliza un disolvente calentado o una mezcla de disolventes para romper la resina en un peso molecular más bajo.

El material a tratar es sometido a distintas presiones y temperaturas, dependiendo de los disolventes y catalizadores utilizados. El agua se presenta como el agente disolvente más utilizado.

Las fibras de carbono no se disuelven y se liberan de la resina. Las fibras de vidrio sufren degradación en el proceso, por lo que este proceso se adapta más a la fibra de carbono.

Presenta como ventaja sobre la pirólisis, el trabajar a menor temperatura, y obtener fibras más limpias. Y como desventaja, que los materiales de los equipos, al trabajar en condiciones de temperatura y presión alta, son más costosos.

3.7.5. Valorización energética

Una opción alternativa corresponde al aprovechamiento energético de material combustible en hornos de cementeras. El contenido polimérico puede ser utilizado como combustible en hornos, donde estudios señalan que no se debiese utilizar en más del 10 %. Mientras que las fibras pueden incorporarse a el cemento, generando así una nueva utilización de este material. Esta opción resulta particularmente atractiva, cuando se desean recuperar fibras de alto valor, como las fibras de carbono

3.8. Mercado de reciclado de FRP

Desde hace más de dos décadas que los investigadores han desarrollados trabajos respecto al potencial uso de los materiales compuestos. Las primeras investigaciones apuntaban a estudiar el FRP como reemplazo parcial de áridos en las cementeras. Publicaciones [8] han presentado que el FRP obtenido mediante reciclaje mecánico, uno de los primeros en ser estudiado, puede utilizarse como reemplazo de áridos finos (arenas) en las mezclas con hormigón. Sin embargo, la utilización de FRP reciclado altera las propiedades mecánicas de la mezcla final. De forma similar, se ha investigado la utilización de material compuesto reciclado como relleno para asfalto.

Estudios [8] presentan que la adición de hasta un 1 % en peso de plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) afecta en forma marginal las propiedades del asfalto, al ser utilizado como relleno.

Para el caso del concreto, una de las dificultades que presenta la utilización de FRP reciclado es la potencial presencia de fibras largas en la mezcla, lo que generaría un problema de anisotropía local en la mezcla, si se utilizara como reemplazo de árido grueso.

Otras investigaciones han estudiado el reemplazo de arena por GFRPW (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste) en la conformación de cemento. Para esto, se utilizó fino proveniente del proceso de pultrusión, y se reemplazó en 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en peso de árido fino. Respecto a los resultados obtenidos, se observó que en el rango 0-5 %, mejoró la relación w/c , es decir, la relación agua cemento disminuye, pues el fino disminuye la porosidad de la mezcla. En cuanto a las propiedades mecánicas, en este rango se observa una disminución marginal ($\sim 3\%$) en la resistencia a la flexión, rotura, mejora la resistencia al desgaste. Además, mejora la trabajabilidad de la mezcla. Sin embargo, se presentó una alta disminución de la resistencia a la compresión ($\sim 20\%$).

Estas investigaciones concluyen que existe un potencial uso de FRP reciclado como reemplazo de áridos finos, logrando mantener la mayoría de las propiedades mecánicas. Sin embargo, dada la considerable pérdida de resistencia a la compresión, la recomendación para su utilización está dada para construcciones no estructurales, es decir, que no estén sometidas a grandes cargas.

Otros mercados para el FRP reciclado se encuentra en el mismo proceso de producción de este. Los procesos de sheet moulding compound (SMC) o el bulk moulding compound (BMC), permiten mezclar FRP virgen con su versión reciclada, obteniendo un producto final con propiedades mecánicas similares a la versión con material completamente virgen. En la actualidad, planchas para techos son fabricadas mediante este método. Sin embargo, como se presentó en la sección de caracterización de la industria del FRP en Chile, en la tabla (3.5), se observa que las empresas participantes del estudio no presentan estos procesos, por lo que, en la actualidad, la incorporación de FRP reciclado en el proceso de producción no es posible en Chile.

Otra alternativa, la cual mezcla la valorización energética con el reciclaje, corresponde a la utilización de materiales compuestos en los hornos de cemento. En este método, se busca utilizar la parte orgánica del FRP, correspondiente a la matriz o resina del material com-

puesto, como una fuente de energía. El material resultante, correspondiente a las fibras, se pueden reutilizar, como refuerzo o relleno en procesos de manufactura de FRP, y también para las mezclas de cemento y asfalto antes mencionadas.

Respecto al reciclaje de palas mecánicas, considerando el importante contenido de FRP que se encuentra en ellas, se están realizando en la actualidad diversas investigaciones y trabajos en busca de darles una segunda vida.

Se están desarrollando métodos termo-mecánicos que permiten convertir partes de aspas de aerogeneradores en nuevos compuestos termoplásticos extruidos y moldeados en estructuras monocapa y multicapa⁹.

Existen otros proyectos, como el que se está desarrollando en Dinamarca [15], donde se pretende reutilizar el cuerpo completo de las aspas, o la mayoría de estas, como infraestructura arquitectónica, ya sea como puentes, o como estructuras recreacionales y bancas, como se presentan en las siguientes figuras:

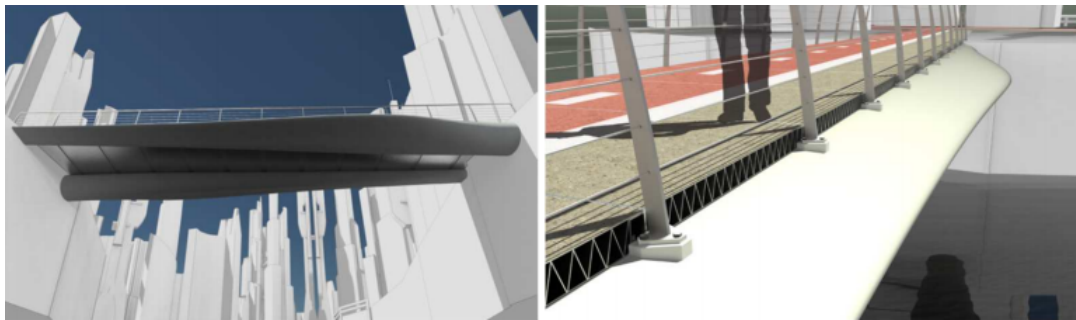


Figura 3.12: Modelo de puente a partir de aspa de aerogenerador

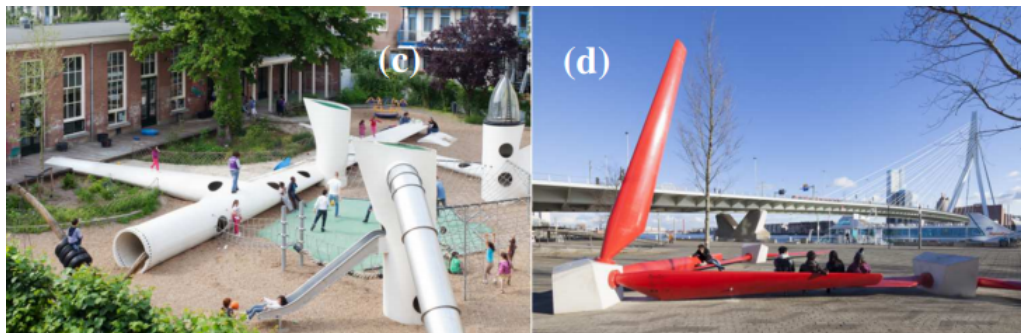


Figura 3.13: Zona recreacional a partir de aspa de aerogenerador

⁹ <http://www.conenor.com/recycling-thermoset-frp-waste>

Capítulo 4

Resultados

4.1. Selección de tecnología de reciclaje

A partir de la información presentada anteriormente, se desarrolla a continuación el análisis de factibilidad de implementación para el reciclaje de materiales compuestos en Chile.

En base a la experiencia internacional, el reciclaje mecánico, particularmente como reemplazo parcial de áridos finos con cemento, se ha estudiado y realizado pruebas desde hace más de dos décadas. Los otros métodos de reciclaje, tanto los químicos como los térmicos, han sido desarrollados a nivel de pruebas como plantas, pero la mayor parte de ellas siguen siendo desarrolladas y modificadas a fin de aumentar la relación costo/eficiencia.

Respecto al aspecto económico, hay factores diferenciadores entre cada método de reciclaje.

- Una de las consideraciones corresponde al consumo energético de cada proceso de reciclaje. La siguiente figura presenta la demanda de energía por kilogramo para algunos de los procesos presentados en el capítulo anterior:

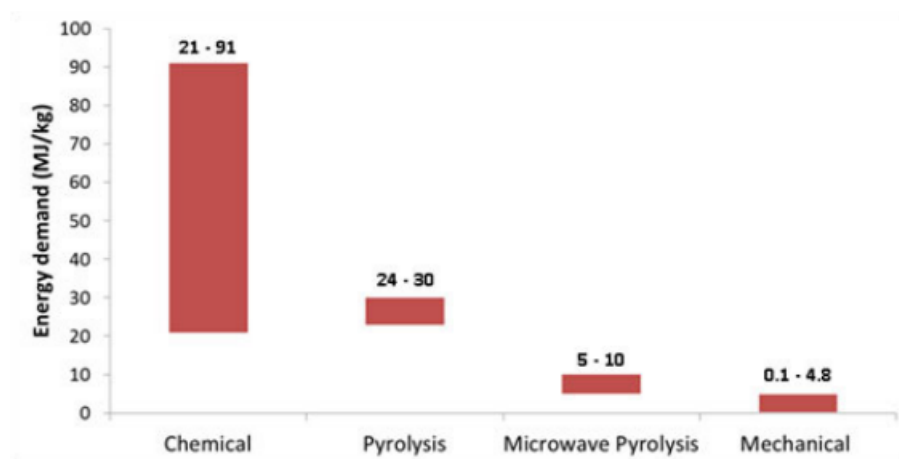


Figura 4.1: Demanda de energía por unidad de masa para distintos procesos de reciclaje. [6]

En el gráfico, se presenta que el mayor consumo energético corresponde al proceso químico.

mico, seguido del proceso de pirólisis. El proceso de menor demanda energética es el reciclaje mecánico, el cual requiere al menos 5 veces menor energía que la pirólisis y el reciclaje químico.

Considerando este aspecto, debido a su alto costo energético, el proceso químico no es una alternativa atractiva a utilizar, pues encarece el proceso de reciclaje respecto a otros métodos.

- Costo de equipamiento: los procesos de pirólisis, lecho fluidizado, y solvólisis, se requieren de equipos altamente especializados, los cuales aún se encuentran en fase de pruebas y optimización, por lo que son de un elevado costo. Para el reciclaje mecánico, el equipamiento consiste en equipos de molienda, trituración y molienda, tales como molinos de martillo, molino de bolas, molino de martillos, entre otros. Este tipo de equipos son altamente comerciales, y se encuentran disponibles en variados tamaños, lo que implica un menor costo con respecto a los otros métodos antes mencionados.
- Consideraciones operacionales: los métodos de reciclaje térmicos y químicos generan gases en su proceso, los cuales deben ser tratados, tanto por seguridad ambiental como humana. Este proceso requiere altos niveles de mantenimiento y especialización de personal para asegurar el correcto tratamiento de agentes tóxicos.
El reciclaje mecánico, por su parte, es un método libre de generación de agentes tóxicos, lo cual facilita la implementación y mantenimiento de los equipos.
- Expansión del proceso de reciclaje: ante un eventual aumento del proceso productivo o de reciclaje, los procesos de pirólisis, lecho fluidizado, y solvólisis cuentan con una cantidad limitada de material que pueden tratar por hora, por lo que aumentar el material reciclado implicaría la incorporación de un nuevo equipo, para poder corresponder al aumento de material a reciclar.
En el caso del reciclaje mecánico, cada unidad de molienda y trituración opera de forma independiente.

Con los antecedentes presentados, se considera además el aspecto referente a la expansión o aumento de material a reciclar. En el caso de los procesos térmicos y químicos, los equipos están limitados a una cantidad de material, por lo que el aumentar la producción de material reciclado, requiere la incorporación de equipos, incluyendo aquellos que se utilizan para el tratamiento previo, como la trituración previa de material a un tamaño más adecuado. En el caso del reciclaje mecánico, cada equipo de trituración trabaja de manera independiente, lo que facilita una posible expansión del proceso, al agregar equipos de molienda según sea necesario. Además, como se mencionó, estos equipos son comerciales, y con un valor mucho menor al de los procesos térmicos y químicos.

Los métodos de reciclaje térmicos presentan una ventaja respecto a los otros métodos. Los métodos térmicos permiten procesar el material a reciclar en cualquier condición, es decir, ya sea un material limpio, proveniente como desecho en el proceso de fabricación de una pieza, o como material sucio, con pintura o recubrimiento, por ejemplo, proveniente del fin de vida útil. El reciclaje térmico permite recuperar las fibras, y utilizar la materia orgánica de la matriz como recurso energético.

Si bien este apartado es importante en cuanto a que facilita y diversifica el tipo de material

que se puede reciclar, el mercado chileno de materiales compuesto utiliza casi en su totalidad fibra de vidrio, la cual es barata de producir, por lo que no es económicamente atractiva como reemplazo de fibra de vidrio virgen. Para el caso de la fibra de carbono como refuerzo, existe un interés mayor por los procesos de recuperación de fibra, ya que además de la utilización de la matriz como fuente de energía, existe un ahorro de energía considerable en utilizar fibras de carbono recicladas, en comparación con producir fibras de carbono vírgenes.

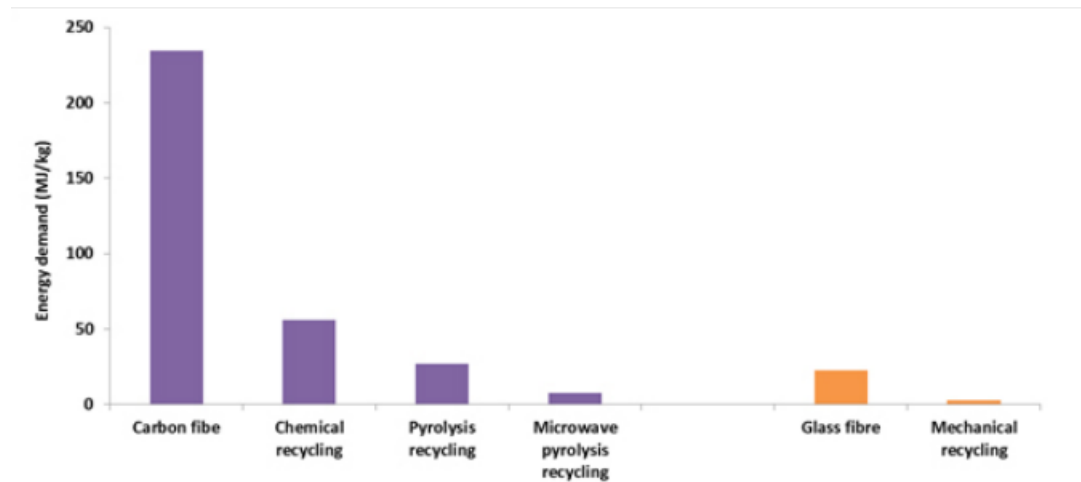


Figura 4.2: Comparación entre energía demandada para producir fibra y recuperarla por medio de reciclaje [6]

Con esta información, considerando aspectos tanto técnicos como económicos presentados, además de la experiencia internacional y madurez de cada tecnología, se concluye que el método de reciclaje que presenta mayor factibilidad para su utilización, dado el contexto de la industria en Chile, corresponde al reciclaje mecánico.

4.2. Selección de ubicación de la planta

Para la selección de la zona geográfica de la planta, se tienen en consideración dos aspectos principales. El primero, consistente en la cercanía con el origen del material a reciclar, y el segundo el considerar una zona apta para la instalación de una planta de reciclaje, es decir, que cuente con espacio disponible, y que sea alejada de zonas residenciales.

El origen del material de reciclaje de flujo constante, proveniente de las plantas de fabricación, se encuentran concentradas mayoritariamente en la región metropolitana, (tabla 3.4), por lo que esta región se presenta como una opción favorable para disminuir la distancia de traslado de material de las fábricas productoras a la planta de reciclaje.

Mientras que el material de las aspas de aerogeneradores proviene de parques eólicos, los cuales están dispersos a lo largo del país (fig 3.10), por lo que no existe una zona de Chile particularmente conveniente que permita disminuir las distancias para el transporte de material desde los parques eólicos a la planta de reciclaje.

Con estos aspectos, se determina que la zona más favorable para instalar la planta de reciclaje es en la región metropolitana, pues permite optimizar la cadena de suministro. Además, la región metropolitana cuenta con zonas industriales, las cuales facilitarían la instalación de la planta. Es particularmente atractiva la zona periférica de Santiago, en el sector industrial de la comuna de Quilicura, que cuenta con espacio disponible, y conexión con autopistas.

4.3. Diagrama de flujo del reciclaje mecánico

El siguiente diagrama presenta las etapas necesarias para reciclar el FRP mediante el proceso de reciclaje mecánico.

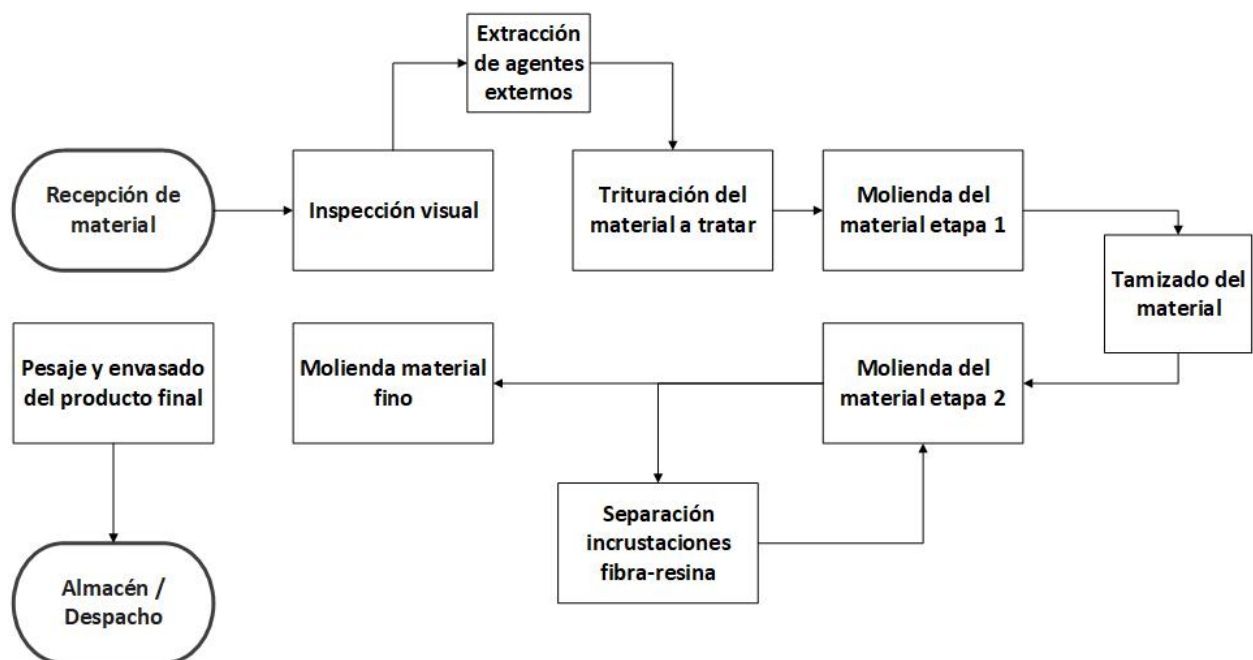
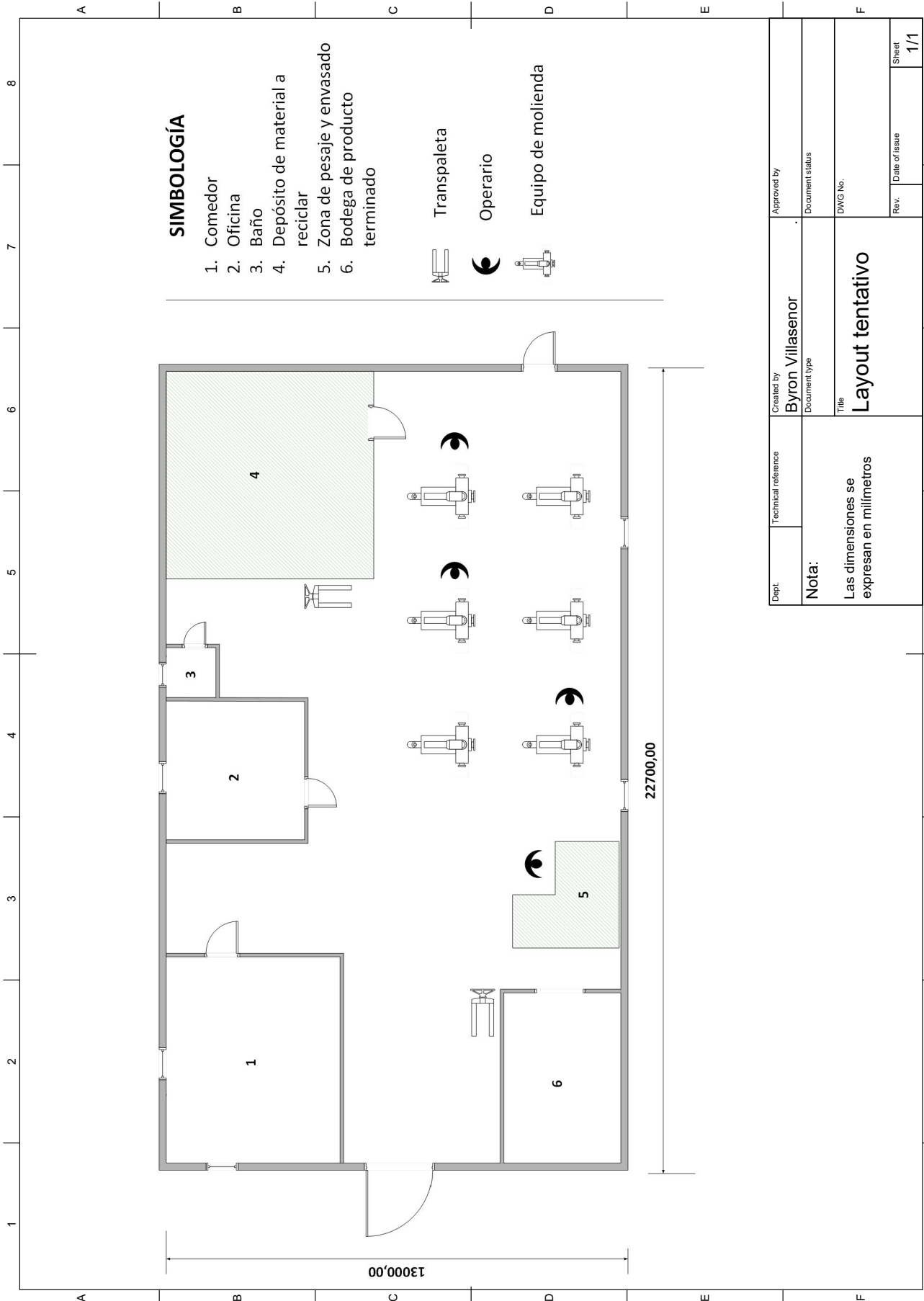





Figura 4.3: Diagrama de flujo del proceso de reciclaje mecánico



SIMBOLOGÍA

- 1. Comedor
- 2. Oficina
- 3. Baño
- 4. Depósito de material a reciclar
- 5. Zona de pesaje y envasado
- 6. Bodega de producto terminado

 Transpaleta
 Operario
 Equipo de molienda

Dept.	Technical reference	Created by Byron Villaseñor	Approved by
Nota: Las dimensiones se expresan en milímetros		Document type	Document status
		Title Layout tentativo	DWG No.
		Rev.	Date of Issue
			Sheet 1/1

Capítulo 5

Evaluación económica

En el presente capítulo, se desarrolla la evaluación económica de la planta de reciclaje, habiendo seleccionado el reciclaje mecánico como método de reciclaje más viable en la sección anterior.

La evaluación económica se estudiará mediante el flujo de caja del proyecto, para un horizonte de tiempo delimitado, con liquidación del proyecto en el último año, es decir, con la venta de los activos físicos.

Se analizarán estadísticos económicos tales con el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), los cuales permitirán determinar la factibilidad de la realización del proyecto, así como otros factores a considerar para un potencial desarrollo de la planta de reciclaje.

Se establecen además los costos de inversión del proyecto, es decir, costos tales como el arriendo de un lugar y galpón para instalar la planta, costos operacionales, costos referidos a contratos de trabajo, costos de equipos a adquirir, entre otros.

Se estipula además la estrategia de inversión, que permitan financiar y desarrollar la planta de reciclaje, los ingresos esperados, y se analizarán escenarios favorables y desfavorables del proyecto, a fin de obtener un panorama más completo de la evaluación económica.

Dado que la información respecto a la cantidad de resinas y fibras consumidas en Chile presentada en el informe de ALMACO solo presentaba el consumo de la mitad de las empresas participantes en el estudio, para la evaluación económica se analizarán dos casos, uno considerando la cantidad presentada en el estudio, y otro donde se duplica esta cantidad, donde se supone que la otra mitad que no contaba con información respecto al consumo de materias primas consumen lo mismo que las que sí contaban con información.

Esta última situación será utilizada para definir los costos de la planta, pues representa la condición de carga máxima, y porque permite además no infravalorar los costos ni la posible producción nacional de material a reciclar.

5.0.1. Producto a comercializar

El producto a comercializar consiste en sacos de 25 kilogramos de material compuesto reciclado, el cual se venderá como una versión más ecológica de reemplazo de material fino (arena), para mezcla con cemento. El precio unitario de cada producto se define en \$4.000, dada su característica de material reciclado. Este producto tiene como destinatario clientes residenciales, los cuales quieran agregar un valor extra a sus trabajos, mediante un la incorporación de material reciclado.

Este valor se basa en referencias internacionales para materiales de construcción reciclados, específicamente para áridos finos envasados en pequeñas cantidades (rango 20-25 kg), dado que en el país no existe aún un mercado de materiales reciclados para construcción, y menos aún con productos alternativos para incorporar a la industria de la construcción. En relación con el árido fino comercializado en Chile en envases de 25 kg, estos productos tienen un costo promedio de \$1.000, lo que indica que el producto alternativo a producir sería 4 veces más costoso que el tradicional. Se incluye en el costo unitario de cada producto, el valor correspondiente al empaque, el cual se obtiene mediante una empresa externa.

Con la información presentada en la tabla (3.11), se estimó un total 666,65 toneladas anuales de material disponible para reciclar, lo que se traduce en 26.666.500 unidades anuales disponibles para comercializar, y 2.222 unidades mensuales aproximadamente. Este caso se considerará como el caso base.

Para el caso donde se considera el doble de producción, y por tanto se duplica el material proveniente de producción a reciclar, se tiene un total de 812,49 toneladas anuales de FRP, equivalente a 32.500 unidades al año. Este caso corresponderá al caso referencial, sobre el cual se estudiarán los escenarios pesimista y optimista.

5.0.2. Condiciones de evaluación del proyecto

Para el estudio económico del proyecto, se establece un horizonte de evaluación de 10 años, tiempo que permite un análisis económico sólido para este tipo de proyectos.

Se establece la tasa de descuento en un 15 %, que es un valor estándar para los análisis económicos de proyectos a mediano plazo.

Se establece además la venta de activos físicos en el último año, por un valor del 5 % del valor original de compra.

Se define que el capital de trabajo, correspondiente al valor necesario de funcionamiento al comienzo del proyecto, será equivalente a dos meses de costos fijos y variables.

Se evaluarán tres casos en el flujo de caja. El primero, consistente en la producción y precios establecidos en el apartado anterior. El segundo escenario corresponde al escenario pesimista, donde se genera un aumento del 10 % en los costos variables. El tercer escenario, corresponde al escenario optimista, donde se evaluará un crecimiento en la producción en un 2 % anual, durante todo el horizonte de evaluación.

5.0.3. Estrategia de financiamiento

Para el financiamiento del proyecto, tiene un costo total de \$67.364.164. Se considera el obtener un préstamo de 40 millones de pesos chilenos, a una tasa del 10 % anual, a pagar en un plazo de 5 años. El resto de la inversión se obtiene mediante el respaldo de un inversionista. Se selecciona el método de cuota fija, obteniéndose una cuota anual constante de \$10.551.899. La cuota mensual respectiva es de 0,797 %, con un valor de cuota de \$841.423.

5.0.4. Costos de inversión

La inversión inicial, para instalar la planta de reciclaje cuenta con distintos gastos. En primer lugar, se establecen el costo de los equipos necesarios para el funcionamiento. los costos de mantenimiento y transporte se definirán como un porcentaje de los costos de equipos.

- Costos de equipos: Corresponde al costo de los equipos principales, tales como molino de martillo, tamices, recipientes para separar productos, y equipos secundarios para el traslado y manipulación, tales como transpaletas, mesas, y los equipos de seguridad para los trabajadores
- Costos de instalación: Definido como el 20 % del costo de equipos. Se establece la posición y fijación de los equipos de molienda principales,
- Costos de transporte: Definido como el 10 % de los costos de equipos. Corresponden al traslado de los equipos principales hasta la zona de ubicación de la planta.
- Costos de mantenimiento: Definido como el 2,5 % de los costos de los equipos, de forma anual.
- Costo de overhaul: Definido como el 20 % de los costos de equipos, en períodos de cada 3 años.

A continuación, se presenta un desglose de los costos.

5.0.5. Costos de equipos e instalación

Los equipos de molienda corresponden a maquinaria de granulado tradicional. Considerando el total anual a reciclar, de 812,49 toneladas, esto se traduce en 3,39 toneladas diarias. Los equipos de molienda de pequeña escala pueden procesar entre 60 y 90 kg/h [18], por lo que se opta por adquirir 6 equipos de molienda, a fin de garantizar la producción en caso de falla de algún equipo.

Tabla 5.1: Costos de los equipos a adquirir.

Costos equipamiento			
Ítem	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Moedor de martillo	6	\$5.100.000	\$30.600.000
Placas tamices moedor	6	\$50.000	\$300.000
Transpaletas	2	\$ 320.000	\$ 640.000
Estantes	4	\$ 400.000	\$ 1.600.000
Elementos de seguridad	20	\$30.000	\$ 600.000
Herramientas de uso común	1	\$ 400.000	\$ 400.000
TOTAL			\$ 32.940.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2: Costos de instalación.

Costo de proceso de instalación	
Ítem	Costo
Transporte	\$3.894.000
Instalación de equipos	\$7.788.000
Mantenimiento	\$973.500
Overhaul	\$7.788.000
TOTAL	\$20.443.500

Fuente: Elaboración propia.

5.0.6. Costos fijos

Los costos fijos corresponden a los costos por los sueldos de los trabajadores, y por el arriendo del galpón en Quilicura. El personal está compuesto por un ingeniero, un jefe de planta, 4 operarios, y una persona encargada del aseo. Se establece una jornada de trabajo semanal, sin turnos, con una jornada laboral de 8 horas diarias.

Tabla 5.3: Costos de salarios de personal.

Costos personal				
Cargo	Cantidad	Salario mensual	Total mensual	Total anual
Ingeniero	1	\$1.400.000	\$1.400.000	\$16.800.000
Jefe de planta	1	\$1.000.000	\$1.000.000	\$12.000.000
Operarios	4	\$700.000	\$2.800.000	\$33.600.000
Aseo	1	\$500.000	\$500.000	\$6.000.000
TOTAL			\$7.200.000	\$86.400.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4: Costo arriendo de galpón.

Costos fijos		
Ítem	Costo mensual	Costo anual
Arriendo galpón	\$1.500.000	\$18.000.000

Fuente: Portal Inmobiliario.¹⁰

¹⁰ <https://www.portalinmobiliario.com/>

5.0.7. Costos variables

Corresponden fundamentalmente al costo eléctrico. El consumo se establece en 1,3 MJ/kg [18], que es un valor estándar para equipos de molienda de pequeña escala. El costo mensual y anual corresponden a la cantidad de material que se procesa, mensual y anualmente respectivamente.

Tabla 5.5: Costos variables de la planta.

Costos variables				
Ítem	Valor unitario [kWh]	Consumo mensual [MW]	Costo mensual	Costo anual
Electricidad	\$78,79	8,297	\$653.759	\$7.854.113
Agua	-	-	\$50.000	\$600.000
TOTAL			\$703.756	\$8.445.113

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los 3 flujos de cajas. En primer lugar, se encuentra el caso base, correspondiente al flujo de caja donde el material a reciclar corresponde a la información presentada en el informe de ALMACO. Luego, se presentan para los escenarios normal, pesimista, y optimista, respectivamente, para el caso donde se duplicó la cantidad de material proveniente de desechos de producción para reciclar.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000
Producción	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666	26.666
Ingresos por Venta	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600	106.665.600
Costo Variable Total	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984
Costo Fijo Total	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000
Depreciación Lineal	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000
Intereses	-4.000.000	-3.344.810	-2.624.101	-1.831.321	-959.264	0	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (UAI)	-12.384	-4.012.384	-2.636.485	-1.843.705	-971.647	-12.384	-12.384	-12.384	-12.384	-12.384	-12.384
Impuesto	2.105	682.105	448.202	313.430	165.180	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105	2.105
Utilidad Después de Impuestos (UDI)	-10.278	-3.330.278	-2.188.282	-1.530.275	-806.467	-10.278	-10.278	-10.278	-10.278	-10.278	-10.278
Depreciación Lineal	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000
Intereses	0	4.000.000	3.344.810	2.624.101	1.831.321	959.264	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional	3.283.722	3.963.722	3.852.339	3.729.819	3.595.046	3.446.796	3.283.722	3.283.722	3.283.722	3.283.722	3.283.722
Inversión	-50.233.500										
Capital de trabajo + overhaul (c/ 3 años)	-17.130.664	0	0	-6.588.000			\$ -6.588.000	0	0	\$ -6.588.000	0
Valor mercado activo fijo	40.000.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.511.675
Préstamo		-6.551.899	-7.207.089	-7.927.798	-8.720.578	-9.592.636	0	0	0	0	0
Amortización préstamo											
Flujo de caja de capitales	-27.364.164	-6.551.899	-7.207.089	-14.515.798	-8.720.578	-9.592.636	-6.588.000	0	0	-6.588.000	2.511.675
Flujo de caja privado	-27.364.164	-3.268.178	-3.243.368	-10.663.459	-4.990.759	-5.997.589	-3.141.204	3.283.722	3.283.722	-3.304.278	5.795.397
Margen VAN		-3%	-3%	-10%	-5%	-6%	-3%	3%	3%	-3%	5%
TIR											
Tasa de descuento											

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio		\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000
Producción		32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500
Ingresos por Venta		129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400
Costo Variable Total		-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984
Costo Fijo Total		-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000
Depreciación Lineal		-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000
Intereses		-4.000.000	-3.344.810	-2.624.101	-1.831.321	-959.264	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (UAI)		23.320.416	19.975.606	20.696.315	21.489.095	22.361.153	23.320.416	23.320.416	23.320.416	23.320.416	23.320.416
Impuesto		-3.964.471	-3.284.471	-3.518.374	-3.653.146	-3.801.396	-3.964.471	-3.964.471	-3.964.471	-3.964.471	-3.964.471
Utilidad Después de Impuestos (UDI)		19.355.946	16.035.946	17.177.942	17.835.949	18.559.757	19.355.946	19.355.946	19.355.946	19.355.946	19.355.946
Depreciación Lineal		3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000
Intereses		0	4.000.000	2.624.101	1.831.321	959.264	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		22.649.946	23.329.946	23.096.043	22.961.270	22.813.020	22.649.946	22.649.946	22.649.946	22.649.946	22.649.946
Inversión		-50.233.500									
Capital de trabajo + overhaul (c/ 3 años)		-17.130.664	0	-6.588.000			\$ -6.588.000	0	0	\$ -6.588.000	0
Valor mercado activo fijo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.511.675
Préstamo		40.000.000									
Amortización préstamo		-6.551.899	-7.207.089	-8.720.578	-9.592.636	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja de capitales		-27.364.164	-7.207.089	-8.720.578	-9.592.636	-6.588.000	0	0	0	-6.588.000	2.511.675
Flujo de caja privado		-27.364.164	16.122.856	14.375.465	13.368.635	16.225.020	22.649.946	22.649.946	22.649.946	16.061.946	25.161.621
Margen		12%	12%	11%	10%	12%	17%	17%	17%	12%	19%
VAN		53.132.495									
TIR		54%									
Tasa de descuento		15%									

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio		\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000
Producción		32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500	32.500
Ingresos por Venta		129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400	129.998.400
Costo Variable Total		-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382	-18.682.382
Costo Fijo Total		-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000
Depreciación Lineal		-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000
Intereses		-4.000.000	-3.344.810	-2.624.101	-1.831.321	-959.264	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (UAI)		21.622.018	17.622.018	18.997.917	19.790.697	20.662.754	21.622.018	21.622.018	21.622.018	21.622.018	21.622.018
Impuesto		-3.675.743	-2.995.743	-3.229.646	-3.364.418	-3.512.668	-3.675.743	-3.675.743	-3.675.743	-3.675.743	-3.675.743
Utilidad Después de Impuestos (UDI)		17.946.275	14.626.275	15.768.271	16.426.278	17.150.086	17.946.275	17.946.275	17.946.275	17.946.275	17.946.275
Depreciación Lineal		3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000
Intereses		0	4.000.000	2.624.101	1.831.321	959.264	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		21.240.275	21.920.275	21.808.893	21.686.372	21.551.600	21.403.350	21.240.275	21.240.275	21.240.275	21.240.275
Inversión		-50.233.500									
Capital de trabajo + overhaul (c/ 3 años)		-17.130.664	0	-6.588.000			\$ -6.588.000	0	0	\$ -6.588.000	0
Valor mercado activo fijo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.511.675
Préstamo		40.000.000									
Amortización préstamo		-6.551.899	-7.207.089	-8.720.578	-9.592.636	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja de capitales		-27.364.164	-6.551.899	-7.207.089	-14.515.798	-8.720.578	-6.588.000	0	0	-6.588.000	2.511.675
Flujo de caja privado		-27.364.164	14.688.376	14.713.186	7.293.095	12.965.794	14.815.350	21.240.275	21.240.275	14.652.275	23.751.950
Margen		11 %	11 %	10 %	9 %	11 %	16 %	16 %	16 %	11 %	18 %
VAN		46.057.685									
TIR		49 %									
Tasa de descuento		15 %									

	Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio		\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.000
Producción		33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150	33.150
Ingresos por Venta		132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368	132.598.368
Costo Variable Total		-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984	-16.983.984
Costo Fijo Total		-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000	-86.400.000
Depreciación Lineal		-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000	-3.294.000
Intereses		-4.000.000	-3.344.810	-2.624.101	-1.831.321	-959.264	0	0	0	0	0	0
Utilidad Antes de Impuestos (UAI)		25.920.384	21.920.384	21.920.384	22.575.574	23.296.283	24.089.063	24.961.121	25.920.384	25.920.384	25.920.384	25.920.384
Impuesto		-4.406.465	-3.726.465	-3.960.368	-3.837.848	-3.960.368	-4.095.141	-4.243.391	-4.406.465	-4.406.465	-4.406.465	-4.406.465
Utilidad Después de Impuestos (UDI)		21.513.919	18.193.919	18.737.727	19.335.915	19.993.922	20.717.730	21.513.919	21.513.919	21.513.919	21.513.919	21.513.919
Depreciación Lineal		3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000	3.294.000
Intereses		0	4.000.000	3.344.810	2.624.101	1.831.321	959.264	0	0	0	0	0
Flujo de caja operacional		24.807.919	25.487.919	25.376.537	25.254.016	24.970.994	24.807.919	24.807.919	24.807.919	24.807.919	24.807.919	24.807.919
Inversión		-50.233.500										
Capital de trabajo + overhaul (c/ 3 años)		-17.130.664	0	0	-6.588.000			\$ -6.588.000	0	0	\$ -6.588.000	0
Valor mercado activo fijo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.511.675
Préstamo		40.000.000										
Amortización préstamo		-6.551.899	-7.207.089	-7.927.798	-8.720.578	-9.592.636	0	0	0	0	0	0
Flujo de caja de capitales		-27.364.164	-6.551.899	-7.207.089	-14.515.798	-8.720.578	-9.592.636	-6.588.000	0	0	-6.588.000	2.511.675
Flujo de caja privado		-27.364.164	18.256.020	18.280.830	10.860.739	16.533.438	15.526.608	18.382.994	24.807.919	24.807.919	18.219.919	27.319.594
Margen		14%	14%	14%	8%	12%	12%	14%	19%	19%	14%	21%
VAN		63.962.865										
TIR		62%										
Tasa de descuento		15%										

Capítulo 6

Análisis y discusión de resultados

El análisis económico presentado se basa en una serie de fuertes suposiciones. En primer lugar, existe un escenario ideal, donde la oferta equipara a la demanda, es decir, se vende el total de la producción al precio declarado. Además, se definió la tasa de crédito bancaria, en relación con valores estándares, y se estableció un aporte de parte de un inversionista privado para completar el costo de inversión. Esta situación podría ser reemplazada por aportes estatales para proyectos de reciclaje.

En cuanto a los costos presentados, existe un bajo costo de inversión, dado la simplicidad del proceso, y lo comercial de estos. Los valores del proceso de instalación, definidos por los costos de equipos, equivalen a casi un 50 % extra a los costos de equipos. Los costos fijos, se dividen en el pequeño personal de la empresa, y el arriendo del galpón a utilizar. En cuanto a los costos variables, es el consumo eléctrico el componente más preponderante en este costo.

Respecto a los flujos de caja presentados, en el escenario normal, dada las suposiciones antes mencionadas, se obtiene un valor actual neto (VAN) de \$53.132.495, lo cual implica que el proyecto, dada esas condiciones, es rentable y debe realizarse. La tasa interna de retorno (TIR) es del 54 % para este caso, lo cual también es un indicador económico positivo, que define la realización del proyecto. Esto se obtiene considerando que el proyecto se financia principalmente por el préstamo, permitiendo que el saldo restante aportado mediante capitales privados tenga una rápida recuperación.

En el escenario pesimista, se consideró un aumento de los costos variables en un 10 %, esto se ve reflejado principalmente en un aumento en la tarifa eléctrica. En este escenario, se obtuvo un VAN de \$46.057.685, lo que sigue siendo un estadístico positivo hacia la realización del proyecto. En comparación con el caso anterior, el aumento de los costos variables representa una disminución del 13,31 % del VAN respecto al caso anterior. Esto genera que, ante otro tipo de aumento en los costos, especialmente de los costos variables, podría tener un impacto considerable en la factibilidad de la planta. En cuanto a la TIR, se obtuvo una tasa del 49 %, lo que sigue indicando un escenario favorable en la recuperación de los capitales invertidos.

Para el escenario optimista, donde se consideró un aumento en la producción del 2 %, se obtiene un VAN de \$63.962.865, y una TIR del 62 %. Este escenario es claramente el más favorable de los tres presentados, pues presenta un mayor VAN. Respecto al caso original, representa un aumento del 20 % del VAN, lo que genera que el proyecto es altamente sen-

sible al cambio de producción. Un escenario positivo, como el aumento en la producción, permitiría una hipotética disminución del valor de venta, permitiendo así ser más atractivo en comparación con la competencia de árido clásico. La TIR para este escenario fue del 62 %, estadístico favorable al igual que en los escenarios anteriores.

En los tres casos presentados, se obtuvieron indicadores económicos favorables a la realización del proyecto. Sin embargo, se recomienda el estudiar casos con condiciones de entrada menos rígidas. El aumento de los costos variables representa una de estas miradas, y es aconsejable el analizar otras variables, tanto internas como externas, que pudiesen alterar el desarrollo planteado del proyecto.

Capítulo 7

Conclusiones

El estudio del arte del mercado de los materiales compuestos, así como de sus opciones de reciclaje presentan un gran potencial, y a la vez un gran desafío. En primer lugar, es necesario que se consoliden políticas, tanto nacional como internacionalmente que fomenten la reducción, reutilización, y reciclaje de todo tipo de materiales, siendo en este trabajo particularmente importante el de materiales compuestos. Como algunos países ya comenzaron, la implementación de impuestos ante la masiva utilización de vertederos, como única alternativa para el tratamiento de residuos, parece ser el primer paso para una industria más responsable.

Se realizó una caracterización del mercado nacional de materiales compuestos, basado principalmente en los datos aportados por la asociación de empresas del rubro en ALMACO. Se presenta en el informe que la industria chilena aún produce la mayor parte de sus productos de forma artesanal, y no ha implementado procesos más tecnológicos y eficientes. Esta situación dificulta la reutilización de FRP en la fabricación, pues son los métodos más tecnológicos, como el sheet moulding compound (SMC) o el bulk moulding compound (BMC) los que han sido más estudiados y desarrollados en la reutilización de FRP. Además, la amplia gama de productos y mercados abastecidos hace difícil el seguimiento de los productos al fin de su vida útil, limitando así su posibilidad de ser reciclados o reutilizados. En cuanto a los desechos generados en producción, la información presentada en el informe solo contaba con una estimación de la mitad de las empresas participantes, lo que dificulta el obtener una cantidad más precisa de material disponible para reciclar como desecho de producción.

Respecto a las tecnologías de reciclaje de FRP, se presentó que la gran mayoría de los métodos se encuentran aún a nivel de desarrollo y optimización. Procesos químicos y térmicos, que permiten trabajar con materia sucia, es decir, con pintura y otros agentes, se presentan como una opción a estudiar a futuro, en la medida en que se puedan disminuir los costos asociados al proceso. Además, se presentan como una alternativa para la recuperación de fibra valiosa, como la fibra de carbono, y utilizar la componente orgánica de la matriz como fuente de energía. Sin embargo, para la industria chilena basada fundamentalmente en el uso de fibra de vidrio, estos métodos de reciclaje no resultan tan convenientes.

Se estudió la utilización del reciclaje mecánico de FRP, debido a sus bajos costos, y la consideración de que la industria chilena se basa en el uso de fibra de vidrio, la cual resulta barata de producir, y es poco atractiva como material reciclado a utilizar por las empresas productoras. Este método permite además aumento de producción, y un bajo nivel de man-

tenimiento, debido a que los equipos de molienda son ampliamente comerciales. Se estudió además el mercado del FRP, donde se propone la venta de este como sustituto de áridos finos, principalmente a nivel domiciliario, considerando que estudios proponen su uso junto con el cemento para construcciones no estructurales. Se presenta además este producto como una solución más ecológica que el tradicional árido fino.

La evaluación económica del proyecto presenta un escenario positivo para la implementación de la planta de reciclaje, considerando las fuertes suposiciones que se instalaron en su realización. Resulta particularmente cuestionable, si la demanda es equiparable a la producción planteada, pues es este uno de los factores principales que permiten una factibilidad económica satisfactoria.

El análisis económico presentó una serie de estimaciones respecto a los costos del proyecto, tanto en relación a la instalación de la planta, como a los costos de los implementos para su funcionamiento. Sin embargo, esto se enmarca en el contexto de un análisis de prefactibilidad y sus órdenes de estimación.

No se plantea dentro del análisis económico, pero sería interesante añadir la componente medioambiental y ecológica del proyecto como un factor económico positivo hacia este, ya que como se planteó al comienzo de este trabajo, el objetivo es buscar alternativas más sustentables con el tratamiento de residuos de FRP.

Finalmente, la búsqueda de métodos de reciclaje de materiales compuestos es una situación que ha cobrado gran importancia en la actualidad. Se ha presentado a lo largo de este trabajo que existen una serie de instituciones e investigadores trabajando en la búsqueda de métodos de reciclaje de materiales compuestos más eficientes y factibles. Se hace necesario la incorporación de los poderes legislativos en la generación de normas e incentivos que permiten crecer y desarrollar estas investigaciones, a fin de lograr ser capaces de tener un tratamiento de residuos que sea más respetuoso y responsable con el medio ambiente.

Bibliografía

- [1] International Maritime Organization. (2019). End-of-life management of fibre reinforced plastic vessels: Alternatives to at sea disposal. Reino Unido, CPI Group.
- [2] CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Ley 20.920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.
- [3] Plásticos reforzados con fibra de vidrio (2016). En M. Jorquera, ME5608 Materiales Poliméricos y Compuestos: Propiedad y Diseño. Universidad de Chile
- [4] ALMACO Chile A.G. Informe de Diagnóstico y Caracterización de Empresas 2015. (2015). Santiago.
- [5] López, F. A. (2010, Octubre). Reciclado de materiales compuestos de matriz polimérica. Cercha: Revista de Los Aparejadores Y Arquitectos Técnicos, 105, 76–80. <https://doi.org/2484-1048>
- [6] Job, S., Leeke, G., Mativenga, P., Oliveux, G., Pickering, S., Shuaib, N. (2016). Composites Recycling – Where are we now?
- [7] Yazdanbakhsh, A., Bank, L. (2014). A Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction. *Polymers*, 6(6), 1810–1826. doi:10.3390/polym6061810
- [8] Correia, J. R., Almeida, N. M., Figueira, J. R. (2011). Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1745–1753. doi:10.1016/j.jclepro.2011.05.018
- [9] Halliwell, N.S. (2007). End of Life Options for Composite Waste.
- [10] Fairuz, A. M., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Jaafar, C. N. A. (2014). POLYMER COMPOSITE MANUFACTURING USING A PULTRUSION PROCESS: A REVIEW. *American Journal of Applied Sciences*, 11(10), 1798–1810. doi:10.3844/ajassp.2014.1798.1810.
- [11] Ribeiro, M., Fiúza, A., Ferreira, A., Dinis, M., Meira Castro, A., Meixedo, J., Alvim, M. (2016). Recycling Approach towards Sustainability Advance of Composite Materials' Industry. *Recycling*, 1(1), 178–193. doi:10.3390/recycling1010178
- [12] Ministerio del Medio Ambiente (2018) Gestión de residuos: Legislación e institucionalidad [en línea] <<http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2018/01/1-Gesti%C3%B3n-Residuos-Legislaci%C3%B3n-e-institucionalidad-Joost-Meijer-2.pdf>>
- [13] Conroy, A., Halliwell, S., Reynolds, T. (2006). Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1216–1222. doi:10.1016/j.compositesa.2005.05.031

- [14] Park, C. H., Lee, W. I. (2012). Compression molding in polymer matrix composites. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, 47–94. doi:10.1533/9780857096258.1.47
- [15] André, A., Kullberg, J., Nygren, D., Mattsson, C., Nedev, G., Haghani, R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 942, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/942/1/012015>
- [16] Mone, C., M. Hand, M. Bolinger, J. Rand, D. Heimikker, J. Ho. 2017. *2015 Cost of Wind Energy Review* (Technical Report), NREL/TP-6A20-66861. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (US). <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf>
- [17] Meira Castro, A. C., Carvalho, J. P., Ribeiro, M. C. S., Meixedo, J. P., Silva, F. J. G., Fiúza, A., Dinis, M. L. (2014). An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: recycling and reuse assessment into new composite materials using Fuzzy Boolean Nets. *Journal of Cleaner Production*, 66, 420–430. doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.03
- [18] Shuaib, N. A., & Mativenga, P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198–206. doi:10.1016/j.jclepro.2016.01.070.

Anexo A

Pago préstamo

AÑO 1				
Mes	Préstamo	Intereses	Amortización	Cuota
0	\$ 40.000.000	-	-	-
1	\$ 39.477.542	\$ 318.966	\$522.458	\$841.423
2	\$ 38.950.919	\$ 314.799	\$526.624	\$841.423
3	\$ 38.420.095	\$ 310.600	\$530.823	\$841.423
4	\$ 37.885.039	\$ 306.367	\$535.056	\$841.423
5	\$ 37.345.717	\$ 302.101	\$539.323	\$841.423
6	\$ 36.802.093	\$ 297.800	\$543.623	\$841.423
7	\$ 36.254.135	\$ 293.465	\$547.958	\$841.423
8	\$ 35.701.808	\$ 289.096	\$552.328	\$841.423
9	\$ 35.145.076	\$ 284.691	\$556.732	\$841.423
10	\$ 34.583.904	\$ 280.252	\$561.171	\$841.423
11	\$ 34.018.258	\$ 275.777	\$565.646	\$841.423
12	\$ 33.448.101	\$ 271.266	\$570.157	\$841.423

AÑO 2				
Mes	Préstamo	Intereses	Amortización	Cuota
1	\$ 32.873.397	\$ 266.720	\$574.703	\$841.423
2	\$ 32.294.111	\$ 262.137	\$579.286	\$841.423
3	\$ 31.710.206	\$ 257.518	\$583.905	\$841.423
4	\$ 31.121.644	\$ 252.862	\$588.562	\$841.423
5	\$ 30.528.389	\$ 248.168	\$593.255	\$841.423
6	\$ 29.930.404	\$ 243.438	\$597.986	\$841.423
7	\$ 29.327.650	\$ 238.669	\$602.754	\$841.423
8	\$ 28.720.089	\$ 233.863	\$607.560	\$841.423
9	\$ 28.107.684	\$ 229.018	\$612.405	\$841.423
10	\$ 27.490.395	\$ 224.135	\$617.289	\$841.423
11	\$ 26.868.184	\$ 219.212	\$622.211	\$841.423
12	\$ 26.241.012	\$ 214.251	\$627.173	\$841.423

AÑO 3				
Mes	Préstamo	Intereses	Amortización	Cuota
1	\$ 25.608.838	\$ 209.250	\$632.174	\$841.423
2	\$ 24.971.623	\$ 204.208	\$637.215	\$841.423
3	\$ 24.329.327	\$ 199.127	\$642.296	\$841.423
4	\$ 23.681.909	\$ 194.005	\$647.418	\$841.423
5	\$ 23.029.329	\$ 188.843	\$652.580	\$841.423
6	\$ 22.371.545	\$ 183.639	\$657.784	\$841.423
7	\$ 21.708.515	\$ 178.394	\$663.029	\$841.423
8	\$ 21.040.199	\$ 173.107	\$668.317	\$841.423
9	\$ 20.366.553	\$ 167.777	\$673.646	\$841.423
10	\$ 19.687.535	\$ 162.406	\$679.018	\$841.423
11	\$ 19.003.103	\$ 156.991	\$684.432	\$841.423
12	\$ 18.313.214	\$ 151.533	\$689.890	\$841.423

AÑO 4				
Mes	Préstamo	Intereses	Amortización	Cuota
1	\$ 17.617.822	\$ 146.032	\$695.391	\$841.423
2	\$ 16.916.886	\$ 140.487	\$700.936	\$841.423
3	\$ 16.210.361	\$ 134.898	\$706.526	\$841.423
4	\$ 15.498.201	\$ 129.264	\$712.160	\$841.423
5	\$ 14.780.363	\$ 123.585	\$717.838	\$841.423
6	\$ 14.056.800	\$ 117.861	\$723.563	\$841.423
7	\$ 13.327.468	\$ 112.091	\$729.332	\$841.423
8	\$ 12.592.319	\$ 106.275	\$735.148	\$841.423
9	\$ 11.851.309	\$ 100.413	\$741.010	\$841.423
10	\$ 11.104.390	\$ 94.504	\$746.919	\$841.423
11	\$ 10.351.514	\$ 88.548	\$752.875	\$841.423
12	\$ 9.592.636	\$ 82.544	\$758.879	\$841.423

AÑO 5				
Mes	Préstamo	Intereses	Amortización	Cuota
1	\$ 8.827.705	\$ 76.493	\$764.930	\$841.423
2	\$ 8.056.676	\$ 70.393	\$771.030	\$841.423
3	\$ 7.279.497	\$ 64.245	\$777.178	\$841.423
4	\$ 6.496.122	\$ 58.048	\$783.376	\$841.423
5	\$ 5.706.500	\$ 51.801	\$789.622	\$841.423
6	\$ 4.910.581	\$ 45.504	\$795.919	\$841.423
7	\$ 4.108.315	\$ 39.158	\$802.266	\$841.423
8	\$ 3.299.652	\$ 32.760	\$808.663	\$841.423
9	\$ 2.484.541	\$ 26.312	\$815.111	\$841.423
10	\$ 1.662.930	\$ 19.812	\$821.611	\$841.423
11	\$ 834.767	\$ 13.260	\$828.163	\$841.423
12	\$ 0	\$ 6.657	\$834.767	\$841.423