



**FACULTAD DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIO AMBIENTE Y
DESARROLLO SUSTENTABLE**

**IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE ECONOMÍA
CIRCULAR EN EL FIN DE VIDA DE TURBINAS EÓLICAS EN
CHILE**

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
SUSTENTABLE

ESTEFANÍA BARRA AMPUERO

DARIELA CISTERNAS CALLEJAS

**PROFESOR GUÍA: JAVIER OBACH MARTINIELLO,
MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA**

SANTIAGO – CHILE

2022

(i) ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	RESUMEN	6
II.	PALABRAS CLAVE	7
	Glosario	7
III.	INTRODUCCIÓN	8
IV.	OBJETIVOS.....	12
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	13
VI.	DIAGNÓSTICO ACTUAL DE LOS PARQUES EÓLICOS EN CHILE	16
1.	Contexto geográfico	16
2.	Energía Eólica y Sustentabilidad	17
3.	Demanda de Energía	18
4.	Potencial Energético	19
5.	Potencial eólico	20
6.	Evaluación Ambiental de los Parques Eólicos en Chile	24
VII.	DIAGNÓSTICO PROYECTADO DE LOS RESIDUOS DE LOS PARQUES EÓLICOS EN CHILE.....	26
1.	Elaboración base de datos de proyectos eólicos en Chile	26
2.	Análisis de la base de datos	27
3.	Proyección de los residuos de los parques eólicos en Chile.....	31
VIII.	MARCO LEGAL APLICABLE	42
1.	Institucionalidad Energética.....	42
2.	Institucionalidad Ambiental.....	43
3.	Planes, Políticas y Estrategias	45
4.	Convenios, Protocolos, Tratados y Acuerdos	47
5.	Normas reglamentarias sector energía.....	48
6.	Normas ambientales reglamentarias	48
IX.	ESCENARIO INTERNACIONAL SOBRE EL MANEJO DE RESIDUO DE LAS	

PALAS EÓLICAS	52
1. Reparar, Extender la vida útil de las palas	55
2. Prolongación de vida útil mediante reacondicionamiento	55
3. Repotenciación de los parques eólicos	56
4. Reutilización.....	56
• Reutilización de palas mediante venta de segunda mano.....	56
• Reutilización de palas para nuevas estructuras (reutilización estructural).....	58
5. Almacenamiento indefinido	62
6. Reciclaje	62
Reciclaje mecánico o molienda.....	63
Reciclaje térmico	65
Reciclaje Químico.....	67
Coprocesamiento.....	68
7. Rediseñar.....	70
X. BENCHMARK	71
XI. PROPUESTAS Y MEJORAS	78
XII. DISCUSIÓN	82
XIII. CONCLUSIÓN	84
XIV. BIBLIOGRAFÍA	87
XV. ANEXOS.....	95

(ii) ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Potencial de generación eólico por región.....	23
Tabla 2 Dimensiones principales de los aerogeneradores en Chile	27
Tabla 3 Propuestas para extender la vida útil de los parques eólicos	32
Tabla 4 Acción a realizar al fin de vida útil de los aerogeneradores, indicada en los proyectos evaluados en el SEIA.	33
Tabla 5 Composición de una pala de un aerogenerador.....	37
Tabla 6 Composición residuos potenciales de las palas de los parques eólicos de Chile entre los años 2025 - 2074.	38
Tabla 7 Composición de los residuos de palas eólicas en promedio anual	40

(iii) ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodología de Trabajo	13
Figura 2 Potenciales de energías renovables 2021	22
Figura 3 Proyectos eólicos en Chile aprobados y en calificación.	28
Figura 4 Proyectos eólicos de Chile según su vía de ingreso a evaluación, aprobados y en calificación.	28
Figura 5 Inversión en proyectos eólicos por año.	29
Figura 6 Potencia a instalar por parques eólicos al año.	30
Figura 7 Proyectos eólicos por Región.....	30
Figura 8 Cantidad de palas de aerogeneradores utilizadas por Región	31
Figura 9 Proyectos que proponen extensión de vida útil.	32
Figura 10 Cantidad de palas de aerogeneradores a generar por año de cierre de proyectos eólicos.	33
Figura 11 Peso de las aspas de acuerdo con la potencial nominal de la turbina.....	35
Figura 12 Peso de la pala de acuerdo con su longitud.....	36
Figura 13 Composición del material de la sección transversal de una pala de aerogenerador	39
Figura 14 Generación de palas en toneladas por año de cierre de proyectos eólicos en Chile	40
Figura 15 Composición de los residuos de palas eólicas por año	41
Figura 16 Esquema métodos de reciclaje para las palas eólicas	63
Figura 17 Gráfico de la demanda de energía en métodos de reciclaje para palas de aerogeneradores	74

Figura 18 Gráfico comparativo entre energía incorporada de la fibra producida y potencial procesos de reciclaje (promedio)	74
Figura 19 Costos y valores relativos estimados de las tecnologías de reciclaje de materiales compuestos	76

(iv) INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Parque eólico El Cabrito, España, el antes y el después de su repotenciación.	56
Imagen 2 Ejemplo de estructura reconstruida	57
Imagen 3 Ejemplo de piezas refabricadas	58
Imagen 4 Pala eólica reutilizada para mobiliario urbano como aparcamiento de Bicicletas en Dinamarca.	59
Imagen 5 Reutilización de pala eólica para construcción de puentes.....	59
Imagen 6 Representación del puente de palas eólicas de Roxborough, Midleton, Cork (cortesía: Asha. E . McDonald &Georgia Tech).....	60
Imagen 7 Palas eólicas reutilizadas para mobiliario urbano para patio de colegio en Holanda en Rotterdam.....	60
Imagen 8 Palas eólicas reutilizadas para postes de electricidad	61
Imagen 9 Representación de la línea de transmisión Re-Wind BladePole	61
Imagen 10 Fibras recuperadas mediante molienda para hormigón.....	65
Imagen 11 Ejemplo de skate termoformado con material compuesto	67

I. RESUMEN

Analizar el fin de vida de los parques eólicos y generar propuestas de economía circular, tiene como propósito ser un aporte para disminuir los residuos proyectados para esta industria, lo cual resulta relevante, ya que, de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, la vida útil promedio de los aerogeneradores en Chile es de 27 años. Dado lo anterior, se espera que las primeras turbinas queden fuera de uso durante el año 2025, y si la tendencia de crecimiento continúa se estima que sus residuos superen las 260.000 toneladas al 2074¹. Por lo tanto, este es un problema que se manifestará en Chile durante los próximos años, no identificándose alternativas de gestión para estos residuos en la actualidad, siendo el principal problema las palas, ya que poseen materiales difíciles de recuperar, debilitando así el desarrollo sustentable de la energía eólica.

En el presente trabajo se realizó un diagnóstico del problema en Chile, específicamente de los residuos generados por las aspas, se proyectaron los residuos, se analizó su marco legal, así como las soluciones que se están desarrollando internacionalmente, identificándose que Chile debe trabajar con urgencia en un marco legislativo que regularice este proceso incentivando la innovación y el desarrollo tecnológico, y como alternativa de gestión se deberán priorizar aquellas que fomenten la económica circular, siendo la primera opción identificada la reutilización.

¹ Considerando solo los proyectos aprobados actualmente en el Sistema de Evaluación Ambiental y asumiendo la aprobación de aquellos que se encuentran en calificación al 14 de junio de 2022.

II. PALABRAS CLAVE

Aerogeneradores, gestión de residuos, palas o aspas, reciclaje, reutilización, economía circular.

Glosario

- Aerogeneradores: Son estructuras que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica y luego eléctrica.
- Gestión de residuos: Distintas acciones que se pueden adoptar con el fin de hacernos cargo de los residuos de manera sanitaria y ambientalmente responsable. Siendo una opción no considerarlos residuos sino materiales, llevarlos a la circularidad extendiendo su vida útil.
- Palas o Aspas: Parte del aerogenerador encargada de capturar la fuerza y transmitir su potencia al rotor o eje de la turbina. Son las partes actualmente más difíciles de gestionar en esta industria al fin de la vida útil y el enfoque del presente trabajo de investigación
- Reciclaje: Input circular, disminuir los residuos que van a relleno sanitario, transformando un residuo, en otra cosa material o insumo.
- Reutilización: Utilizar más tiempo algo que se iba a desechar para el mismo fin que fue creado, o con un fin distinto.
- Economía circular: Constituye un cambio profundo en las formas de producción y consumo. Plantea la necesidad de dejar atrás la lógica lineal del extraer-producir-consumir-botar, para avanzar hacia un modelo en que los residuos y la contaminación se eliminan desde la etapa de diseño, los productos y los materiales que entran en el ciclo económico se aprovechan durante el mayor tiempo posible o incluso de forma indefinida, y los procesos económicos regeneran los sistemas naturales en lugar de degradarlos.

III. INTRODUCCIÓN

En el contexto mundial actual de cambio climático, tanto los Gobiernos, la industria, la Academia como la población, ha tomado conciencia y busca caminos que le permitan mantener los estándares de vida y desarrollo actual, pero de una manera más amigable para el medio ambiente. En este sentido, se han originado múltiples soluciones y nuevas concepciones de desarrollo, entre las que destacan, para el objetivo de este estudio, la economía circular y las energías renovables.

La economía circular representa un sistema económico que es estructurado con el objetivo de reducir los residuos y el consumo de recursos (Nautiyal y Goel, 2021). Se basa en tres principios: mantener productos y materiales en uso por el mayor tiempo posible, regenerar los sistemas naturales, y eliminar los residuos y la contaminación desde el diseño. Todo esto buscando desacoplar el desarrollo económico del consumo de recursos, reconociendo así los límites planetarios y los impactos que ha conllevado el modelo lineal empleado hasta el día de hoy, en el cual se consumen recursos naturales para producir productos y luego de que se utilizan, se desechan. La transición a una economía circular busca construir resiliencia, generar oportunidades económicas, brindar impactos ambientales y sociales de carácter positivo. Por lo tanto, este modelo ofrece una mirada sistémica, considerando todo el ciclo de vida de los productos para poder definir cuáles son las mejores formas de gestionar los flujos de materiales renovables y no renovables (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Por su parte, la energía eólica se trata de una fuente de energía renovable no convencional, que se ha convertido en la más prometedora de las últimas dos décadas (Liu y Barlow, 2017), esta energía se origina del movimiento de las masas de aire, es decir, el viento (Comisión Nacional de Energía, 2006) utilizando aerogeneradores o “molinos de viento”, cuyas palas o aspas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual posteriormente se convierte en energía eléctrica gracias a un generador. Por lo tanto, un “Parque Eólico” es una central eléctrica donde la producción de energía se consigue a partir de la fuerza del viento, mediante aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aire (Generadoras de Chile, s.f.). Esto convierte a la energía eólica en una energía renovable no convencional, lo que quiere decir, que es una alternativa de energía limpia, inagotable y amigable con el medio ambiente (ODEPA, 2020). Corresponde entonces a una fuente de energía que no consume o

agota su fuente generadora, en este caso el viento (Revista Energía, 2012). El término energía limpia se refiere a que tiene un excelente comportamiento ambiental respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, con emisiones entre 8-20 g eq/kWh, lo que está en el mismo rango de las emisiones de la energía nuclear (8- 45 g eq/kWh) (Lefeuvre et al., 2019) pero sin generar los desechos que genera esta industria. Debido lo anterior este tipo de energía se hace muy atractiva ante la búsqueda de alternativas más amigables para nuestro planeta, y desde el año 2016, junto a la energía proveniente de las hidroeléctricas se han convertido en los recursos de energía renovables líderes del mundo (Lefeuvre et al., 2019).

Es importante destacar que la energía eólica, si bien se conoce desde la antigüedad, en la actualidad nace como una solución para producir energía de manera más sustentable, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero causados por la quema de combustibles fósiles que se utilizan en la industria eléctrica tradicional. Sin embargo, la tecnología asociada a la energía eólica no está exenta de externalidades, siendo la gestión de las partes y piezas de un aerogenerador, al terminar su vida útil, su principal problema, contraponiéndose de esta manera a los lineamientos de la economía circular. De acuerdo con la literatura, la vida útil de los aerogeneradores es de 20-30 años, por lo que se espera que después del 2035 una gran cantidad de turbinas manufacturadas y puestas en servicio el 2010 progresivamente irán alcanzando su vida útil en el mundo, siendo Europa, Asia y Norteamérica los que alcanzarán una mayor cantidad de residuos, ya que son los continentes que tienen mayores cantidades de parques eólicos y con una mayor antigüedad (Lefeuvre et al., 2019). Para el caso de América Latina, y específicamente de Chile se espera que el aumento del fin de la vida útil y por lo tanto un aumento en los residuos, para el año 2040, acrecentando hacia el 2050. A nivel global se estima que los residuos alcancen los 43 millones de toneladas para ese mismo año (2050), de los cuales el 40% provendrán de China, el 25% de Europa, el 16% de Estados Unidos y el 19% del resto del mundo (Liu y Barlow, 2017). Por lo cual, prontamente se tendrá como tarea mundial, y nacional, reciclar el 80% de las turbinas instaladas actualmente, ya que hay menos espacio para las turbinas eólicas usadas y las nuevas son de mayor tamaño (Induambiente, 2021), siendo el principal problema las palas o aspas, ya que poseen componentes difíciles de recuperar y los procesos no se encuentran completamente desarrollados (Mello et al., 2022). Algunos de estos componentes son fibra de carbono, fibra de vidrio, polímeros y metales (Lefeuvre et al., 2019), convirtiéndose en un problema crítico de la sociedad actual, lo cual debilita el mercado de esta energía limpia y le resta calidad de vida a las personas.

Para estudiar los residuos provenientes de esta industria, debemos saber que un aerogenerador se compone de *palas (aspas)* encargadas de capturar la fuerza y transmitir su potencia al rotor, *buje o rotor* es el elemento de unión de las palas, *góndola* es un compartimiento cerrado que contiene los componentes más importantes del aerogenerador, *torre* es el elemento que sustenta la estructura, *cimentación* son los elementos estructurales que dan sustento al aerogenerador (García Bernal, 2021).

Por otra parte, se hace importante analizar que el aumento en la potencia instalada no sólo se debe al crecimiento en la cantidad de parques, sino que también a las mejoras tecnológicas y en la eficiencia de las turbinas. En este sentido el tamaño de las turbinas ha ido incrementando continuamente desde la década de 1980, esto se ha reflejado en la intensificación en el uso de la fibra de carbono que es un material más fuerte y ligero a comparación de las primeras turbinas de madera, metal, o posteriormente fibra de vidrio reforzada con plástico. Es importante considerar que la fibra de carbono no es un elemento que se encuentre directamente en la Tierra, pero se compone de múltiples elementos químicos procesados (Lefeuvre et al., 2019), lo que se traduce en consumo de energía, y utilización de recursos escasos, y considerando que los residuos no sólo se generan al final de la vida útil de los aerogeneradores, sino que también producto de un recambio anticipado de los aerogeneradores por la disponibilidad de tecnología más eficiente.

Es claro que es necesario un proceso sostenible para gestionar las turbinas eólicas al final de su vida útil con el fin de maximizar los beneficios ambientales de la energía eólica desde un enfoque de ciclo de vida y de economía circular, es decir, de la cuna a la cuna (Skelton, 2017), convirtiendo este tipo de energía en una energía realmente sustentable. Considerando también que la industria de la energía eólica es uno de los consumidores de compuestos de polímeros reforzados con fibra (FRP) de más rápido crecimiento en el mundo lo que se relaciona con el rápido crecimiento de la industria los últimos años, por lo que la importancia de encontrar soluciones a estos residuos toma mayor relevancia (Skelton, 2017).

Por lo tanto, al analizar el fin de vida de los parques eólicos y generar propuestas de economía circular para esta etapa, tiene como propósito ser un aporte y una guía para disminuir los residuos generados por esta industria, presentando soluciones que permitan que los componentes de los aerogeneradores no vayan a disposición final,

fomentando la reutilización y reciclaje de sus partes, especialmente de las aspas, que es el foco de este estudio. Lo que visualizamos como una oportunidad para desarrollar soluciones sostenibles en el tiempo, mejorando su modelo de negocio (BBVA, 2021), buscando las mejores propuestas de economía circular, considerando también que un 90% de los componentes de estos aerogeneradores son reciclables, pero sólo se recicla un 44% (Induambiente, 2021). Es por ello, que al analizar alternativas y generar propuestas, resulta primordial realizar un Benchmark para identificar las mejores prácticas disponibles, y que se adecuarían mejor a la realidad nacional, lo cual será un tema para desarrollar en este estudio.

Anticiparnos con este trabajo de tesis, proponiendo métodos de gestión de los residuos generados por esta industria, será un gran aporte para enfrentar un problema que se producirá durante los próximos años en el país. Por lo tanto, con la presente investigación se busca realizar un diagnóstico del problema en Chile, ejecutando un levantamiento de las centrales aprobadas y en calificación ambiental dentro del Sistema de Evaluación Ambiental a junio 2022, y así estimar sus potenciales residuos a generar al final de su vida útil; analizar su marco legal y relación con las políticas y programas, e identificar alternativas de tratamiento luego de su vida útil. Esto permitiría levantar información relevante para la gestión ambiental y la economía circular de esta industria, proporcionando lineamientos a nivel nacional para prevenir un conflicto socioambiental potencial que se generaría por el aumento de estos residuos en el futuro cercano.

IV. OBJETIVOS

- Objetivo general

Identificar oportunidades de economía circular durante el fin de vida o desperfecto de las aspas de turbinas eólicas en Chile

- Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico actual y proyectado de los residuos y materialidad provenientes del fin de vida, o desperfectos, de las aspas de turbinas de los Parques Eólicos en Chile.
2. Analizar el marco legal y su relación con las políticas y programas vigentes.
3. Analizar el escenario internacional en materia de gestión de aspas de los aerogeneradores, benchmark de mejores prácticas disponibles.
4. Generar propuestas de economía circular y mejoras en la gestión de los materiales (residuos).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales del presente trabajo corresponden a una base de datos obtenida de una fuente oficial como lo es el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) de Chile, y material bibliográfico obtenido principalmente de revistas científicas y páginas gubernamentales. El método utilizado es descrito y precisado en el diagrama que se presenta en la Figura 1.

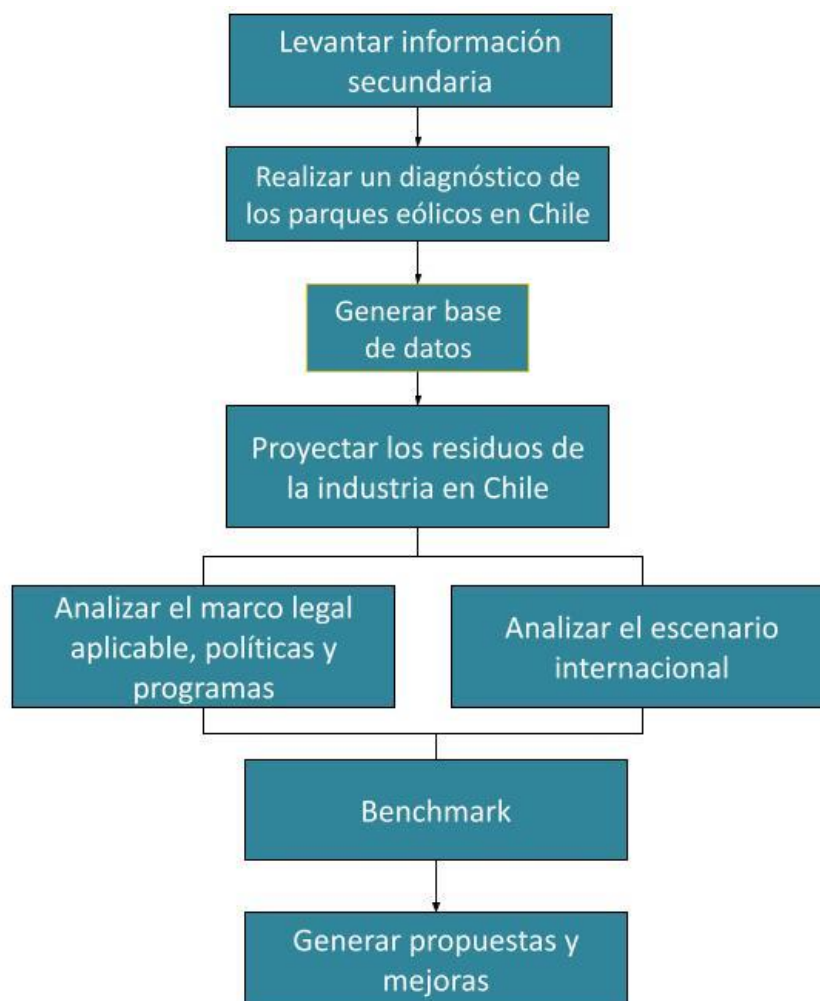


Figura 1 Metodología de Trabajo
Fuente: Elaboración propia, 2022

1. Levantar información secundaria: Se realizó búsqueda de información bibliográfica a través de fuentes oficiales como revistas científicas, artículos científicos, libros, páginas web gubernamentales, entre otros, de manera de contar con datos confiables, logrando una caracterización del área de estudio y de la industria de

generación de energía eólica.

2. Realizar un diagnóstico de los Parques Eólicos en Chile: Como resultado del levantamiento de información se obtuvo un diagnóstico del estado actual de Chile en relación con los parques de generación de energía eólica, la geografía, la sustentabilidad, la demanda actual y proyectada de energía en el país, y el potencial energético del país y de este tipo de tecnología.

3. Creación de la base de datos: A su vez se realizó una revisión de los proyectos ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), revisando los proyectos aprobados y los que se encontraban en calificación a la fecha de elaboración de la base de datos (junio 2022), por lo tanto, consideraron solo los Parques Eólicos mayores a 3MW, que son aquellos que ingresan al SEIA según lo establecido en la letra c) del artículo 10 de la Ley N°19.300 y artículo 3 letra c) del Reglamento del SEIA. Posteriormente se generó una base de datos que entrega información acerca de la cantidad de parques que hay actualmente instalados y en desarrollo, energía generada, vida útil declarada, materialidad de sus componentes, cantidad de aspas y gestión de residuos considerada. Esto consideró un total de 130 proyectos evaluados entre enero 2007 y junio 2022.

4. Proyectar los residuos de la industria en Chile: A partir de la base de datos generada y la información secundaria levantada, fue posible obtener la cantidad estimada de los residuos de interés generados al final de la vida útil de los parques eólicos (las aspas), y sus componentes. La información obtenida nos entregó datos de un escenario nacional hasta el año 2074, considerando solo los proyectos aprobados actualmente y asumiendo la aprobación de aquellos que se encuentran en calificación al 14 de junio 2022. La ejecución o construcción de estos proyectos también fue un supuesto que se consideró.

5. Analizar el marco legal aplicable, así como políticas y programas: En relación con el escenario actual y el proyectado, se realizó un análisis de estos residuos en cuanto la normativa vigente, planes y programas y cómo estos se hacen, o no, cargo de estos residuos, y qué obligaciones tienen los titulares al respecto.

6. Analizar el escenario internacional: El analizar el escenario internacional es un paso fundamental para el desarrollo de este trabajo de tesis, ya que Chile si bien es un gran desarrollador de energías renovables, no es pionero en esta industria, por lo que tomar el ejemplo de países que tiene mayor experiencia al respecto y que posiblemente ya se encuentren realizando recambio de componentes o partes de los aerogeneradores, por lo tanto, enfrentando el problema de generación de residuos, nos permitió visualizar opciones, soluciones y aprender de errores cometidos y/o identificar

oportunidades.

7. Realizar Benchmark: A partir del análisis del escenario internacional es posible comparar a Chile con los otros países estudiados, con la finalidad de comprobar qué iniciativas se adecuarán mejor a la realidad nacional, en pos del cumplimiento normativo, factibilidad económica y disminución de impactos socioambientales.

8. Generar propuestas y mejoras: Estos últimos pasos del trabajo de investigación, permitieron desarrollar propuestas y mejoras que posibilitan gestionar de mejor manera los residuos provenientes de los parques eólicos. Estas propuestas privilegian alternativas que promuevan la economía circular dentro de la gestión de estos residuos.

VI. DIAGNÓSTICO ACTUAL DE LOS PARQUES EÓLICOS EN CHILE

A continuación, se presentan los resultados de la primera fase de este trabajo correspondiente al levantamiento de información secundaria y el diagnóstico y contextualización de la situación actual del país.

1. Contexto geográfico

Chile se encuentra en el extremo sur del continente americano, representando un estrecho margen de tierra entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes. Tiene una longitud de 4.270 km y un ancho promedio de 200 km, alcanzando una superficie continental de 756.626 km² que, sumado al territorio Oceánico y Antártico, alcanza una superficie total de 2.006.626 km². El territorio se encuentra dominado por la presencia de la Cordillera de los Andes hacia el este y un extenso litoral al oeste, distinguiendo de este a oeste una zona llamada depresión intermedia, que va desde el norte del país hasta Puerto Montt, y la Cordillera de la Costa, que alcanza una altura máxima de 2.000 m.

El país cuenta con una gran diversidad climática que se explica por sus características geográficas, determinada principalmente por su extensión latitudinal y su posición frente al océano, la corriente de Humboldt y el Anticiclón del Pacífico. Esto se refleja en la aridez extrema del desierto en el extremo norte, un clima templado en la zona central y un clima lluvioso y frío del sur (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, s.f.). Respecto de las características climáticas una de las que interesa profundizar, en el contexto de este documento, es el viento. La generación del viento se explica por los cambios de temperatura que forman diferencias de presión en los gases y por la rotación de la Tierra. Entonces el viento corresponde a un fenómeno que se genera por la necesidad del sistema climático de equilibrar las diferencias de temperaturas entre la zona tropical y la zona polar, provocando el movimiento de las masas de aire, por lo tanto el viento se encuentra en casi todo el planeta, sin embargo, el recurso idóneo para la generación eléctrica se ubica en áreas específicas, que generalmente corresponden a sitios en áreas prominentes sobre lomas, en planicies o áreas costeras abiertas y pasos entre montañas donde se canaliza mejor el viento (Ministerio de Energía, 2022). En este sentido en Chile es posible observar zonas con más o menos viento, de acuerdo con la información cartográfica entregada por el Explorador Eólico del Ministerio de Energía las zonas más ventosas corresponden al sur del país, debido a su geografía más accidentada y cercanía con el mar que en ocasiones ingresa al continente, y a la zona

cordillerana del norte y centro del país.

Respecto a su demografía, Chile se encuentra en una etapa avanzada de envejecimiento poblacional, con una baja fecundidad y un bajo nivel de mortalidad, además de un aumento sostenido de la esperanza de vida al nacer. De acuerdo con el último censo realizado el año 2017, la población existente alcanza los 17,5 millones y se espera para el año 2050 una población de 21,6 millones. Un fenómeno a nivel mundial, del cual Chile no se ha visto exento, es el aumento de la migración, convirtiéndose en un polo de atracción importante a nivel latinoamericano. Situación que ha influido en el aumento poblacional y la demanda de servicios, y por su puesto de Energía (Instituto Nacional de Estadística, s.f.).

2. Energía Eólica y Sustentabilidad

Los parques eólicos en Chile tienen los siguientes objetivos comunes, a escala global ayudan a mitigar el efecto invernadero, desplazando y reduciendo el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, lo que además puede ser tranzado en mercados de carbono existentes o futuros. A nivel país, contribuyen a la diversificación de la Matriz Energética y al término de la dependencia energética en las actividades básicas del país, ya que los combustibles fósiles son importados no se producen en Chile (Inerco, 2018).

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la cual fue aprobada en 2015 por la Asamblea General de Las Naciones Unidas incluye temas prioritarios para basar las estrategias y políticas de los países, uno de los temas es el Objetivo 7: *Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos*, ya que toda actividad que desarrolla en la sociedad moderna actual requiere de energía, y los combustibles fósiles han impactado negativamente al planeta acelerando el cambio climático (Agenda 2030 en América Latina y el Caribe, s.f.).

En este contexto Chile, de acuerdo con reportes internacionales como el Sustainable Development Report 2021, el ODS 7 es el cuarto objetivo con mejor desempeño y cumplimiento, gracias al gran acceso al suministro eléctrico, el uso de combustibles y tecnologías limpias y también la proporción de energías renovables en el suministro total de energía. Desde el año 2012 cuando se lanzó la Estrategia Nacional de Energía 2012-2030, con el fin de promover energías limpias y renovables en el país, Chile comenzó

esta transición de los combustibles fósiles al empleo de energías más limpias. Asimismo, en la cumbre de Cambio Climático COP25 (2019), Chile se comprometió a aumentar al 70% las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) en la matriz energética regional al 2030, para reducir las emisiones y no fomentar el calentamiento global. Posteriormente en la Cumbre del Cambio Climático COP26 (noviembre 2021), Chile se comprometió a adoptar la “Declaración de transición global de carbón a energía limpia” (Morales Estay, 2021).

En el año 2020 el Ministerio de Energía publicó la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y en 2021 Corfo lanzó el programa para acelerar el desarrollo colaborativo de esta tecnología, especialmente en la Región de Magallanes por tener un gran potencial eólico que serviría para abastecer las plantas de hidrógeno, por lo que se espera un crecimiento exponencial de los parques en la zona austral del país (CORFO, 2021).

Si analizamos esta serie de compromisos y objetivos de sustentabilidad se verían potenciados por una gestión de residuos adecuada al final de la vida útil de los aerogeneradores, evitando que las palas tengan como disposición final un vertedero, lo cual además de tener efectos negativos para el medio ambiente, también genera efectos negativos en la población que podría ver menoscabada su calidad de vida a causa de los residuos generados, y también para la economía ante el desperdicio de materiales escasos que para obtenerlos se ha invertido una gran cantidad de energía y recursos.

3. Demanda de Energía

La demanda de energía eléctrica se refiere a la proyección de la cantidad de energía que necesitará el país para satisfacer sus necesidades y dar funcionamiento en un periodo de tiempo indicado. Esta información es de especial relevancia para este estudio ya que, junto al acápite siguiente de potencial energético, nos permite dimensionar el crecimiento que tendrá el rubro energético durante los próximos años, y por consiguiente como aumentarán la generación de residuos ante la instalación de nuevos parques eólicos, o ante el recambio de componentes en búsqueda de una mayor eficiencia de generación. Especialmente si se considera que esta demanda energética de acuerdo con los compromisos y acuerdos adoptados en relación con la sustentabilidad, el cambio climático y la eficiencia energética del país apuntan a la descarbonización de la actual matriz, por lo tanto, para satisfacer esta demanda será necesario la instalación de más plantas de generación de energía a partir de fuentes no convencionales como lo son los

parques eólicos.

En este sentido, primeramente, es necesario explicar que el mercado eléctrico nacional está compuesto por tres sistemas independientes, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el Sistema Eléctrico de Aysén (SEA) y el Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM), siendo estos dos últimos conocidos como Sistemas Medianos (SSMM).

La Comisión Nacional de Energía (CNE), dentro de sus atributos de establecer plazos, requisitos y condiciones para la fijación de precios, publica, además, el informe de “Estudio de Previsión de Demanda”, cuya última versión disponible, y utilizada para este estudio, es la del año 2021. En esta se realiza una proyección hasta el 2041, considerando la demanda esperada para todos los sistemas, separándolos en Sistema Eléctrico Nacional y Sistemas Medianos. Dicho informe muestra que en los últimos años se ha visto un fuerte crecimiento de la demanda de energía eléctrica desde 22.653 GWh en el año 2006 a 27.608 GWh el 2020, de acuerdo con la información de demanda de clientes regulados por Empresas Distribuidoras del SEN. Asimismo, al analizar las proyecciones del CNE, para el SEN se prevé que durante el periodo de 2021-2041 el consumo eléctrico aumente en un 66,4%, con una tasa promedio anual de 2,58%, es decir, un crecimiento de 73,8 TWh a 122,8 TWh en un periodo de 20 años (Comisión Nacional de Energía, 2022).

En el caso del SSMM es un poco más complejo analizar la proyección en la demanda, ya que el CNE entrega la información por distribuidora, por lo tanto y a modo de simplificar el análisis se realiza una suma de la demanda por región, esperando así, para la Región de Aysén al año 2041 un aumento de 50.134 MWh y finalmente para la Región de Magallanes el aumento esperado es de 181.182 MWh.

4. Potencial Energético

El potencial energético se refiere a la cantidad de energía que es posible producir en Chile u oferta. En este sentido con el aumento de la demanda de energías limpias ha crecido fuertemente el potencial energético, observándose una diversificación en la matriz, especialmente en relación con el ingreso de las fuentes de generación renovables como lo son la eólica, solar, hidroeléctrica y geotérmica, entre otras. Esto se debe a que Chile es un país con alto potencial de generación de energía renovable, el cual se estima de un potencial de 2.153 GW, valor que representa 76 veces la capacidad

instalada eléctrica del año 2021, esto considerando si se pudiera utilizar todo el territorio nacional para proyectos de energía (Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles, 2021). Este potencial energético es el que ha llevado a nuestro país a posicionarse como el país más atractivo para invertir en energías limpias, esto de acuerdo con el análisis realizado el año 2021 por Bloomberg, empresa consultora que asesora en la toma de decisiones, a través de una red de información, personas e ideas, posicionando a Chile en el primer lugar en América por cuarto año consecutivo, superando así a Brasil, Canadá y Estados Unidos (Diario Sustentable, 2021).

5. Potencial eólico

El primer parque eólico de Chile se instaló en Alto Baguales, en las cercanías de Coyhaique, Región de Aysén, en noviembre de 2001. Consistió en un parque pequeño de 2 MW con tres rotores con capacidad nominal de 660 kW y que abastece a casi 20.000 familias. En la actualidad, tanto el número de parques en Chile como la potencia generada ha aumentado, sumando hoy en día 36 parques eólicos en funcionamiento, siendo las principales empresas detrás de este crecimiento, Enel con nueve (9) parques y AES Chile con ocho (8) centrales. El incremento en la cantidad de parques o centrales generadoras se ha visto reflejado en un aumento en la capacidad instalada en Chile, representando el 11,7% del Sistema Eléctrico Nacional, para febrero de 2022 (Generadoras de Chile, s.f.). Se espera que este número aumente especialmente con el fomento de la generación del hidrógeno verde.

Si bien el primer Parque se instala el año 2001, como se mencionó en el párrafo anterior, se registra generación eléctrica en SEN por primera vez en el año 2007, aportando sólo 3 GWh, generación que al año 2021 ha alcanzado ya los 7.095 GWh (Generadoras de Chile, s.f.). Este aumento se puede relacionar al potencial eólico de Chile, situación que se analiza en este apartado.

Al momento de invertir en desarrollo de energía, además de considerar la demanda de ésta, se debe considerar el potencial de generación, lo cual en el caso de la energía eólica está fuertemente relacionado a la locación que se elija dentro del país, como se explicó en el apartado 1. En este sentido el Ministerio de Energía en colaboración con otras entidades como la Universidad de Chile han elaborado un mapa de vientos de Chile, cuya información es pública y gratuita. Este mapa se ha construido a partir de información obtenida de estaciones de monitoreo y modelaciones numéricas (modelo

numérico Weather Research and Forecasting WRF). Este mapa de vientos se encuentra disponible en el portal de internet “Explorador de Energía Eólica”, el cual cubre todo el territorio nacional desde 5 hasta 180 metros sobre la superficie. En este mapa se puede observar que las zonas con mayor potencial de generación de energía eólica, en base a la velocidad del viento que corre en el lugar. Es así como se identifica que los lugares con mayor potencial corresponden al sector cordillerano del país, sector costero, y también se observa un fuerte incremento hacia el extremo sur de Chile. Lo anterior, es concordante con la información publicada por el Ministerio de Energía en su informe de Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables, 2021, información que se representa en la Figura 2.

El explorador Eólico tiene una escala que va desde “sin datos S/D” hasta el 9.0, siendo éste el indicador de mayor potencial de generación de energía eólica, la potencia alcanzada en estas zonas de mayor viento dependerá del aerogenerador utilizado y su tecnología, permitiendo así a esta herramienta (el explorador) realizar simulaciones de acuerdo con la ubicación seleccionada y los aerogeneradores considerados por los inversionistas, para saber qué potencial de energía se alcanzará. El explorador además entrega información de la velocidad del viento durante los últimos meses en el punto seleccionado del territorio nacional y las estaciones cercanas que proporcionan esa información.

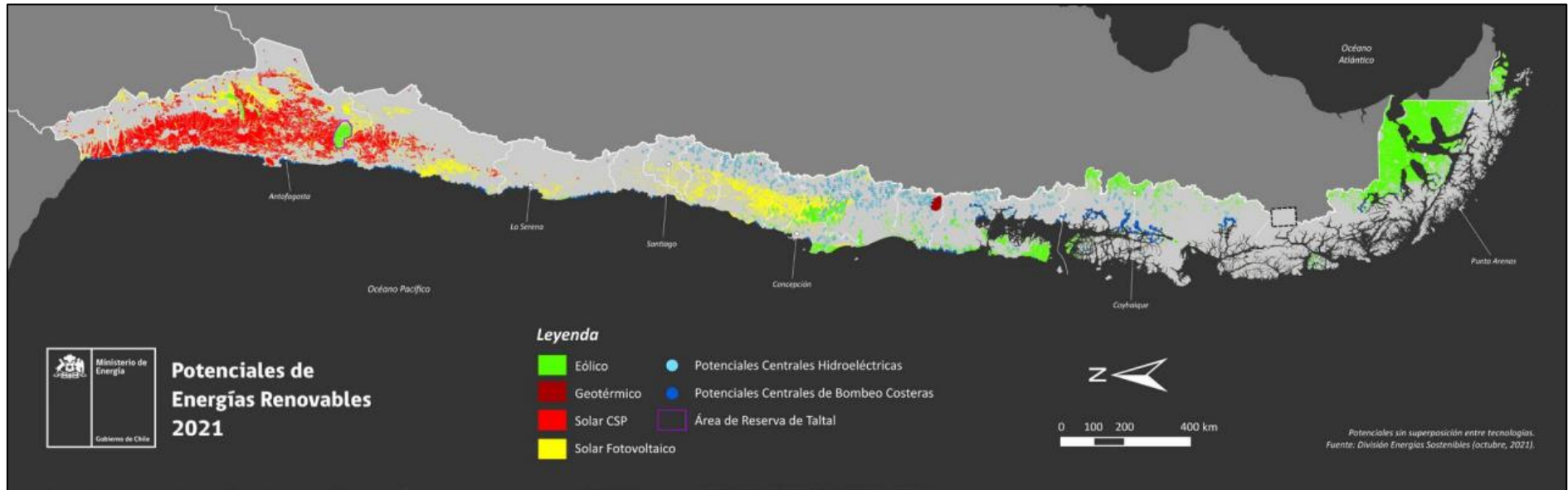


Figura 2 Potenciales de energías renovables 2021
Fuente: Unidad de Gestión de Información División Energías Sostenibles, 2021.

Por otra parte, se cuenta con el informe del Ministerio de Energía de Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables, 2021, documento que entrega un análisis mucho más profundo donde además de evaluar los modelos numéricos de viento de cada sector del país, toma también en consideración a través de sistemas de información geográfica, la compatibilidad territorial y ambiental de los posibles parques eólicos, obteniendo así el potencial de generación de cada región, que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Potencial de generación eólico por región.

Región	Potencial de Generación MW
Arica y Parinacota	0
Tarapacá	0
Antofagasta	15.045
Atacama	316
Coquimbo	1.191
Valparaíso	24
Metropolitana	33
O'Higgins	45
Maule	1.167
Ñuble	1.705
Biobío	12.318
Araucanía	6.657
Los Ríos	3.123
Los Lagos	15.584
Aysén	20.255
Magallanes	121.915
Total, MW	199.378

Fuente: Unidad de Gestión de Información División Energías Sostenibles, 2021.

La valorización e identificación de estas áreas que reúnen condiciones favorables para la instalación de proyectos se basa en la selección y superposición de factores georreferenciados que requieren umbrales de restricción a fin de establecer en que lugares es deseable desarrollar los proyectos, a medida que cumplan con los

multicriterio técnicos, ambientales y territoriales. Los factores técnicos considerados para la determinación del potencial de generación de energía eólica corresponden a la pendiente, altitud, áreas con proyectos en operación, prueba y/o en construcción; por su parte los factores ambientales fueron los sitios SNASPE, Sitios Ramsar, Salares, Inventario de Cuerpos de Agua, Inventarios de Glaciares y Volcanes activos; finalmente, para el factor territorial se consideraron los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), cuerpos de agua antropizados, red hidrográfica, red vial, línea de costa, clases de capacidad de uso de suelo con aptitud agrícola y presencia de relaves mineros.

6. Evaluación Ambiental de los Parques Eólicos en Chile

En términos ambientales Chile se encuentra bajo el alero de la Ley N°19.300/1994 sobre Bases Generales del Medio Ambiente y sus respectivas modificaciones², en la cual se establecen diferentes instrumentos de gestión ambiental entre estos el procedimiento de evaluación ambiental de proyectos, es así como se cuenta con un Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) que es un instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo que permite a la autoridad saber si un proyecto cumple con la legislación ambiental y si es que se hace cargo de sus potenciales impactos ambientales significativos, este sistema es administrado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) (SEA, s.f.).

Los proyectos que deben someterse al SEIA son aquellos que presentan una de las tipologías señaladas en el listado del artículo 10 de la Ley N°19.300 de 1994, las cuales son especificadas en el artículo 3° del Decreto Supremo N°40 del 2012 del Ministerio de Medio Ambiente que aprueba el Reglamento del SEIA (RSEIA). En el caso particular de los Parques Eólicos, la tipología aplicable corresponde a la establecida en la letra c) generadoras de energía mayores a 3 MW, o bien, modificaciones de proyectos por el artículo 2 letra g) del RSEIA, y además, sino presenta estas características también podría someterse a evaluación de manera voluntaria, por lo tanto, determinar si el proyecto debe o no ser presentado al SEIA es responsabilidad del titular del Proyecto determinarlo, así como determinar su forma de ingreso. Para su evaluación existen dos

² Destacando dentro de sus principales modificaciones:

Ley 20.417/2010 Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.

formas o instrumentos de ingreso al Sistema, determinadas según los impactos potenciales que produzca, por lo que, si genera o presenta al menos uno de los efectos, características o circunstancias (ECC) del artículo 11 de la Ley N°19.300, entonces corresponde que ingrese como Estudio de Impacto Ambiental (EIA), de lo contrario como Declaración de Impacto Ambiental (DIA) (SEA, s.f.), situación en la que se deben descartar la generación de estos ECC.

Una DIA se define como un documento descriptivo de una actividad o proyecto que se pretende realizar, o de las modificaciones que se le introducirán a un proyecto existente, otorgado bajo juramento por el respectivo titular, cuyo contenido permite al organismo competente evaluar si su impacto ambiental se ajusta a las normas ambientales vigentes. Por su parte, un EIA corresponde a un documento que describe pormenorizadamente las características de un proyecto o actividad que se pretenda llevar a cabo o su modificación, y que debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir la o las acciones que ejecutará para impedir o minimizar sus efectos significativamente adversos (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2022).

Por lo tanto, los proyectos de generación de energía del tipo eólico que deben someterse a evaluación ambiental son aquellos que generan más de 3 MW, bajo el instrumento que se determine de acuerdo con las características del Proyecto particular en análisis.

VII. DIAGNÓSTICO PROYECTADO DE LOS RESIDUOS DE LOS PARQUES EÓLICOS EN CHILE

1. Elaboración base de datos de proyectos eólicos en Chile

Para realizar la proyección de los residuos se elaboró una base de datos de los parques eólicos de Chile a partir del buscador de proyectos del SEA³, por lo tanto, como se ha mencionado, se consideran sólo centrales generadoras mayores a 3 MW, contemplando tanto Estudios de Impacto Ambiental (EIA) como Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) que estuvieran aprobados o en calificación a junio 2022, asumiendo que todos ellos han sido construidos o se van a construir en el territorio, en la fecha indicada como inicio de proyecto, o bien en el año de obtención de su respectiva Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Posteriormente, se realizó una depuración de la base de datos descargada, para evitar duplicidad y eliminar la información que no era valiosa para efectos del presente estudio, asimismo se le incorporaron campos de interés, cuya información fue obtenida ingresando y revisando la carpeta de evaluación ambiental de cada proyecto, estudiando no solo los documentos presentados en sus respectivas DIA o EIA, sino que también su RCA.

La base de datos realizada cuenta con campos como:

- Nombre del proyecto,
- Archivo digital en el SEIA,
- Región de emplazamiento,
- Inversión en MMU\$,
- Fecha de presentación del proyecto,
- Cantidad de aerogeneradores,
- Potencia nominal a instalar en total y por aerogenerador,
- Fecha inicio operación,
- Altura de buje,
- Diámetro del rotor,
- Cantidad de aspas,
- Longitud aspas,
- Materialidad,

³ <https://www.sea.gob.cl/>

- Vida útil,
- Año de cierre,
- Extensión de vida útil y método,
- Gestión de los residuos de los aerogeneradores,
- Entre otros.

Para obtener más información con respecto a la base de datos diríjase al Anexo 1.

2. Análisis de la base de datos

Para efectos de este estudio se consideraron un total de 130 proyectos eólicos, los cuales fueron obtenidos de la elaboración de esta base de datos, y de la información que ésta nos entregase determinó una vida útil promedio que ronda los 27 años, la potencia nominal a instalar por aerogenerador corresponde a 3,5 MW y la inversión promedio por proyecto es de 210 millones de dólares. El total de aerogeneradores a instalar considerando todos estos proyectos es de 5.127, todos ellos con diferentes características, y empleando un total de 15.380 palas o aspas, tomando en consideración que cada aerogenerador tiene tres (3) palas. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones promedio de las principales partes de los aerogeneradores de los parques eólicos de Chile.

Tabla 2 Dimensiones principales de los aerogeneradores en Chile

Promedio Altura de buje (m)	113
Promedio diámetro del Rotor (m)	125
Promedio Longitud palas (m)	62

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del total de proyectos estudiados 114 se encontraron aprobados y 16 en calificación, tal como se muestra en la Figura 3. De estos, cabe señalar que la gran mayoría, 102, ingresaron a evaluación al Sistema de Evaluación Ambiental mediante DIA y sólo 28 como EIA, ver Figura 4.

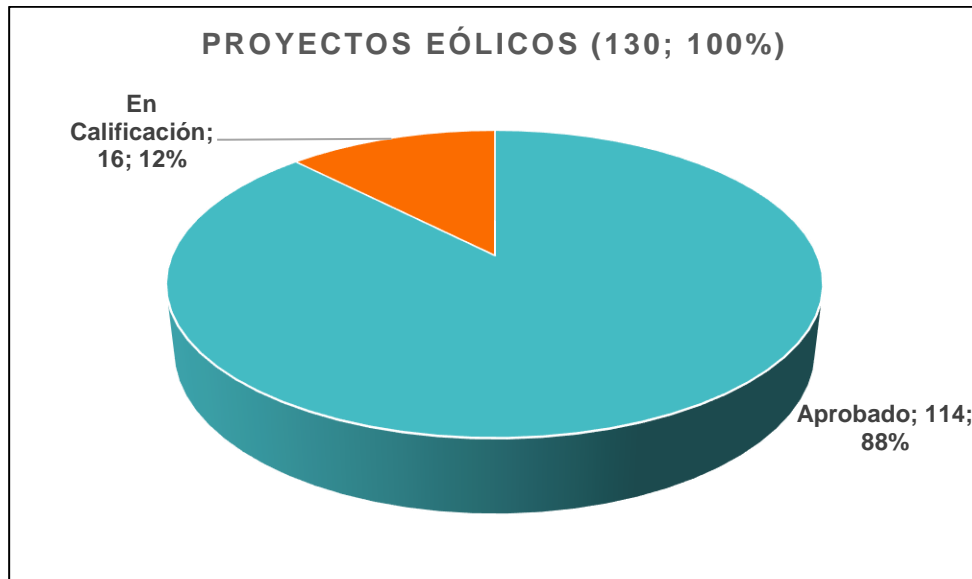


Figura 3 Proyectos eólicos en Chile aprobados y en calificación.

 Fuente: Elaboración propia, 2022.

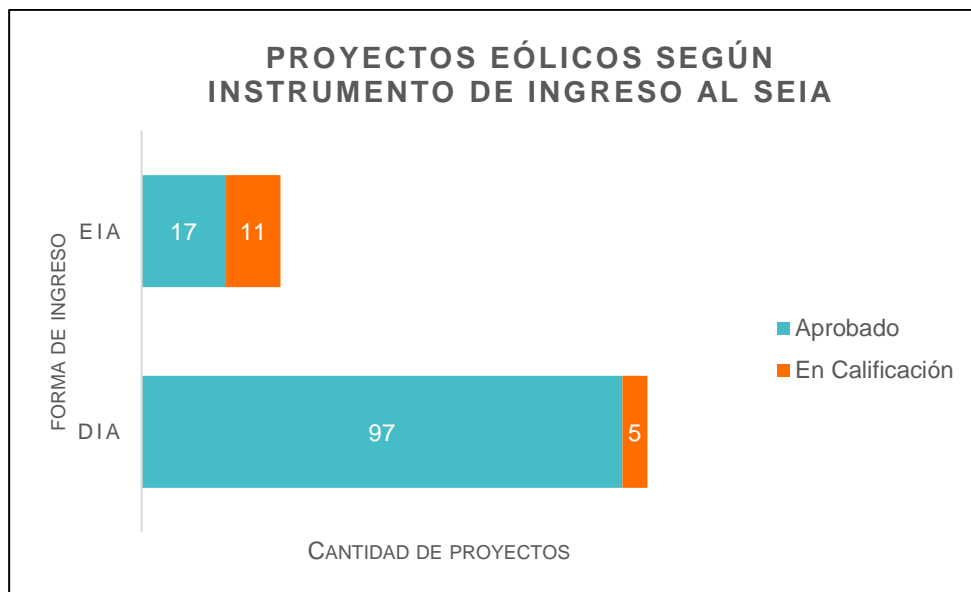


Figura 4 Proyectos eólicos de Chile según su vía de ingreso a evaluación, aprobados y en calificación.

 Fuente: Elaboración propia, 2022.

Al analizar la inversión realizada en proyectos eólicos respecto de los años en que se presentaron los proyectos a evaluación, cabe destacar que el año 2012 es cuando más se invirtió en este tipo de tecnología de generación de energía, lo cual se debe principalmente a que en ese año se lanzó la Estrategia Nacional de Energía 2012-2030 la cual promueve el desarrollo de energías limpias y renovables (Figura 5). No obstante, al analizarlo desde el punto de vista de la potencia nominal a instalar no coincide la

distribución, encontrándose que en el año 2020 se presentó la mayor potencia nominal a instalar, seguido del año 2012, lo cual podría deberse principalmente al aumento de la demanda de estas tecnologías y la baja de sus costos de implementación, además del inicio de los megaproyectos eólicos como el Parque Eólico Horizonte de Colbún, ubicado en la Región de Antofagasta el cual se presentó en 2020 y se aprobó el 31 de agosto 2021 mediante RCA N°20210200118, éste consiste en la instalación de 140 aerogeneradores de 7 MW cada uno, sumando en total una potencia nominal a instalar de 980 MW, siendo el proyecto más grande hasta la actualidad en el país y en América Latina, que permitirá evitar la emisión de 1,2 millones de toneladas de CO₂ al año y podrá abastecer a más de 700 mil hogares (Colbún S.A, 2020). Ver Figura 6.

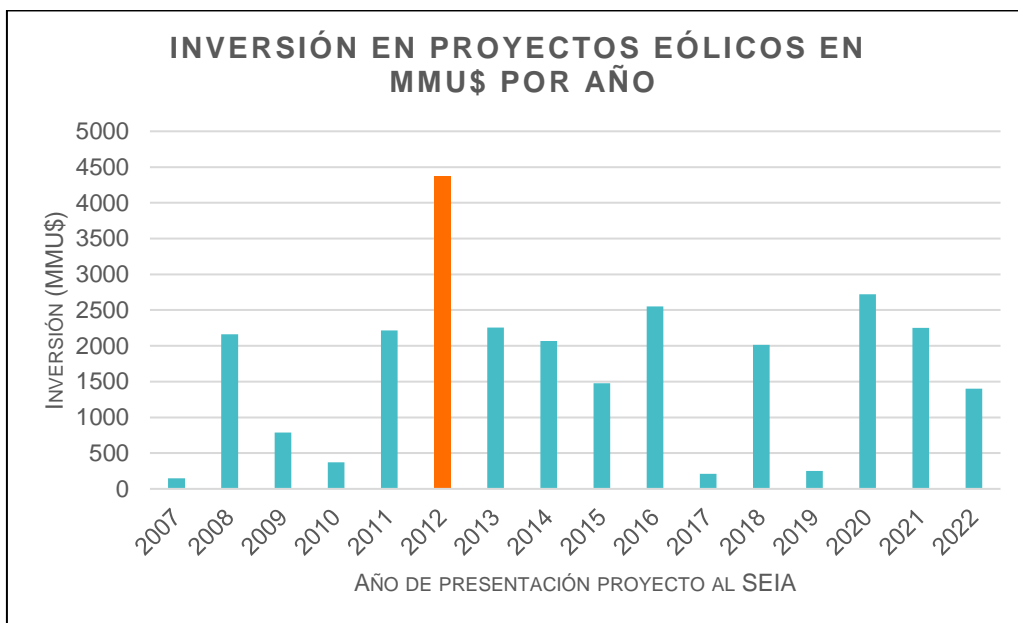


Figura 5 Inversión en proyectos eólicos por año.
Fuente: Elaboración propia, 2022.

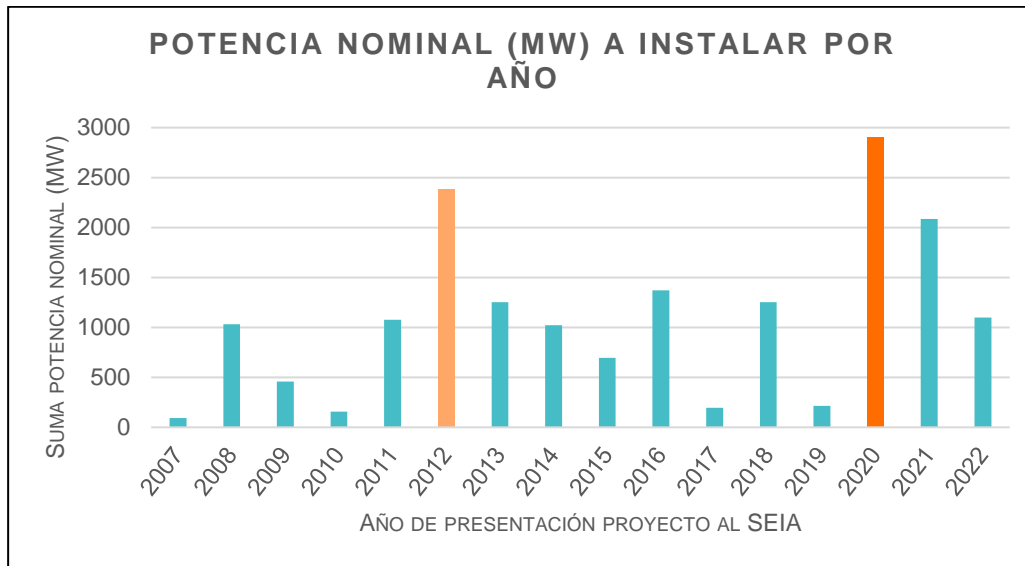


Figura 6 Potencia a instalar por parques eólicos al año.
 Fuente: Elaboración propia.

Desde la perspectiva territorial, se han presentado a evaluación ambiental mayoritariamente proyectos emplazados en la Región del Biobío, seguidos de la Región de Antofagasta y Coquimbo, tal como se aprecia en la Figura 7. Dónde no llama la atención que el Biobío destaque en cantidad proyectos ya que la región posee un gran potencial energético como ya se revisó anteriormente en la Tabla 1 Potencial de generación eólico por región, al igual que la región de Antofagasta, no así la de Coquimbo.

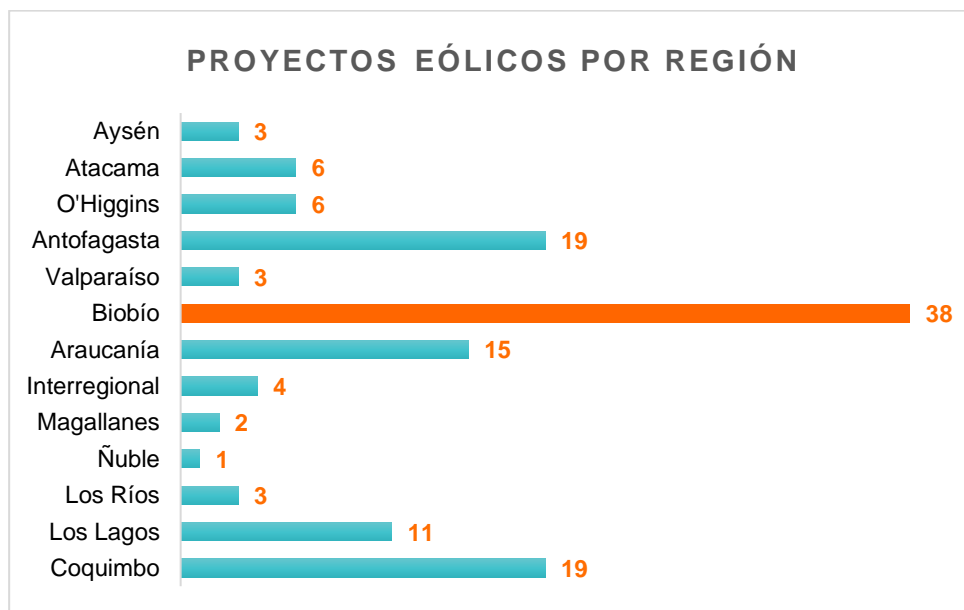


Figura 7 Proyectos eólicos por Región.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la cantidad de palas empleadas por región, esta información tampoco coincide con la distribución regional de los proyectos, dándose la mayor cantidad en la Región de Antofagasta, seguido por la Región de Coquimbo y luego la Región de Biobío. Esto tiene respuesta por el volumen de palas utilizadas en los megaproyectos que se están implementando en el norte con mayor cantidad de aerogeneradores y por ende palas, y también por la presencia de varios proyectos pequeños y medianos en el Biobío (Figura 8).

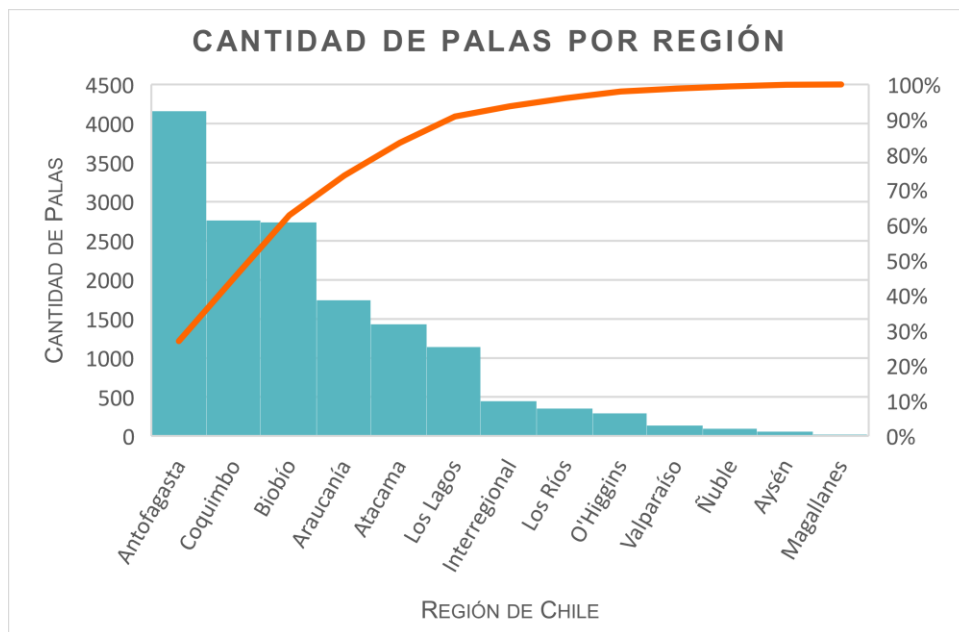


Figura 8 Cantidad de palas de aerogeneradores utilizadas por Región
 Fuente: Elaboración propia.

Además, la Región de Antofagasta ha sido identificada como potencial Polo de Generación Eléctrica en el Informe Preliminar de la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) 2023-2027, publicado el 30 de agosto de 2021, ya que existen recursos para la producción de energía eléctrica a partir de energías renovables como lo son los parques eólicos, por lo que esta tendencia debería permanecer en el tiempo (Ministerio de Energía, s.f.).

3. Proyección de los residuos de los parques eólicos en Chile

Al analizar los 130 proyectos eólicos estudiados, se da cuenta que el 86% propone

extender la vida útil, el 5% no lo propone y el 9% no entrega información al respecto, tal como se aprecia en la Figura 9. Con respecto al cómo plantea hacerlo, se proponen distintas alternativas, incluso algunos proyectos entregan más de una opción, entre las que más se repitieron fueron la implementación de mejoras o innovaciones tecnológicas, seguido de mantenencias adecuadas y luego renovación de equipos, tal como se observa en la Tabla 3, sin embargo, no se ahonda más en este sentido sin indicar cuantos años se extenderá la vida útil, ni ningún tipo de información detallada.

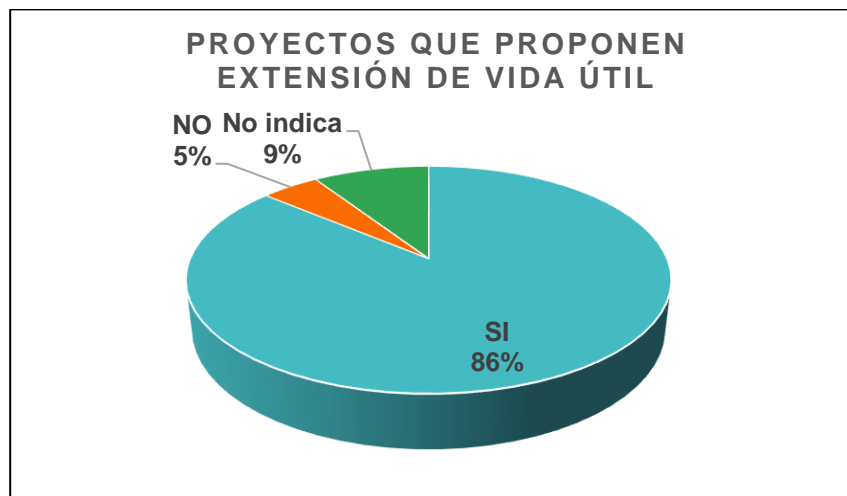


Figura 9 Proyectos que proponen extensión de vida útil.
 Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 3 Propuestas para extender la vida útil de los parques eólicos

Propuesta para extender la vida útil	Cantidad de proyectos que lo propone	Porcentaje
Renovación de equipos	40	31%
Mantenencias adecuadas	42	32%
Modificaciones	7	5%
Reacondicionamiento de instalaciones	8	6%
Mejoras/Innovaciones tecnológicas	68	52%
Modernizar	20	15%

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del mismo modo los proyectos presentan además una descripción de la fase de cierre o abandono, donde se describe qué se hará y cómo se llevará a cabo. Dentro de esta descripción en algunos casos se consideran los residuos a generar y qué hacer con ellos, es así como se proponen acciones como reciclaje, reutilización, venta y/o

disposición final, siendo las más reiterativas la disposición final, la reutilización y el reciclaje. Muchos proyectos indicaron más de una alternativa y otros no tenían información, lo que se muestra en la Tabla 4. En este sentido vale la pena aclarar que si bien se indican estas opciones no se detalla el cómo, dónde o ningún tipo de información acerca del proceso.

Tabla 4 Acción a realizar al fin de vida útil de los aerogeneradores, indicada en los proyectos evaluados en el SEIA.

Acción al fin de vida útil	Cantidad de proyectos	Porcentaje
Reciclaje	52	40%
Reutilización	54	42%
Venta	49	38%
Disposición final	56	43%
Sin información	30	23%

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para realizar la proyección de residuos se utilizó la base de datos elaborada, obteniendo la cantidad de palas a generar por año de cierre de proyecto, suponiendo que estos no extienden su vida útil y que en caso de que se extienda igualmente se recambiaran los aerogeneradores. De este análisis se concluye que en los años 2039 y 2040 se generaran la mayor cantidad de este tipo de residuos (Figura 10).

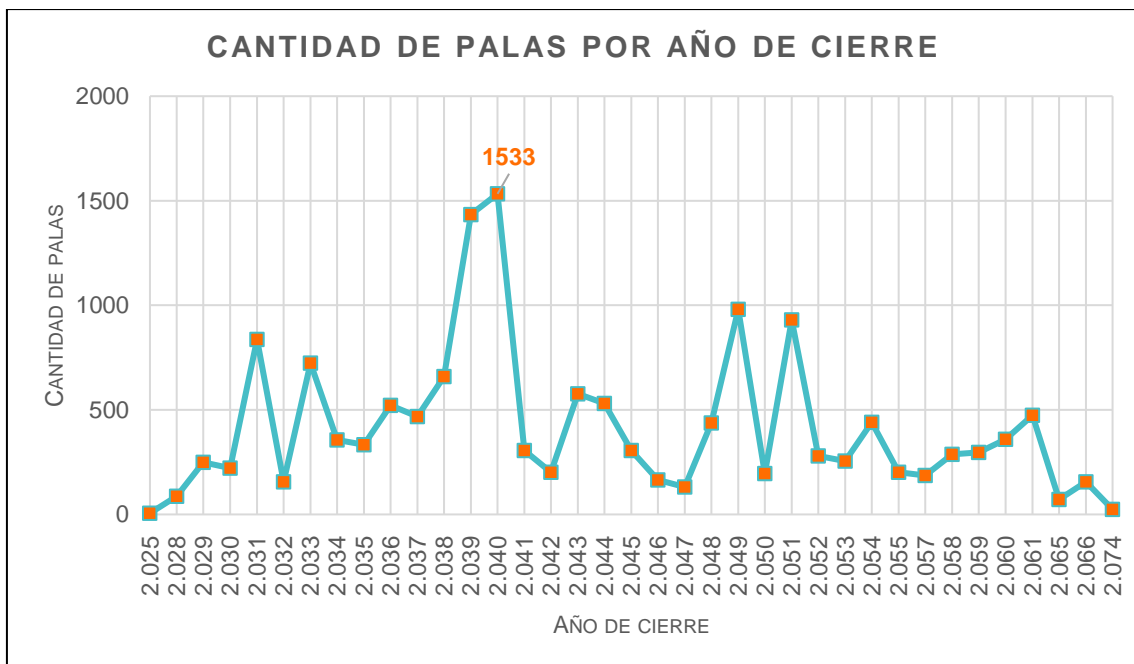


Figura 10 Cantidad de palas de aerogeneradores a generar por año de cierre de proyectos eólicos.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar también que se observa en la Figura 10 que en 2025 se generarían los primeros residuos de aerogeneradores, lo cual se debe al Parque Eólico de Alto Baguales, el cual corresponde a una central localizada en las cercanías de Coyhaique en la Región de Aysén, correspondiendo al primer parque eólico construido en Chile en el año 2001, constando de tres aerogeneradores de 660 kW logrando una potencia nominal de 2 MW el cual no se sometió a Evaluación Ambiental, en 2015 se ejecutó su ampliación instalando dos turbinas de 900 kW, sumando 1,8 MW más al sistema, cuya RCA se obtuvo en 2008 (pero se construyó recién en 2015). En 2019 colapsó uno (1) de los 3 aerogeneradores instalados en 2001, sin tener claridad de la gestión realizada con esta turbina, es decir, si fue cambiada y hubo generación de residuos, o si fue reparada (Risco Aysén, 2019). En 2021 se sometió a evaluación una tercera ampliación que aún se encuentra en calificación, la cual consiste en reemplazar los tres generadores instalados en 2001 por dos de 3,8 MW e instalar seis nuevos aerogeneradores de 3,8 MW, lo que permitiría aumentar la potencia del parque a 32,2 MW en total, este nuevo proyecto no indica donde dispondrá los residuos de las turbinas reemplazadas, dejando una gran interrogante.

Otro aspecto importante de destacar es que en este gráfico (Figura 10) se observa una proyección hasta el año 2074, cuando los objetivos de este trabajo era una proyección al año 2050 por representar un año simbólico en cuanto las estrategias, programas y metas de los diferentes planes abordados por el gobierno, sin embargo, en términos de información y aporte que puede realizar este documento, se mantendrá la información obtenida al año 2074, de manera de tener una visión más amplia que permita tomar mejores decisiones o recomendaciones.

Para evaluar territorialmente dónde se generarían estos residuos, se revisó nuevamente la Figura 8 Cantidad de palas de aerogeneradores utilizadas por Región, donde se observa que la mayor generación de estos residuos se produciría en la Región de Antofagasta, Región de Coquimbo, Región del Biobío y Región de la Araucanía, lo cual resulta muy relevante para evaluar si en esas zonas existen o no sitios donde reciclar estos materiales o bien sitios de disposición autorizados, ya que el costo en transporte podría ser elevado.

Una vez obtenida la cantidad de palas a disponer, es importante poder expresar esta

información en términos de masa, para esto a continuación se presenta la metodología utilizada. En el mercado existe una variedad de modelos, tamaños, eficiencias y precios de aerogeneradores de acuerdo con las necesidades del proyecto a desarrollar, en este sentido para realizar una proyección de residuos se ha considerado por una parte los valores promedio de las turbinas usadas en Chile (Tabla 2) y por otra los resultados publicados por la Universidad de Cambridge, en su artículo científico “Wind Turbine Blade Waste in 2050”. Este estudio recolecta información de 56 modelos de turbinas de viento de entre 500kW y 8MW, clasificándolas de acuerdo con su potencia nominal, característica directamente relacionada con el tamaño de la aspa o pala. Las turbinas de más de 1MW y menos de 5 MW son las categorías que corresponden a las versiones más desarrolladas y comerciales de los modelos de turbina eólica y que además se proyecta que cubran el mercado en los próximos 10 años. Los pesos de las aspas encontrados en este estudio son dispersos, ya que básicamente este depende de cada modelo, es por esto que el autor calcula los valores promedio los cuales se muestran en la Figura 11.

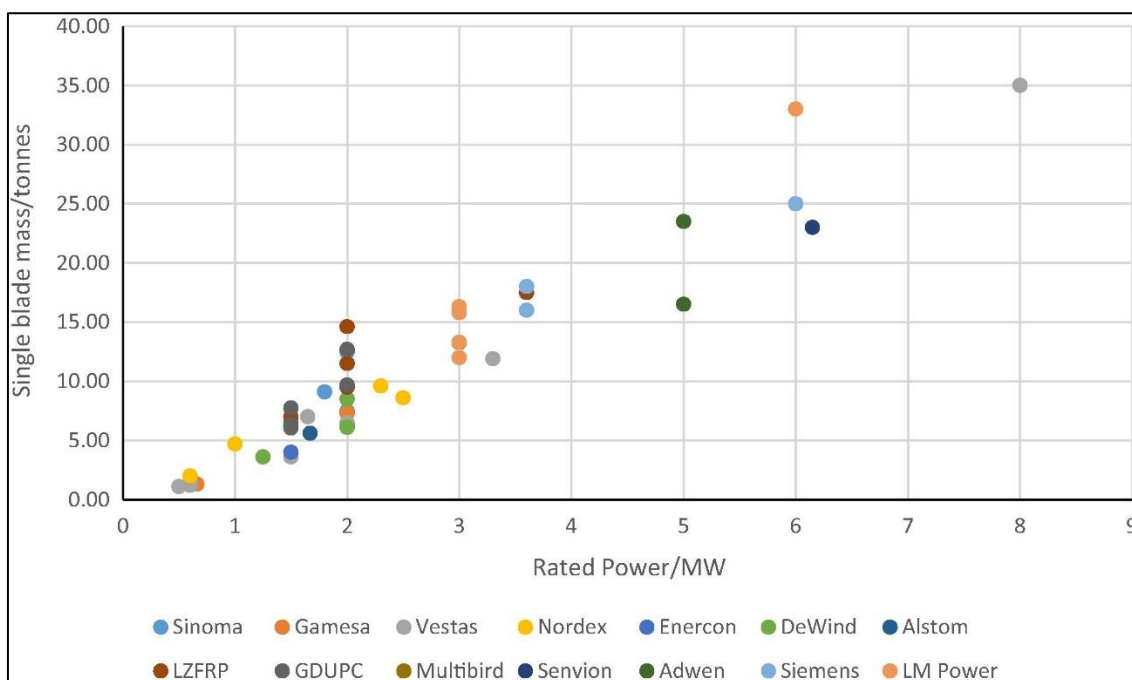


Figura 11 Peso de las aspas de acuerdo con la potencial nominal de la turbina.

Fuente: Wind Turbine Blade Waste in 2050, Pu Liu, Claire Barlow, 2017.

La mayoría de los modelos corresponde al rango de entre 1,5 y 2 MW, siendo el peso promedio de sus aspas 13,34 ton. A partir de esta información el autor del documento

utilizado obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 12 donde se logra una relación entre el largo de la pala y su peso.

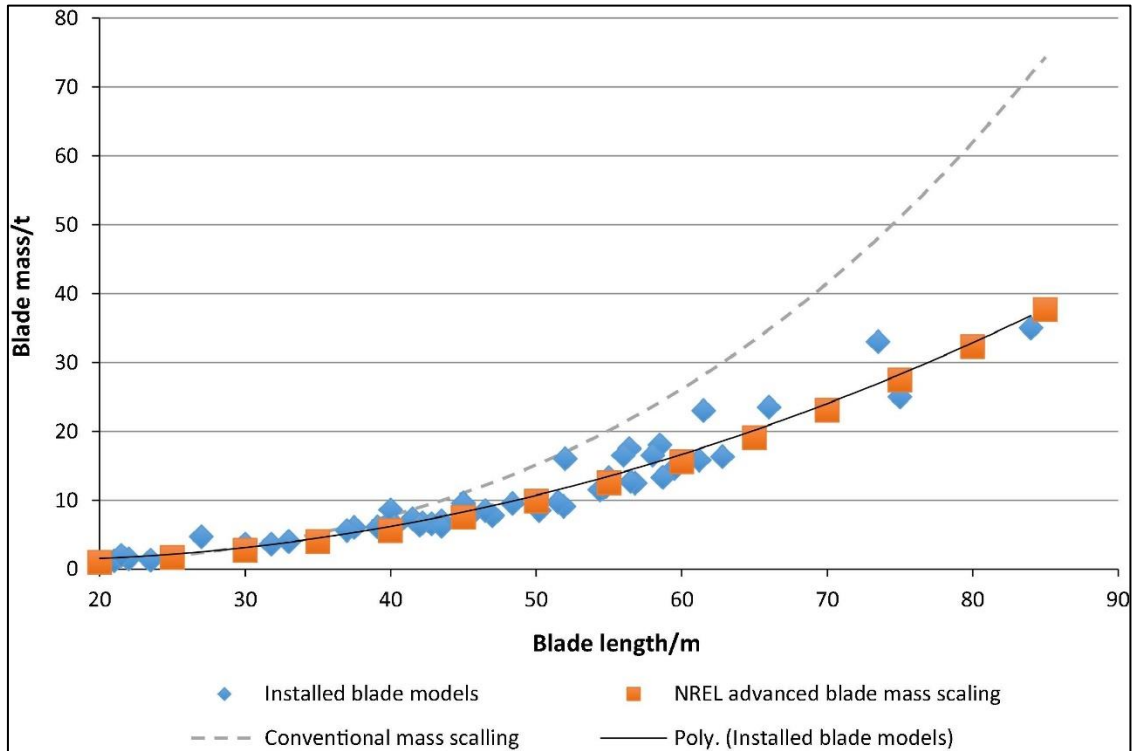


Figura 12 Peso de la pala de acuerdo con su longitud.

Fuente: Wind Turbine Blade Waste in 2050, Pu Liu, Claire Barlow, 2017.

A partir de estos gráficos y con la información obtenida de la base de datos elaborada específicamente los que se muestran en la Tabla 2, se logra identificar que, para palas de 62 m de longitud, la masa se encuentra alrededor de las 17 ton aproximadamente. Los 62 m como se mencionó corresponde al largo promedio de las palas usadas en Chile, pero, además de la base de datos se desprende que el potencial nominal promedio de los aerogeneradores instalados es 3,5 MW, por lo que, si usamos este dato para determinar el peso, también obtenemos valores alrededor de las 17 ton, por lo tanto, para cualquiera de los dos gráficos que se utilice la información es concordante con los promedios obtenidos de la base de datos elaborada.

Luego usando el peso de 17 ton como referencia para todos los parques eólicos estudiados se obtiene que con los 130 proyectos que equivalen a 15.380 palas se obtendrían un total de 261.460 ton de residuos de palas entre los años 2025-2074.

Por lo que a continuación se analiza cómo se componen estos residuos de palas de

aerogeneradores en desuso, para obtener información acerca de que materiales serán generados y que cantidad. En la Tabla 5 se puede observar la composición de una pala de un aerogenerador, donde se aprecia que mayoritariamente tenemos “materiales compuestos”, pero ¿a qué se refiere esto? Esta pregunta será contestada en el desarrollo de este capítulo.

Tabla 5 Composición de una pala de un aerogenerador.

Componente / material (% de Peso)	Acero	Materiales Compuestos	Otros
Palas	3%	67%	30%

Fuente: Elaboración propia con datos de la AEE, 2021.

El **acero** corresponde a un material totalmente reciclable y fácil de separar de los demás componentes.

Los **materiales compuestos** consisten en la unión de dos o más materiales para obtener un nuevo material con mejores propiedades que las de sus constituyentes. Estos en general poseen propiedades mecánicas superiores, como mayor resistencia y menor peso. Se componen de dos fases una matricial y una dispersa, la fase matricial es la principal y en el caso de las palas se encuentra constituida por resinas, principalmente termoestables como epoxis, poliésteres y ésteres de vinilo. La ventaja de utilizar este tipo de resinas es su menor viscosidad y la posibilidad de curar a bajas temperaturas o, incluso, a temperatura ambiente. Es un material totalmente adaptable, razón por la cual son los utilizados para la fabricación de palas y su desventaja más importante es su difícil reciclado. Mientras que la fase dispersa, es de refuerzo, y aporta al material compuesto las propiedades mecánicas resistentes determinando su rigidez, esta fase se encuentra formada de fibras o partículas que están embebidas en la matriz. En el caso de las palas o aspas eólicas, esta fase se encuentra formada por fibras generalmente de vidrio o de carbono, que están alineadas en la dirección de la carga principal para proporcionar mayor rigidez y resistencia. Los materiales compuestos para palas eólicas contienen hasta un 75% en peso de fibra de vidrio (Mishnaevsky, et al., 2017). De esta manera las palas generalmente se fabrican con Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV o GFRP, por sus siglas en inglés, Glass Fiber Reinforced Plastic) debido a que poseen alta disponibilidad y madurez en su proceso de fabricación, y las fibras de vidrio son un material de bajo costo con alta estabilidad térmica y un elevado punto de fusión, no son inflamables y tienen buen comportamiento en ambientes

corrosivos, siendo su principal desventaja la falta de formas de reciclaje que sean económicas. En casos de palas de una mayor dimensión y por ende más pesadas, se ha comenzado a utilizar en vez de fibra de vidrio Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (PRFC o CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer), la que entrega aún una mayor rigidez al material compuesto, y tiene la ventaja de tener más posibilidades de reciclaje. No obstante, entre sus desventajas, se encuentra la baja tolerancia a los daños, conductividad eléctrica por lo que son más propensas a los rayos y un mayor costo en comparación a la fibra de vidrio (Asociación Empresarial Eólica (AEE), 2021), siendo esta última una barrera clave (Skelton, 2017).

Además, de los materiales compuestos, una pala eólica también tiene, en menor proporción, **otros materiales** como el PVC, los gelcoats, madera de balsa, poliuretanos y revestimientos superficiales y pinturas, en función del fabricante (Asociación Empresarial Eólica (AEE), 2021).

Por lo tanto, las palas son generalmente fabricadas a partir de materiales compuestos de:

- Resinas termoestables de poliéster, vinil éster, epoxi
- Fibras de vidrio (PRFV) y/o carbono (PRFC)
- Adhesivos de poliuretano, poliéster, epoxi, metacrilatos (Total HSE).

Si analizamos el total de nuestros potenciales residuos de palas eólicas, tendríamos la cantidad de materiales desglosados que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Composición residuos potenciales de las palas de los parques eólicos de Chile entre los años 2025 - 2074.

Masa Pala	Acero (3%)	Material Compuesto (67%)		
		Resina (16,75%)	Fibra de Vidrio y/o Carbono (50,25%)	Otros como poliuretanos, revestimiento y pintura (30%)
261.460 ton	7.844 ton	43.795 ton	131.384 ton	78.438 ton

Fuente: Elaboración propia, 2022.

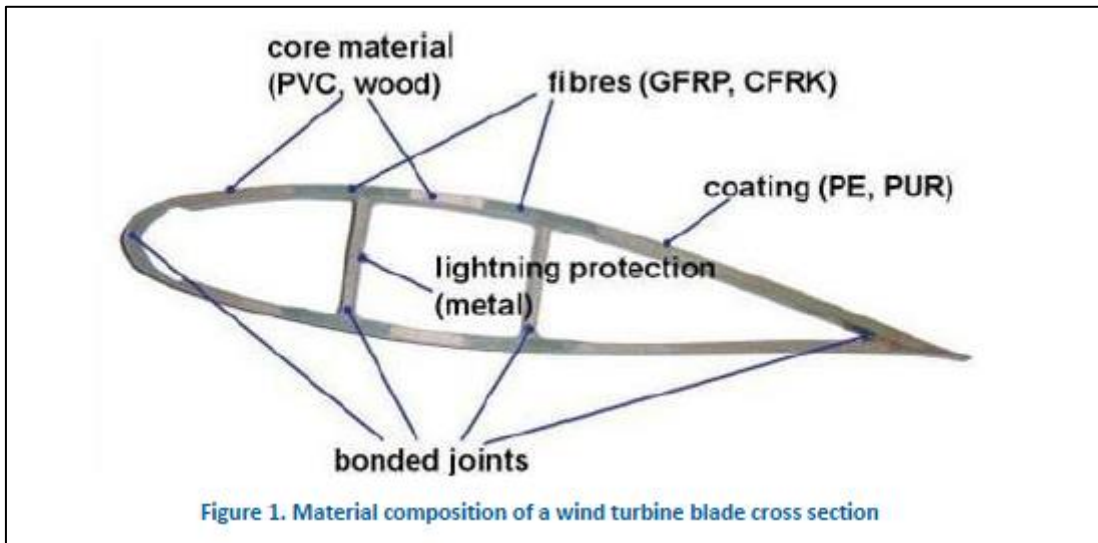


Figura 13 Composición del material de la sección transversal de una pala de aerogenerador
Fuente: Skelton, 2017.

Respecto a la distribución por año de la generación de estos residuos provenientes de las palas en desuso de los proyectos eólicos de Chile, cabe señalar que en promedio se generarán 7.066 ton/año entre los años 2025 y 2074, considerando sólo los 130 proyectos que abarca este estudio. Los años de máxima generación serían el 2039 y 2040, con 24.378 y 26.061 ton/año respectivamente, lo cual se encuentra muy por sobre el promedio, y los años con menor generación serían al final del horizonte en estudio, alrededor del 2060 y 2074, los cuales se espera aumenten con el crecimiento de la industria de generación eólica, durante los próximos años. Esta distribución resulta muy relevante al momento de evaluar las posibilidades de inversión en industrias de reciclaje de estas palas. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 14 y luego en la Figura 15 se observa la distribución de los componentes de estos residuos.

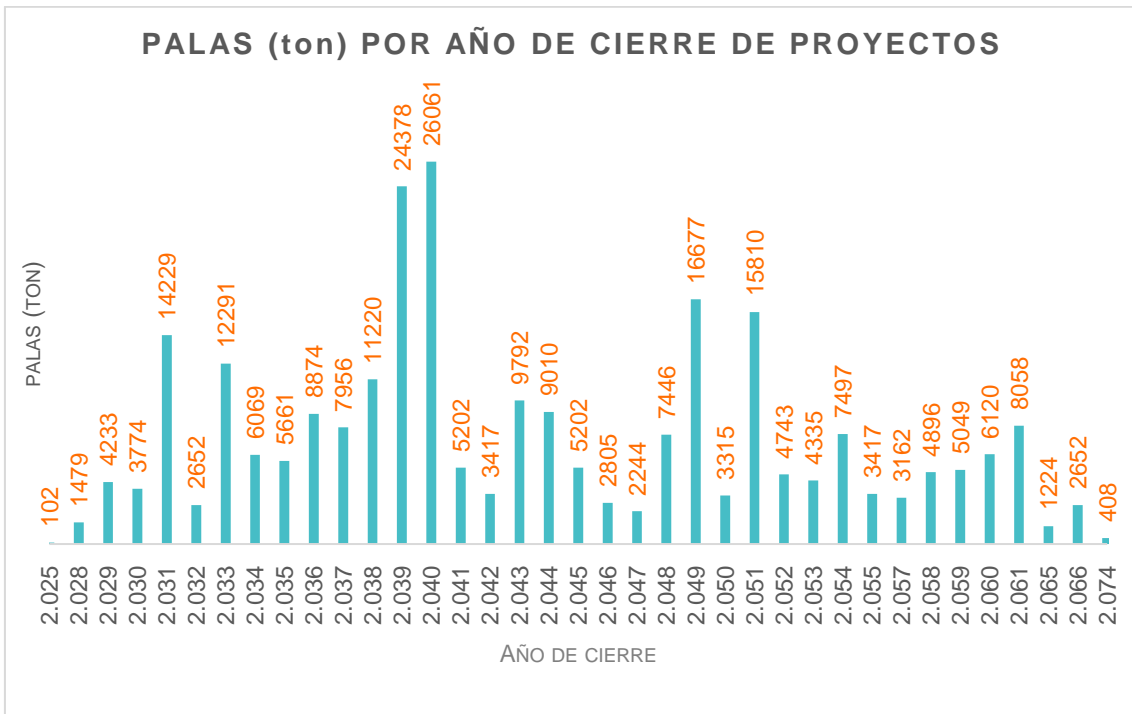


Figura 14 Generación de palas en toneladas por año de cierre de proyectos eólicos en Chile

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 7 Composición de los residuos de palas eólicas en promedio anual

Residuos Palas Promedio (ton/año)	Composición residuos			
	Acero (3%)	Resina (16,75%)	Fibra de Vidrio y/o Carbono (50,25%)	Otros como poliuretanos, revestimiento y pintura (30%)
7.066	212 ton/año	1.184 ton/año	3.551 ton/año	2.120 ton/año

Fuente: Elaboración propia, 2022.

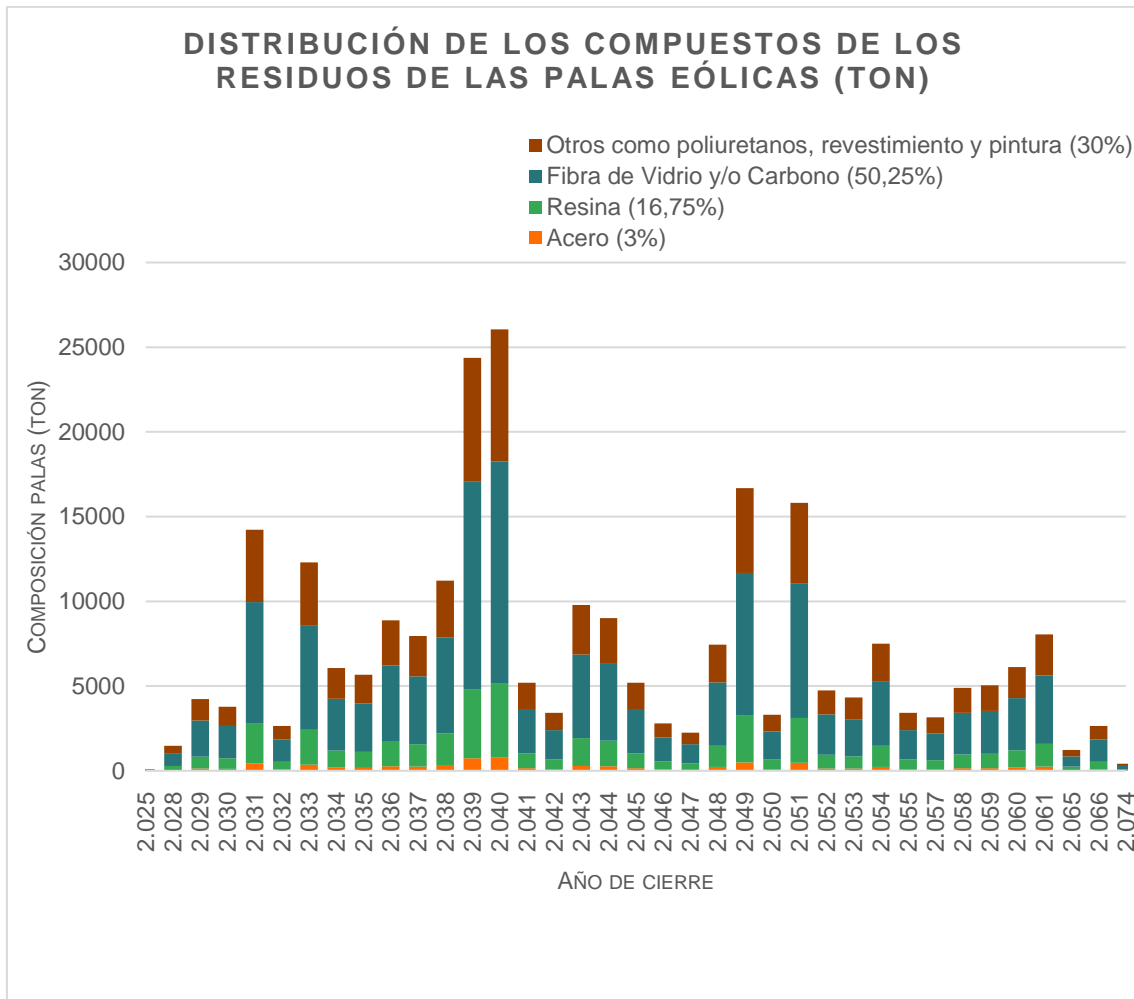


Figura 15 Composición de los residuos de palas eólicas por año
 Fuente: Elaboración propia, 2022.

VIII. MARCO LEGAL APLICABLE

El marco legal es un eje fundamental para el funcionamiento de soluciones ambientales aplicables a diferentes industrias, ya que en general el gestionar los temas relacionados al medio ambiente se identifica como un gasto y un proceso complejo para las empresas, aun cuando podrían generar beneficios económicos. Es por esto que integrarlo como parte de las obligaciones resulta fundamental, especialmente hoy en día, pensando en un país en vías de desarrollo como Chile, donde asuntos ambientales, si bien se están integrando, aún no son parte de nuestra cultura productiva, por lo que la necesidad de la obligatoriedad normativa es un eje fundamental.

Respecto a la gestión de residuos de turbinas eólicas, a continuación se presenta una revisión que enmarca el desarrollo de los parques eólicos en Chile desde su ideación, pasando por su evaluación, construcción, operación y cierre, donde se evidencia que se cuenta con diversas instituciones, normas, tratados, entre otros documentos del tipo legislativo y/o indicativos. En el presente acápite se detallan las principales que enmarcan este tipo de energía renovable y a sus respectivos residuos. Sin embargo, como se podrá observar no existe una norma específica o que de alguna forma se haga cargo de este tipo de residuos, obligando o al menos dando directrices a los generadores para hacerse cargo de ellos una vez terminada la vida útil del parque. Esto se convierte en un problema ya que la opción de disponer estos residuos en rellenos sanitarios es totalmente válida, legal y probablemente más económica, a diferencia de lo que sucede en la Unión Europea, donde el año 1999 se publicó una norma referente al vertido de residuos (1999/31/EC) donde se prohíbe la disposición de compuestos o partes de gran tamaño, como las palas de las turbinas, en los rellenos sanitarios, entre otras iniciativas, incentivando de esta manera desde el punto de vista legal a buscar soluciones para el fin de la vida útil de las palas eólicas (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1999).

A continuación, se presenta la institucionalidad, planes, programas, estrategias, tratados y normativa que se relaciona de una u otra manera con la generación de energía eólica.

1. Institucionalidad Energética

- Ministerio de Energía (MINENERGÍA): es el órgano superior de regulación del presidente de la República encargado de la administración del sector energético, dentro de sus funciones principales está el elaborar y coordinar planes, políticas y normas para asegurar el buen funcionamiento del sector (Ministerio de Energía, 2021).
- Comisión Nacional de Energía (CNE): organismo público y descentralizado, se relaciona con el presidente a través del MIENERGÍA, se encarga de analizar precios, tarifas y normas técnicas (Ministerio de Energía, 2021).
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC): servicio descentralizado, encargado de fiscalizar y supervigilar el cumplimiento de la ley y las normas técnicas sobre generación, producción, almacenamiento, transporte y distribución de electricidad y combustibles (Ministerio de Energía, 2021).
- Coordinador Eléctrico Nacional (CEN): es un organismo técnico e independiente, su función principal es coordinar la operación de las instalaciones que abastecen el sistema eléctrico (Ministerio de Energía, 2021).
- Agencia de Sostenibilidad Energética: es una persona jurídica de derecho privado sin fines de lucro, que promueve, fortalece y consolida el uso eficiente de la energía a nivel nacional e internacional (Ministerio de Energía, 2021).

2. Institucionalidad Ambiental

- Ministerio de Medio Ambiente (MMA): Es el órgano del Estado encargado de colaborar con el presidente de la República en el diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental, así como en la protección y conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, promoviendo el desarrollo sustentable, la integridad de la política ambiental y su regulación normativa (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.).
- Superintendencia de Medio Ambiente (SMA): Servicio público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio, sometido a la supervigilancia del

presidente o presidenta de la República a través del Ministerio del Medio Ambiente. Sus funciones son ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental, RCA, de las medidas de los Planes de Prevención y/o Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad ambiental y Normas de Emisión, y de los Planes de Manejo, cuando corresponda, y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la legislación (Superintendencia del Medio Ambiente, s.f.).

- **Tribunales Ambientales:** Los tribunales ambientales son órganos jurisdiccionales especiales independientes, cuya función es resolver las controversias medioambientales de su competencia y otros asuntos que la ley someta a su conocimiento. Si bien no forman parte del Poder Judicial, están sujetos a la superintendencia directiva, correccional y económica de la Corte Suprema (Tribunal Ambiental, s.f.). Las funciones de los tribunales ambientales son las siguientes:
 - Reclamaciones de ilegalidad de determinados actos administrativos y normas dictadas por el Ministerio del Medio Ambiente, la Superintendencia del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental, el Comité de Ministros y otros organismos del Estado con competencia ambiental.
 - Demandas para obtener la reparación por daño ambiental.
 - Solicitudes de autorización previa o revisión en Consulta, respecto de medidas temporales, suspensiones y ciertas sanciones aplicadas por la Superintendencia del Medio Ambiente (Tribunal Ambiental, s.f.).

- **Servicio de Evaluación Ambiental (SEA):** es un organismo público funcionalmente descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio. Su función central es tecnificar y administrar el instrumento de gestión ambiental denominado “Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental” (SEIA), cuya gestión se basa en la evaluación ambiental de proyectos ajustada a lo establecido en la norma vigente, fomentando y facilitando la participación ciudadana en la evaluación de los proyectos (Servicio de Evaluación Ambiental, s.f.).

3. Planes, Políticas y Estrategias

- Política Nacional de Energía (D.S N°148/2016 MINERGÍA): la política energética de Chile – Energía 2050, enmarca el desarrollo energético desde un sector confiable, inclusivo, competitivo y sostenible, con la finalidad de avanzar hacia una energía sustentable, proponiendo planes de acción y metas para 2035 y 2050 (Ministerio de Energía, 2021). En su última actualización 2022, titulada “Transición Energética de Chile”, plantea como principales propósitos la generación de energía sin emisiones, el mejoramiento de la calidad de vida de las personas a través de una energía accesible, transporte sustentable, educación energética y ciudades energéticamente sustentables, otro propósito es una nueva identidad productiva para Chile, es decir, una diversificación de nuestras fuentes laborales, de manera inclusiva, promoviendo el desarrollo local y descentralizado. Los pilares de esta política son un Sistema Energético Resiliente y Eficiente, es decir, lograr un suministro de energía confiable y de calidad que considere la participación y empoderamiento ciudadano, el segundo pilar consiste en una nueva forma de construir políticas públicas, es decir crear políticas participativas, que se inserten y consideren el territorio y sus características, existiendo una coordinación y gobernanza que promueva el dialogo, al respecto es importante mencionar que la política ha sido evaluada y aprobada por el Sistema de Evaluación Ambiental Estratégica⁴. Dentro de su propósito de energía sin emisiones, establece que la generación eléctrica de Chile será renovable considerando a la generación eólica y la solar, como las dos mayores fuentes de generación al 2050 (Ministerio de Energía, 2022).
- Plan de descarbonización de la matriz eléctrica: este plan consiste en un acuerdo entre el Ministerio de Energía y privados, que nace a partir de la creación de la Mesa de Descarbonización Energética el año 2018, cuyo objetivo consistió en analizar los efectos del retiro y/o reconversión de unidades de generación eléctrica a carbón sobre la seguridad y la eficiencia económica del sistema eléctrico nacional, la economía local y los aspectos medio ambientales. El plan

⁴ Corresponde a la evaluación ambiental de las políticas públicas, planes e instrumentos de planificación territorial con el objetivo de impulsar la planificación sustentable del país. Para más información visitar <https://mma.gob.cl/evaluacion-ambiental-estrategica/>

contempla en una primera etapa el cierre de operaciones de ocho centrales termoeléctricas al año 2024, siendo estas centrales las más antiguas del país, para esto el año 2020 y a través del Decreto N°50 que Aprueba acuerdos de retiro de centrales termoeléctricas, se subscriben a el acuerdo del Ministerio de Energía, las empresas Enel Generación Chile S.A, Gas Atacama Chile S.A, Engie Energía Chile S.A, Colbún S.A y AES Gener S.A. Por su parte, y de manera paralela este mismo año, 2020, se promulga el Decreto N°80 que Promulga el acuerdo entre la República de Chile y la República Federal de Alemania sobre el proyecto: “Descarbonización en el sector de energía chileno”, el cual comienza en junio 2019 y contemplaba una duración de tres años hasta mayo 2022, financiado por el gobierno alemán, tenía el objetivo de apoyar al Ministerio de Energía y el Ministerio de Medio Ambiente para alcanzar la carbono neutralidad al 2050 (NDC Acuerdo de París). Actualmente, el calendario de este plan se ha ido acelerando, siendo cada vez más ambicioso, adelantando así el cierre algunas centrales, para el 2025 se habrán cerrado 18 centrales. Este plan ha sido desarrollado por el gobierno de manera gradual ya que representa un tema estratégico, es por ello que en este mismo contexto se ha creado la Estrategia de Transición Justa. En este sentido la construcción y operación de Parque Eólico se hace parte de este plan representando una forma de generación de energía que no considera el carbono, por lo tanto, aporta para lograr de manera segura esta transición energética a fuentes más limpias (Ministerio de Energía, s.f.).

- Planificación Energética de Largo Plazo (PELP): Proceso liderado por el Ministerio de Energía cuyo objetivo es proyectar el futuro energético de Chile en un horizonte de 30 años, definiendo distintos escenarios energéticos de largo plazo que muestren las diferentes alternativas de desarrollo de la matriz energética nacional, junto con el comportamiento del consumo y de la oferta energética futura del país. En este sentido existen múltiples documentos publicados que se van actualizando anualmente para evaluar estos escenarios, en la última versión disponible de antecedentes 2022, se indica que existe un potencial de 37GW para la tecnología eólica, dentro de las proyecciones energéticas y los procesos de descarbonización se espera una fuerte inversión solar y eólica. En todos los escenarios analizados se observa un fuerte y creciente aumento de la participación de la energía eólica, siendo la principal

tecnología proyectada al 2050 (Ministerio de Energía, s.f.).

4. Convenios, Protocolos, Tratados y Acuerdos

- Acuerdo de París (D.S N°30/2017 MINREL): se origina en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) mediante la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del calentamiento global (Ministerio de Energía, 2021). Este acuerdo es firmado por Chile en septiembre 2016, y es aprobado y oficializado por Cámara de Diputados el año 2017 con la promulgación de este Decreto. Este acuerdo se relaciona con el desarrollo de las energías renovables debido a que uno de sus principales objetivos es mitigar el aumento de la temperatura que está afectando al planeta, para esto es necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo el desarrollo sostenible. Para lograrlo una de las estrategias claves de Chile es la descarbonización de su matriz energética, por lo tanto, este acuerdo es un punto de partida en relación con temas de gestión ambiental y el fomento de energías renovables como la eólica (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2017).
- Acuerdo de Escazú: El Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe, corresponde a un acuerdo recientemente adherido por Chile que tiene su origen en la República de Costa Rica el año 2018, entrando en vigor durante abril de 2021 al cumplirse las 11 ratificaciones necesarias para ello. Chile ratifica su intención de ser parte de este acuerdo durante marzo 2022, siendo aprobado por el Senado en mayo del mismo año, y en julio, Chile es oficialmente Estado Parte Número 13. En términos del presente estudio y la energía eólica, se destaca que este acuerdo tiene un alcance transversal en el sentido que permite enfrentar todos los desafíos ambientales protegiendo a las y los defensores de los derechos humanos en asuntos ambientales, por lo tanto, se convierte en un instrumento internacional que potencia una política ambiental de Estado indispensable para enfrentar la actual crisis climática. Este acuerdo no aprueba ni deroga nuevas normas, solo

incorpora estándares en que el Estado se compromete a avanzar (Cárdenas, 2022).

5. Normas reglamentarias sector energía.

No existen normas específicas que reglamenten los parques eólicos como energía renovable en Chile.

6. Normas ambientales reglamentarias

- Decreto N°100/2005 Constitución Política de la República de Chile: Es su capítulo III sobre los derechos y deberes constitucionales, artículo 19 N°8 señala el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente y la preservación de la naturaleza, estableciendo el deber del Estado de velar por su respeto y tutelar la preservación de la naturaleza. Para demostrar el cumplimiento de esta garantía constitucional todos los proyectos eólicos que se construyan en Chile deben cumplir con toda la normativa ambiental vigente (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2005).
- Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N°19.300/1994): regula el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente y la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. Esta Ley corresponde a la norma base del medio ambiente y dentro de sus principales implicancias esta que en su artículo 10 enumera los tipos de proyectos que deben someterse a evaluación ambiental, ya sea a través de un EIA o una DIA, especificando en su artículo 11 aquellas características, circunstancias o efectos que requerirán del ingreso a través de una EIA (Ministerio Secretaría General de La Presidencia, 1994). Esta ley para ser aplicable cuenta con un reglamento, D.S. N°40/2013 conocido como RSEIA, en este se especifica y se dan las directrices de aplicación de esta ley, siendo así en su artículo 3 que se definen específicamente que proyectos deben someterse a evaluación ambiental. Para el caso de los Parque Eólicos, corresponde a la letra c) de dicho artículo *Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW,*

por lo tanto, como se ha mencionado anteriormente aquellos parques que generen más de 3MW deben someterse a evaluación ambiental, asegurando la correcta gestión de sus residuos de acuerdo con la normativa vigente. Es importante considerar que dentro de las propuestas que se generen a partir de este documento es posible que estas correspondan a una tipología de ingreso, por lo que se deberá considerar dentro de su factibilidad el proceso de evaluación ambiental, esto específicamente para la letra o) Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos. o.8. Sistemas de tratamiento, disposición y/o eliminación de residuos industriales sólidos con una capacidad igual o mayor a treinta toneladas día (30 t/día) de tratamiento o igual o superior a cincuenta toneladas (50 t) de disposición (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

- Ley N°20.920/2016, establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, del Ministerio de Medio Ambiente, en adelante Ley REP: Es el marco legal en materia de residuos y de fomento al reciclaje, tiene como principal objetivo disminuir la generación de residuos, fomentar su reutilización, reciclaje o cualquier otro tipo de valorización, cómo lo hace, a través de instrumentos como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), el Fondo para el Reciclaje, entre otros. Todo lo anterior con la finalidad de proteger la salud de las personas y del medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.). Esta Ley establece algunos principios como “El que contamina paga”, “Gradualidad”, “Inclusión”, “Jerarquía en el manejo de residuos”, “Libre competencia”, “Participativo”, “Precautorio”, “Preventivo”, “Responsabilidad del generador de un residuo” “Transparencia y publicidad” y el de “Trazabilidad”. Al momento esta ley ha definido como residuos prioritarios para su implementación gradual los aceites y lubricantes, baterías, eléctricos y electrónicos, neumáticos, envases y embalajes y pilas (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).
- Ley N°21.455/2022, Ley de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente: Ésta presenta un marco jurídico para enfrentar el cambio climático, con la finalidad de alcanzar y mantener la carbono neutralidad al 2050 y dar

cumplimiento a los compromisos internacionales respecto a esta materia, para ello establece un conjunto de instrumentos de gestión a nivel local, regional y nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

- Decreto N°594/2000 Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo del Ministerio de Salud: Esta norma en su artículo 19 establece que las empresas que realicen tratamiento o disposición final de residuos industriales fuera del predio deberán contar con autorización sanitaria, previo al inicio de tales actividades. Y en su artículo 20 solicita previamente realizar una Declaración que conste de la cantidad, calidad de los residuos industriales que genere, diferenciando los del tipo peligroso (Ministerio de Salud, 2000).
- Decreto Supremo N°148 de 2003 del Ministerio de Salud, Reglamento Sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (D.S N°148 de 2003), tal como lo indica su nombre esta norma regula el manejo de Residuos Peligrosos (RESPEL), estableciendo sus condiciones sanitarias y de seguridad para su generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reúso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación. En este sentido se destaca que al final de la vida útil de los aerogeneradores, en su desarme existen componentes con las características de peligrosidad que señala el artículo 11 de este decreto, por lo que deberán ser gestionados como RESPEL de acuerdo con lo indicado, sin embargo, las palas, componentes objetivo de este estudio no corresponden a un RESPEL, motivo por el cual su generación de residuos no se encuentra regulado por esta norma (Ministerio de Salud, 2004).
- Decreto N° 1/2013 que aprueba Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, RETC, del Ministerio de Medio Ambiente: Corresponde a una base datos ambientales. Dicho registro se forma de la declaración que realicen los titulares de los proyectos, es por ello todo titular de los proyectos eólicos deberán declarar en este sistema sus residuos generados del tipo peligroso y no peligroso. En el caso de los no peligrosos la obligatoriedad recae al generar más de 12 ton anuales, lo cual es probable que ocurra durante la construcción del parque y durante su cierre, etapa de interés para este estudio ya que correspondería al momento en las palas o aspas pasarían a ser un

residuo a gestionar (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

- Resolución 144/2020 exenta Aprueba norma básica para la implementación de modificación al Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, RETC, del Ministerio de Medio Ambiente: Establece en su título II y III reglas básicas para realizar adecuadamente, a través del sistema de Ventanilla Única del RETC, el acceso (con clave única), la actualización de la razón social, cambio de titularidad, cese de funciones o cierre de establecimiento y envío de documentación digital. En su título IV además señala que las instalaciones generadoras de más de 12 ton anuales de residuos deberán realizar declaraciones mensualmente en SINADER, y será de su responsabilidad gestionar sus residuos a través de terceros autorizados. Finalmente, en el título V y VI se establece la obligatoriedad de realizar la declaración de Desempeño Ambiental Empresarial y la Declaración Jurada Anual (Ministerio del Medio Ambiente, 2020), por tanto, todos los titulares de proyectos eólicos deberán declarar sus residuos generados peligrosos y no peligrosos, además de sus declaraciones anuales y desempeño ambiental empresarial.
- Resoluciones Exentas N°359/05 y N°499/05, aprueba Documento de Declaración de Residuos Peligrosos y Documento Electrónicos de Declaración de Residuos Peligrosos, respectivamente. Se fija el formato del Documento de Declaración de Residuos Peligrosos, por tanto, todos los residuos peligrosos generados por este tipo de proyecto en cualquiera de sus fases deben ser declarados bajo el formato de alguna de las resoluciones indicadas.

IX. ESCENARIO INTERNACIONAL SOBRE EL MANEJO DE RESIDUO DE LAS PALAS EÓLICAS

Primeramente, es necesario indicar que en la práctica existen dos soluciones dominantes actualmente para el fin de vida útil de las palas eólicas: el vertedero y la incineración, no obstante, ambas alternativas se encuentran en los niveles más bajos de la gestión de residuos, dejándolas fuera de las alternativas prioritarias de la Directiva Marco sobre Residuos de la Unión Europea⁵ y de la Jerarquía de Gestión de Residuos de la US EPA⁶. De este modo alternativas económicas como la disposición en rellenos sanitarios, ya están prohibidas o desincentivadas en países como Alemania, Austria, Finlandia y Países Bajos, cuya lista probablemente crezca, del mismo modo en los operadores en Estados Unidos, que también están rechazando la recepción de estos residuos, mientras que en Irlanda y Reino Unido continúan permitiéndose con precios entre los 54 y los 113 euros (Deeney et al., 2021).

Es por esto que en Europa, ya se está trabajando en el reciclaje y reutilización de las palas eólicas, para transformar estos residuos en un insumo material para un nuevo uso y promover la economía circular, por ejemplo, en España la empresa Reciclalia, la cual cuenta con procesos de reciclado de fibra de carbono y fibra de vidrio, en general materiales compuestos, utilizando tecnologías como el Constrictor©: Sistema móvil de troceado de palas de aerogeneradores y otras piezas de gran tamaño. Generando un mínimo impacto ambiental y máxima seguridad para los trabajadores al funcionar de forma automática, y luego fabrica nuevos materiales (Materplat, s.f.). Asimismo, existen otras alternativas aún más innovadoras como transformación de palas de un generador eólico a cubiertas de estacionamiento de bicicletas, como se realiza en Dinamarca (OVACEN, s.f.).

Lo anterior corresponde a las acciones recientes de esta comunidad de manera específica para las aspas de los parque eólicos, sin embargo, también es importante destacar que la Unión Europea viene trabajando desde hace años en la gestión de

⁵ Directiva Marco sobre Residuos de la Unión Europea
https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_es

⁶ Jerarquía de Gestión de Residuos de la US EPA
<https://www.epa.gov/homeland-security-waste/waste-management-hierarchy-and-homeland-security-incidents>

residuos de diferentes tipos dentro de lo que se destaca como consecuencia de su legislación, el hecho de que cuentan un listado codificado de los diferentes tipos de residuos que se pueden generar, esta lista tiene su última versión del año 2015, y tiene importantes consecuencias respecto de la gestión de los residuos, ya que entrega los lineamientos de las alternativas o métodos que se deben utilizar para su tratamiento, y de las medidas de seguridad que deben adoptar los gestores. Es importante mencionar que la asignación de códigos a un residuo es responsabilidad del productor inicial o del poseedor del residuo, que está obligado a identificar el residuo antes de entregarlo para su gestión, y en caso de que ser un residuo peligroso, determinar su peligrosidad (Comunidad Madrid, s.f.). Al respecto se identifica que para el caso de las palas se han usado diferentes codificaciones que se muestran a continuación:

- 17 02 03 plástico residuos de construcción y demolición
- 07 02 13 residuos plásticos de productos químicos orgánicos procesos
- 10 11 03 Residuos de materiales fibrosos a base de vidrio de procesos térmicos
- 10 11 12 residuos de vidrio distintos de los mencionados en
- 10 11 11 de procesos térmicos;
- 10 11 99 desechos no especificados en otra parte de procesos térmicos; y
- 12 01 05 Virutas y virutas de plástico del conformado y tratamiento físico-mecánico superficial de metales y plásticos.

Por lo anterior las autoridades de cada país deben trabajar en garantizar la correcta y adecuada clasificación, ya que el código se aplica a estos residuos, para asegurar su identificación y opciones de tratamiento autorizadas (WindEurope, 2020).

Otras de las medidas aplicadas en Europa respecto de la gestión de residuos, y que en los últimos años se ha hecho más conocida a nivel nacional, debido a que su implementación se encuentra en proceso, es la Ley REP. La Responsabilidad Extendida del Productor en La Unión Europea es una política que se ha utilizado para impulsar el cambio en las prácticas industriales, ésta tiene sus orígenes en el año 1991 en Alemania, y actualmente es usada en alrededor de 36 países de todo el mundo (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). Son múltiples los tipos de residuos que cada país ha incorporado a su listado de residuos prioritarios, pero pocos son los que han incorporado las palas eólicas, siendo uno de los obstáculos para su aplicación la larga vida de estos componentes, lo que podría influir en la trazabilidad de su gestión (WindEurope, 2020). La incorporación de estos residuos podría sin duda ser replicado para los residuos de las palas eólicas en Chile, considerando que se está

implementando este modelo de gestión de residuos.

Algunos de los países que se encuentran trabajando al respecto es Francia, donde el Ministerio para la Justicia y Transición Ecológica solicitó un informe sobre la circularidad de los aerogeneradores, el cual fue publicado en octubre 2019, y recomendó introducir REP para las palas. En Alemania la Agencia Federal de Medio Ambiente también encargó un estudio sobre la gestión de los residuos de las turbinas eólicas, el cual recomendó un sistema de desmontaje eficiente que incluya elementos de REP para los fabricantes y otras especificaciones como:

- Obligación de información y etiquetado sobre la composición del rotor
- Procesamiento separado para asegurar reciclaje de calidad
- Obligación de reciclaje de calidad o garantía de eliminación segura
- Inclusión del conocimiento del fabricante, tecnologías de procesamiento adaptadas al producto, cambio tecnológico relacionado
- Asignación relacionada con la causa de los costos de eliminación y obligaciones para su disposición (WindEurope, 2020).

La economía circular es una transformación esencial que requiere el actual modelo lineal. Utilizar materiales y constituyentes desde el reciclaje y la recuperación, en lugar de utilizar nuevas materias primas, previene la explotación de recursos no renovables que son escasos y además disminuye los impactos ambientales de los procesos productivos (Valentin Sommer, 2020). Debido a que la identificación del problema que da origen a este trabajo es la falta de gestión de residuos al fin de la vida útil de las turbinas eólicas en Chile, es que se consideran los principios de este modelo para la búsqueda de oportunidades a nivel internacional que entreguen una solución o una mejora en la gestión de este tipo de residuos que se espera comenzar a generar durante los próximos años en Chile, permitiendo además la prevención de la utilización de nuevas materias primas, por lo tanto la explotación de recursos naturales.

Para la Unión Europea la gestión de los residuos es una de las claves para alcanzar la economía circular. En este contexto, la economía circular dentro de sus niveles de sostenibilidad básicos y prioridades para implementar la gestión de residuos considera las 9R:

- Rechazar aquello que no necesitamos.

- Reducir nuestro consumo.
- Reutilizar productos en buen estado.
- Reparar para alargar la vida de un producto.
- Restaurar un producto antiguo para modernizarlo.
- Remanufacturar o reconstruir
- Rediseñar con criterios de sostenibilidad y diseño ecológico.
- Reciclar la materia para crear nuevos productos.
- Recuperar materiales con la incineración para generar energía.

(Sostenible o Sustentable, s.f.)

En este sentido a continuación se realiza un análisis de las alternativas o soluciones que se han desarrollado a nivel internacional considerando algunas de estas “R”, las cuales intentan cerrar los círculos productivos, incrementando la eficiencia en el uso de los recursos y maximizando la retención de utilidades económicas (Moseletto, 2020). Esto con el objetivo de analizar en los siguientes capítulos las soluciones que incorporen los principios de economía circular, para identificar aquellas que se adecuen de mejor manera a la realidad nacional.

1. Reparar, Extender la vida útil de las palas

En muchas partes del mundo se está optando por promover la extensión de la vida útil de las palas, modificando el permiso que les permite operar, aumentando su operación hasta los 40 años o sin fecha especificada, continuando su función original (Bank et al., 2021).

Al analizar este punto con nuestro estudio, se observa que muchos titulares en Chile recomiendan evaluar esto al final de vida útil propuesta en los respectivos estudios o declaraciones de impacto ambiental, acompañado de mantenciones y/o revisiones periódicas de funcionamiento.

2. Prolongación de vida útil mediante reacondicionamiento

En la actualidad se está fomentando prolongar la vida útil de las palas eólicas mediante reacondicionamiento y Re fabricación, que puede asociarse a aumentos de la longitud de la pala, o a aumentos de potencia de las turbinas eólicas, en este caso continuando con su función original (Bank et al., 2021). Cabe señalar que esta alternativa también se

promueve en los casos estudiados de Chile de la presente investigación.

3. Repotenciación de los parques eólicos

En varios países, los proveedores de energía están optando por “Repotenciar” sus parques eólicos ya existentes, es decir, aumentar su capacidad de generar energía, generalmente mediante el recambio de las turbinas eólicas, produciendo entonces residuos de palas eólicas, pero evitando el resto. Existiendo políticas públicas como exenciones fiscales que promueven esta práctica, ya que, si bien genera residuos, es más sustentable que construir un parque totalmente nuevo (Bank et al., 2021).

Un ejemplo de lo anterior es el proyecto de repotenciación El Cabrito, Tarifa, España, el cual a sus 25 años de operación fue desmantelado para repotenciarlo empleando menos turbinas, pero igualando la capacidad de generación, resultando con un 87% menos de turbinas eólicas, ver Imagen 1 (WindEurope, 2020).



Imagen 1 Parque eólico El Cabrito, España, el antes y el después de su repotenciación.

Fuente: ACCIONA

4. Reutilización

- **Reutilización de palas mediante venta de segunda mano**

Esta alternativa propone utilizar las palas en desuso para el mismo fin que fueron

fabricadas, pero en lugares con menos exigencias regulatorias, o en etapas iniciales del desarrollo de energía renovables. Dándole así también la posibilidad de acceso a estas tecnologías a países menos desarrollados (Bank et al., 2021).

Dinamarca y Alemania son pioneros en esta área, donde los intermediarios ya existen (Marsh, 2017), estos cuentan con páginas web donde ofrecen estas turbinas eólicas usadas. En estos sitios es posible encontrar diferentes modelos, de todo tamaño y potencia. Dentro de las empresas existentes se destaca REPOWERING, quienes gestionan turbinas provenientes de proyectos fallidos y de proyectos en fase de cierre o recambio. Entre los años 2017 y 2018 esta empresa gestionó 14 turbinas eólicas vendiéndolas para proyectos de los países de Dinamarca, Suecia, Polonia, Grecia y Francia (Repowering, s.f.).

Una opción viable para reutilizar las palas de segunda mano es la Re-Construcción de palas eólicas también nace como una posibilidad de nueva vida para las palas eólicas, es así como Re-Wind trabaja en la reconstrucción de cualquier elemento eólico de fibra que haya sufrido daños o que haya perdido su funcionalidad, con garantía de funcionamiento y operatividad.



Imagen 2 Ejemplo de estructura reconstruida
Fuente: ReWind.

También esta empresa trabaja la Re-fabricación de piezas de fibra, con la finalidad de extender la vida útil de las turbinas eólicas

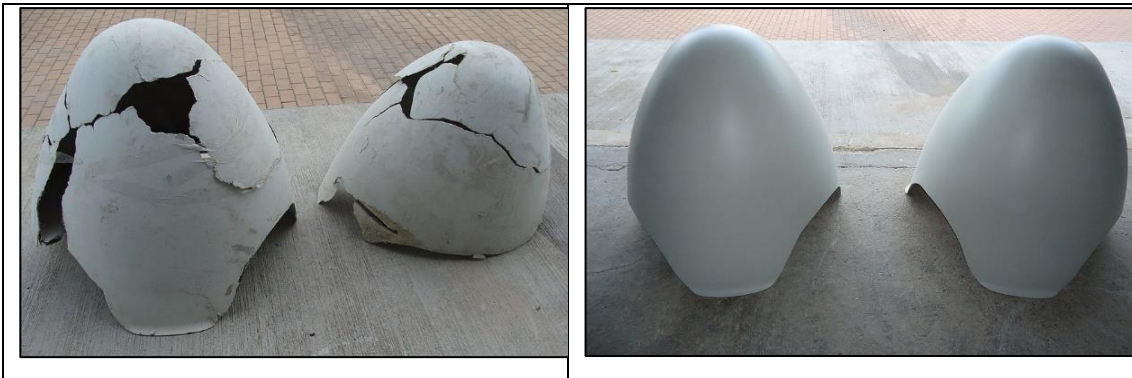


Imagen 3 Ejemplo de piezas refabricadas
Fuente: ReWind.

Así mismo promueve la Re-venta de estos productos, reparados o sin reparar, revisando previamente los materiales y entregando un informe técnico para que el cliente pueda gestionar lo que sea necesario para extender la vida útil del material descartado (ReWind, s.f.).

- **Reutilización de palas para nuevas estructuras (reutilización estructural)**

Consiste en la reutilización completa de toda la pala eólica o piezas grandes de la pala para entregarles una segunda vida en otra infraestructura, edificio o producto arquitectónico, empleando entonces la totalidad de los materiales en desuso (Bank et al., 2021). Lo que es llamado ampliamente *upcycling* (C. Bank, 2018).

Esta alternativa resulta ampliamente viable debido a que el material de las palas eólicas es duro, fuerte y resistente a la intemperie, existiendo múltiples usos posibles como puertas, ventanas, techos, puentes, parques infantiles, mobiliario urbano o interior, materiales de construcción, materiales de aislamiento térmico, entre otros (Deeney et al., 2021). Lo anterior, debido principalmente a las propiedades de los materiales compuestos como su ligereza y su larga vida útil, que permiten un uso eficiente de materiales y posibilidades de reemplazar materiales de construcción (Joustra et al., 2021).

A continuación, se presentan ejemplos de esta alternativa:

En Dinamarca, el proyecto Re-Wind, se está encargando de remanufacturar las aspas de los aerogeneradores para reintegrarlas al paisaje urbano, en particular como aparcamientos de bicicletas, esto considerando que el país produce prácticamente la

mitad de su energía mediante turbinas eólicas y que la bicicleta constituye uno de los medios de transporte principales en el país (CDT, 2022) .



Imagen 4 Pala eólica reutilizada para mobiliario urbano como aparcamiento de Bicicletas en Dinamarca.
Fuente: CDT, 2022.

Re-Wind en este momento lleva a cabo diversas líneas de investigación para la reutilización de palas en estructuras arquitectónicas y de ingeniería, como estacionamientos de bicicletas, pasarelas, postes de electricidad, material de construcción, entre otros (CDT, 2022).



Imagen 5 Reutilización de pala eólica para construcción de puentes
Fuente: CDT, 2022.



Imagen 6 Representación del puente de palas eólicas de Roxborough, Midleton, Cork
(cortesía: Asha. E . McDonald & Georgia Tech)
Fuente: Leahy et al, 2021.



Imagen 7 Palas eólicas reutilizadas para mobiliario urbano para patio de colegio en
Holanda en Rotterdam.
Fuente: CDT, 2022.

Otro uso posible para una pala de aerogenerador es como poste para líneas de transmisión o distribución de energía, este tipo de postes son llamados *Blade Pole*, lo cual se encuentra en investigación, y ya se han introducido al mercado de los postes algunos fabricados con polímero reforzado, los que se espera tengan una durabilidad

mayor a los de acero, hormigón o madera (A. Alshannaq et al., 2021). Re-Wind también cuenta con investigaciones recientes para rediseñar palas eólicas como infraestructura eléctrica (Re-Wind Network, 2022).



Imagen 8 Palas eólicas reutilizadas para postes de electricidad
Fuente: CDT, 2022.



Imagen 9 Representación de la línea de transmisión Re-Wind BladePole
Fuente: Re-Wind Network, 2022.

Sin embargo, emplear palas eólicas en desuso para hacer el mobiliario es un desarrollo muy reciente en Alemania, Dinamarca y Polonia (Deeney et al., 2021).

5. Almacenamiento indefinido

En varios lugares se realiza el desmantelamiento de las turbinas eólicas, procediendo a su almacenamiento por un tiempo indefinido con la esperanza de que en el futuro existan opciones de reciclaje rentables (Bank et al., 2021).

6. Reciclaje

El reciclaje de las aspas o palas en el contexto de la economía circular se define como “reutilización del material de la hoja en un nuevo producto.” (Bank et al., 2021), es decir, el reciclaje de las palas eólicas se enfoca principalmente en recuperar las fibras que estas contienen, es decir, fibra de vidrio y/o fibra de carbono, teniendo varias opciones como reciclaje mecánico o molienda, reciclaje térmico como combustión/incineración, lecho fluidizado, pirólisis, pirolisis por microondas y termoformado, reciclaje químico como la solvólisis y el coprocesamiento. Cabe señalar que estas opciones de recuperación al centrarse en las fibras podrían aplicarse a todo tipo de objeto en desuso/residuo que se encuentre elaborado por materiales compuestos que contengan fibras como aeronaves, energía, deportes, infraestructura y otros aparatos electrónicos y automotrices. Esto traería múltiples beneficios ya que las fibras recicladas traen consigo un valor agregado en el mercado debido al bajo uso de recursos naturales, energía y mano de obra (Karuppanan Gopalraj y Kärki, 2020). En la Figura 16 se presenta un esquema con los métodos encontrados para reciclar las palas eólicas y a continuación se describe cada una de las alternativas.

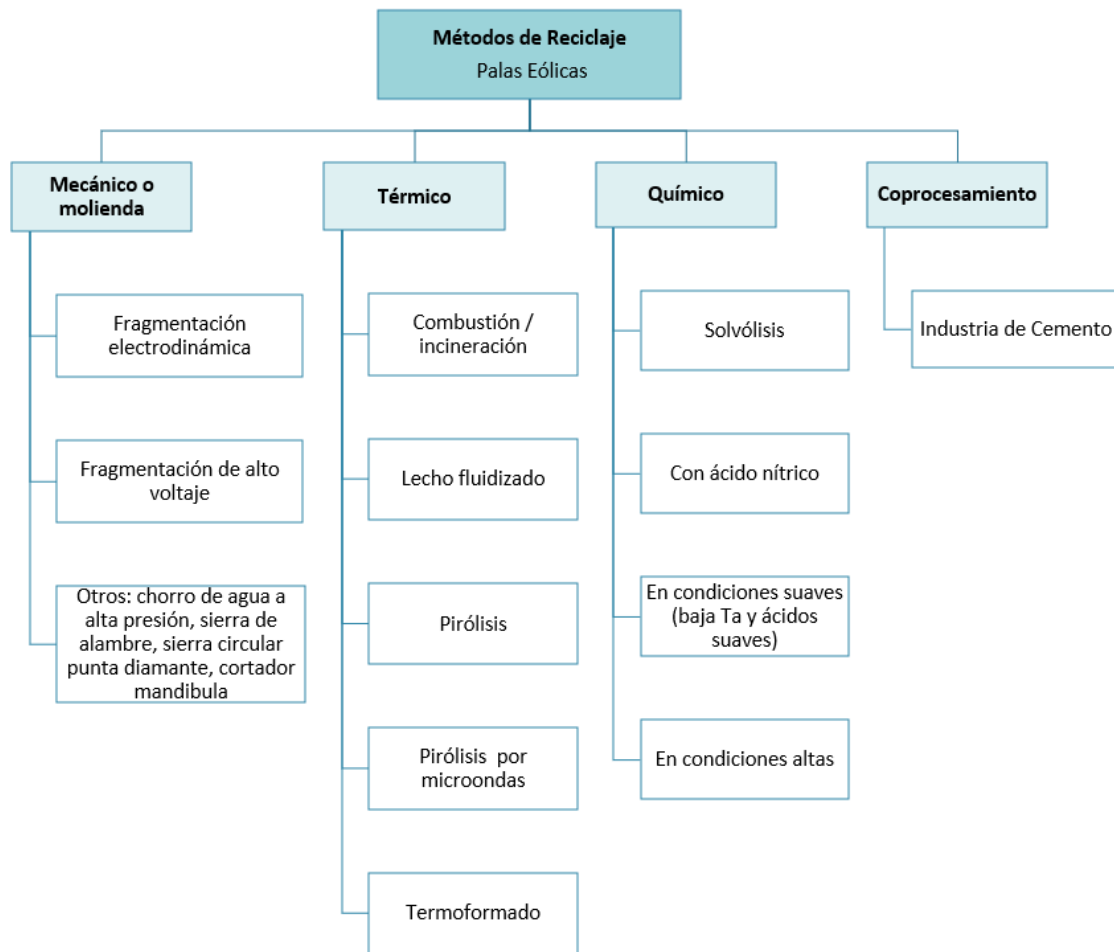


Figura 16 Esquema métodos de reciclaje para las palas eólicas

 Fuente: Elaboración propia

Reciclaje mecánico o molienda

Es la técnica utilizada para reducir el tamaño de los residuos (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020), cambiando su estructura molecular, pudiendo sustituir el polímero en la producción de fibra virgen para aplicaciones industriales lo que representa un *downcycling*, es decir la recuperación de un material, pero de menor valor. Todo este material ya reducido, se clasifica en base a su tamaño, utilizando ciclones y tamices, en: gruesos reciclados, que poseen mayor contenido de fibra, y reciclados finos, que contienen más resina. Lo que se emplea en general como una etapa de *pre-reciclaje* (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020), cortando en secciones más pequeñas para optimizar el transporte y llevarlo al tratamiento posterior que se le dará a la pala (Skelton, 2017). No obstante, también se le podría dar uso en bruto como, por ejemplo: como fibra para adicionar al hormigón, mejorando su resistencia, flexión y comprensión o como

material de relleno para termoplásticos, pero estas alternativas (a excepción de la del hormigón) aún no se comercializan masivamente, sino que sólo se han realizado pruebas a escala de laboratorio o pilotos (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020).

- **Fragmentación electrodinámica (EDF)**

Este método se basa en la interacción de una descarga eléctrica con un sólido entre dos electrodos sumergidos en agua, logrando fragmentar los materiales compuestos (CORDIS EU , 2014). Utiliza un alto pulso de voltaje de entre 50 y 200 kV (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020). La Unión Europea financió el desarrollo de esta tecnología con el proyecto “SELFRAG CFRP (High voltage pulse fragmentation technology to recycle fibre-reinforced composites) (CORDIS UE, 2014).

- **Fragmentación de alto voltaje (HVF)**

La fragmentación por pulsos de alto voltaje corresponde a un proceso electromecánico que separa los materiales compuestos en las matrices y sus fibras, mediante el uso de electricidad (WindEurope, 2020), utilizando un pulso de alta tensión de 160 kV (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020). De este método sólo pueden recuperarse las fibras cortas y para lograr obtener fibras de calidad se requiere grandes niveles de energía (WindEurope, 2020).

Asimismo, existen otras alternativas para triturar o seccionar palas, posterior a su desmantelamiento como cortador de chorro de agua a alta presión, sierra de alambre enfriada, sierra circular con punta de diamante, cortador de mandíbula, etc. (Skelton, 2017).



Imagen 10 Fibras recuperadas mediante molienda para hormigón
Fuente: C. Bank, 2018.

Reciclaje térmico

Éste utiliza el calor para descomponer el material, cuya temperatura dependerá del tipo de resina que tenga el material, ya que, de lo contrario se podría carbonizar o disminuir el tamaño de las fibras recuperadas, este se puede clasificar en cinco tipos:

- **Combustión o incineración**

Esta consiste en quemar directamente el material, obteniendo como resultado calor para generar energía, el cual posee una tasa de eficiencia del 35%, y cenizas, siendo este último el mayor inconveniente de esta alternativa, las que tendrían que disponerse finalmente en un relleno sanitario o un sitio de disposición de material inerte, perjudicando entonces el progreso de una economía circular y disminuyendo la sostenibilidad de la alternativa (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020). Cabe señalar que en muchas

jurisdicciones están restringiendo la incineración debido a la contaminación y los impactos en el uso de la tierra, no obstante, continúa siendo el método más utilizado actualmente debido a su bajo costo, mediante esta técnica no se reciclan fibras ni polímeros, sólo se recupera energía (Bank et al., 2021).

- **Proceso de lecho fluidizado (FBP)**

Consiste en que un flujo rápido de aire caliente pasa a través de un lecho de arena de sílice para descomponer el material a baja temperatura, separándose en fibras y rellenos (compuestos volátiles), este proceso es óptimo para fibras de carbono y de vidrio, teniendo como desventaja la afectación a la longitud de la fibra y la resistencia de esta (Karuppanan Gopalraj y Kärki, 2020). Este permite reciclar solo la fibra reforzada, lo cual podría ser potencialmente utilizada en la industria química y textil, desarrollando mercados secundarios. La matriz polimérica no es reciclada, pero puede ser sometida a pirolisis y usada como recuperación de energía.

En conclusión, esta alternativa posee un bajo impacto ambiental, sin embargo, las fibras recicladas resultan ser esponjosas y discontinuas limitando su reutilización en el mercado (Karuppanan Gopalraj y Kärki, 2020).

- **Pirólisis**

En este proceso las palas se seccionan previamente en dimensiones adecuadas y luego los materiales son calentados a una temperatura entre los 400 y 700°C en ausencia de oxígeno, obteniendo como resultado aceite, gas, fibras y rellenos (productos sólidos), cabe señalar que el aceite y el gas pueden resultar materia prima de cualquier otro proceso. Su ventaja es que se puede emplear tanto para la recuperación de fibra de carbono como de vidrio y el subproducto aceite posee compuestos aromáticos que tienen un poder calorífico similar al combustible, mientras que su desventaja radica en la afectación de las propiedades mecánicas de la fibra, las fibras recuperadas pueden ser empleadas como refuerzos para pegamentos, pinturas y hormigones. Otra desventaja es que se puede formar carbonilla en la superficie de las fibras resultantes necesitando un segundo tratamiento térmico/químico para eliminar estas impurezas. Este método se encuentra disponible a nivel comercial (Karuppanan Gopalraj y Kärki, 2020).

- **Pirólisis por microondas**

Consiste en la descomposición de la matriz usando calentamiento por microondas en una atmósfera inerte (calentamiento de adentro hacia afuera), donde la transferencia térmica es muy rápida y así ahorra energía en comparación con otros métodos de pirólisis. Este método aún cuenta con disponibilidad limitada incluso a escala de laboratorio (Skelton, 2017).

- **Termoformado**

Proceso en que se calienta el material a temperaturas que permitan maniobrar el vidrio colocándolo en moldes, para luego enfriarlos dándole así a estos compuestos una nueva forma. Para piezas de gran tamaño como las palas de las turbinas, se ha estudiado el proceso de cortarlas en secciones, para luego estirarlas a través del termoformado, dejándolas planas con el objetivo de utilizarlas como pisos en obras de construcción o también como tablas de skate.

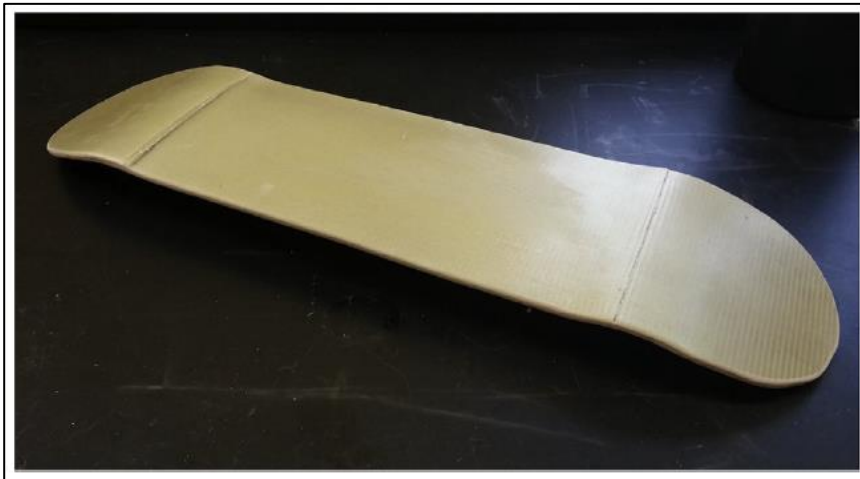


Imagen 11 Ejemplo de skate termoformado con material compuesto
Fuente: Cousins, 2018.

Reciclaje Químico

Consiste en desintegrar el material compuesto disolviéndolo en una solución química como ácido, base o disolvente. Esta solución se elige en función de la naturaleza del sustrato del polímero. Cuando ya se ha logrado la descomposición, las fibras recicladas son lavadas para eliminar los residuos menores de la superficie. Es relevante indicar

que cuando este tipo de proceso se lleva a cabo utilizando solventes se llama “solvólisis” y cuando emplea agua se denomina “hidrólisis”. El mayor inconveniente de este tipo de reciclaje es el impacto ambiental de la eliminación de los productos químicos utilizados (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020). A continuación, se describen los diferentes tipos de reciclajes químicos:

- **Solvólisis**

Como se menciona esta técnica usa solventes como reactivos para romper las cadenas covalentes de los polímeros, para esto se requiere de elevadas temperaturas y presión, sin embargo se están desarrollando procesos que requieren de menores temperaturas para no afectar las propiedades mecánicas de la fibra (Cousins, 2018), con estos desarrollos la solvólisis permite el reciclaje de alta calidad del 100% de ambos componentes sin perder significativamente la resistencia (Valentin Sommer, 2020). De todas formas, esta tecnología aún se encuentra desarrollada solo a nivel de laboratorio.

- **Reciclaje con ácido nítrico**

Es adecuado para polímeros reforzados con fibras de carbono y/o de vidrio, es relevante mencionar que todos los ensayos que se han realizado con respecto a este químico han sido exitosos en un 99% para la descomposición de la resina y que se podría aumentar la tasa de descomposición aumentando la temperatura y la concentración del ácido (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020).

- **Reciclaje en condiciones suaves**

Quiere decir que se realizará el reciclaje a una baja temperatura ($T < 100^{\circ}\text{C}$) y utilizando ácidos suaves, lo que aumentaría la tasa de degradación de la resina logrando mejores resultados (Karuppannan Gopalraj y Kärki, 2020).

- **Reciclaje con condiciones más altas**

Consiste en realizar el reciclaje químico utilizando condiciones supercríticas y subcríticas, como por ejemplo empleando fluidos con estas características como agua y alcohol, lo que mejoraría las propiedades de la fibra reciclada

Coprocesamiento

La fibra de vidrio puede ser recuperada en el coproceso de la industria cementera, mientras que la fibra de carbono puede ser coprocesada en la industria del carburo de calcio. Estas opciones en parte cuentan como downcycling y en parte como

recuperación de energía. Al respecto existen estudios que muestran que moliendo las palas de fibra de vidrio hasta una granulometría similar a la de la arena, permitiría reemplazar ese compuesto en la industria cementera, disminuyendo así el uso de recursos naturales. Estos estudios muestran excelentes resultados de resistencia de materiales especialmente ante pruebas de compresión y flexibilidad. Esto se explica por la fibra de vidrio tiene una gran cantidad de materiales inorgánicos, en su mayoría sílices, los que son similares a la arena en términos de composición química, pero con diferentes propiedades mineralógicas y estructura cristalina. La investigación abala el reemplazo hasta de un 15% de la arena utilizada, por los desechos las turbinas. Al realizar este reemplazo se observan ventajas en las construcciones de cielos y murallas, ayudando a reducir los pesos de estas estructuras (Oliveira, 2020). Es así como para reciclar el material compuesto con fibra de vidrio se puede agregar palas eólicas en desuso en hornos de producción de cemento, sustituyendo así algunas materias primas necesarias para la fabricación de cemento. Permite la utilización del 100% del material compuesto, el polímero sustituye algo de combustible y la fibra de vidrio a algunos ingredientes del cemento como cal o óxidos de hierro. El único operador en Europa de este tipo de tecnología es Neocomp en conjunto con Holcim Cement Factory en L'agerdorf Alemania (Deeney et al., 2021).

En países como Irlanda el coprocesamiento no se lleva a cabo, pero a medida que va aumentando la cantidad de residuos de palas eólicas existe una gran probabilidad que se haga viable (J. Nangle et al., 2020).

Las alternativas revisadas corresponden a soluciones más bien teóricas que aún se encuentran en desarrollo, en su mayoría, para ser económicamente viables, en este sentido a continuación se muestra opciones de reciclaje a nivel internacional que se está concretando en la actualidad.

En España, específicamente en León, en el municipio de Cubillos de Sil, se construye la primera planta de reciclaje de palas eólicas de la Península Ibérica, este proyecto es desarrollado por Endesa y PreZero España con el apoyo de GE Renewable Energy y su filial LM Wind Power, y también Reciclaia Composite expertos en reciclaje de materiales compuestos, en este complejo se reciclarán más de 6000 ton/año de fibra de vidrio y carbono proveniente de los aerogeneradores. Este avance plasma un modelo de economía circular para el sector eólico, y los materiales resultantes podrán tener

aplicación en el sector construcción y cerámico (ENDESA, 2022).

También en España, Naturgy y Ruralia crearon la primera empresa española GIRA Wind (Gestión Integral de Reciclaje de Aerogeneradores), en el municipio soriano de Almazán, para el reciclaje integral de los parques eólicos, dedicado al desmantelamiento y posterior reciclaje completo de los aerogeneradores, considerando el reacondicionamiento y valorización del mayor número de equipos posibles, componentes, materiales y turbinas, así como la recuperación de la fibra de vidrio en las palas, cubre-bujes y capotas, enmarcando así la cadena completa de economía circular para este tipo de instalaciones, lo cual se espera se replique en otras zonas geográfica y fomente la transición energética del país así como la descarbonización (Naturgy, 2022).

7. Rediseñar

Una alternativa que permite una gestión más circular, considerando los principios de las 9R, corresponde al rediseño de los componentes, lo que involucra desde la creación de estos pensarlos de manera tal que estén hechos para ser reciclados, reutilizados o incluso para tener un mayor tiempo de vida útil. En este sentido Siemens Gamesa parece estar a la vanguardia instalando este año, 2022, la primera pala eólica reciclable del mundo. Estas palas han sido instaladas en un parque eólico marino (offshore) en Alemania, y han sido creadas bajo la tecnología RecyclableBlade, la cual consiste en fabricar las palas con materiales unidos con resina obteniéndose una estructura ligera y altamente resistente. Esta tecnología y la utilización de esta nueva resina permite una separación eficaz de los materiales que componen la pala al final de la vida útil de esta, facilitando así los procesos de reciclaje y la aplicación de las técnicas que han sido estudiadas en este documento, que si bien son múltiples y variadas, la mayoría presenta dificultades y son exitosas a nivel de laboratorio en la actualidad, por lo que RecyclableBlade sería un aporte importante en la disminución de residuos de este industria, incorporando solución a estas complejidades desde el diseño (evwind, 2022).

X. BENCHMARK

De acuerdo a las alternativas descritas en el acápite anterior y a la experiencia internacional, es posible realizar un análisis crítico y comparativo a modo de determinar, de acuerdo a los objetivos de este estudio, la búsqueda de soluciones sustentables acorde a la metodología de la economía circular, que se adecuen de mejor manera a la realidad nacional y que permitan entregar la solución más óptima, viable y completa al problema de la generación de residuos de palas o aspas al fin de la vida útil de los parques eólicos. De la misma forma, de las alternativas descritas, es posible también identificar problemas y/o debilidades a modo de evitar o buscar mejoras al respecto para la aplicación en nuestro país.

A nivel internacional, en los países europeos han existido problemas debido a la falta de estandarización en la clasificación LER de los residuos, dificultando su gestión al tener diferentes clasificaciones. En este sentido se identifica una oportunidad de mejora para Chile, ya que actualmente en nuestro país también se usa este listado, por lo que se podría regularizar la clasificación de este tipo de residuos para realizar la declaración en el Sistema Nacional de Declaración de Residuos, SINADER.

Asimismo, en Europa aún existen escasos requisitos normativos para el sector de los residuos compuestos, como lo son las palas eólicas, sin embargo, existen iniciativas que intentan impulsar la circularidad en la Unión Europea, una de ellas es la “Estrategia Europea para plásticos en una Economía Circular” del 2018, pero esta se enfoca principalmente en los plásticos de un solo uso, microplásticos, oxoplásticos y envases, y no en residuos compuestos, los cuales cuentan con sólo un 30% de tasas de reutilización y reciclaje. Dentro de esta agrupación de países existen cuatro países que consideran a los residuos compuestos en su legislación, estos son Alemania, Austria, Países Bajos y Finlandia, y además prohíben la disposición en vertederos y la incineración. Cabe señalar que Francia está considerando introducir un objetivo de reciclaje para las palas eólicas y se encuentra en proceso de incorporar estos residuos dentro de su ley REP al igual que Alemania (WindEurope, 2020). Estas regulaciones podrían servir de base o de ejemplo para la normalización nacional, sobre todo considerando la implementación de la Ley REP que aún se encuentra en proceso en Chile.

Otros de los problemas identificados asociados al fomento de la economía circular de

las palas eólicas en desuso, son la falta de información sobre su composición de fabricación, carencia de normas y/o reglamentos técnicos para la reutilización sostenible, falta de información del diseño, problemas asociados a las conexiones entre las palas, falta de monitoreo del desempeño estructural (Kieran Rueane, 2022). Superar todos estos problemas es un desafío para lograr una real economía circular frente a las palas eólicas en desuso. Es por esto, que desde el gobierno se podría elaborar regularización normativa para exigir etiquetado de fabricación que promueva una segunda vida, y como se ha mencionado normas que favorezcan la reutilización o reciclaje.

Continuando con las falencias legislativas se identifica una falta de inclusión total respecto de las palas de aerogeneradores en desuso, procedimientos y evaluaciones de todo el sistema de evaluación de proyectos, que permita evaluar objetivamente el impacto ambiental y social de palas de aerogeneradores, teniendo en cuenta su ciclo de vida, es decir, todas las etapas de su existencia, incluyendo el fin de su vida útil (Józef B Flizikowski, 2018). En este sentido a nivel nacional se debe incorporar dentro de los procesos de evaluación ambiental de los proyectos una visión de ciclo de vida más completa y circular.

Una de las opciones prioritarias en la jerarquización de la gestión de residuos es la reutilización, en el caso de palas permite entregar una segunda vida aprovechando el 100% de los materiales de las aspas (Bank et al., 2021). Es así como la reutilización estructural, resulta una excelente opción, que requiere un esfuerzo de procesamiento pequeño y conserva la calidad del material, siendo una de sus únicas complicaciones el tamaño de las palas (Joustra et al., 2021). Otro tipo de reutilización corresponde a la venta de componentes de segunda mano o usados, esta alternativa es bastante atractiva, desde el punto de vista de la sustentabilidad ya que representa una opción para aquellos países que están integrando recientemente las energías renovables a su matriz energética, o que tiene recursos escasos para acceder turbinas nuevas, además a permite la reutilización no solo de las palas, sino que de la turbina completa o por partes, sin embargo, esta última solución a nivel de producto prácticamente no es posible o al menos se dificulta bastante, ya que las palas de los aerogeneradores no son intercambiables fácilmente con otros aerogeneradores, siendo de este punto de vista más viable el reciclaje (Joustra et al., 2021), esto debido a que cada turbina es diseñada de manera personalizada y no de forma estándar, por lo que se encuentran

aspas de diferentes tamaños y materialidades, siendo este un punto importante por mejorar a futuro, una posible solución es la planteada anteriormente respecto de trabajar en un sistema de estandarización, codificación y eco etiquetado. Otro inconveniente identificado es el transporte, al vender los componentes a otros países, lo cual tiene una huella de carbono asociada alta, restándole sustentabilidad a la solución.

Por otra parte, existe la opción del reciclaje, método para recuperar el material de fibra o el material polimérico, ya sea mediante reciclaje mecánico, térmico, químico o coprocesamiento. La mayoría de estos métodos tienen una eficiencia de aproximadamente un 50% de recuperación de material (suponiendo que la fracción de masa de fibra en los compuestos es del 50%, lo cual se relaciona con los porcentajes de la Tabla 6 Composición residuos potenciales de las palas de los parques eólicos de Chile entre los años 2025 - 2074.) (Bank et al., 2021). Por lo cual estas alternativas se vuelven poco atractivas, debida a la baja eficiencia de recuperación de material. Por su parte, el reciclaje mecánico o molienda, logra la reducción del tamaño de las palas, cuyo material resultante puede ser reutilizado de diferentes formas, como relleno o como refuerzo en el hormigón, plásticos reforzados u otros productos, pudiendo alcanzar una eficiencia del 80% (Bank et al., 2021), por lo que se identifica como una alternativa atractiva. Otra de las opciones de reciclaje analizadas que resulta recomendable para este estudio corresponde al coprocesamiento en un horno de cemento, siendo esto aplicable para las aspas de polímeros reforzados con fibra de vidrio, mediante este método de reciclaje es posible recuperar la fibra y utilizar la energía de los polímeros, no obstante, la ganancia de energía es baja y el material se pierde para un uso posterior y la perspectiva económica es limitada, si consideramos que solo se puede reemplazar las sílices en un 15% por el material de las aspas, y debido a que es aplicable a solo una industria (la cementera) (Joustra et al., 2021). Asimismo, se debe tener cuidado ya que la facilidad de eliminar las palas eólicas con este método podría desincentivar la reutilización que es lo que se debe fomentar antes que el reciclaje (J. Nangle et al., 2020).

Uno de los criterios de sustentabilidad puede ser la comparación de algunas alternativas de reciclaje de acuerdo con su demanda energética, siendo las que ocupan menos energía el reciclaje mecánico, es decir, la molienda o trituración, empleando entre 0,1 y 4,8 MJ/kg seguido por la pirolisis por microondas, tal como se observa en las figuras Figura 18 y Figura 19 (C. Bank, 2018).

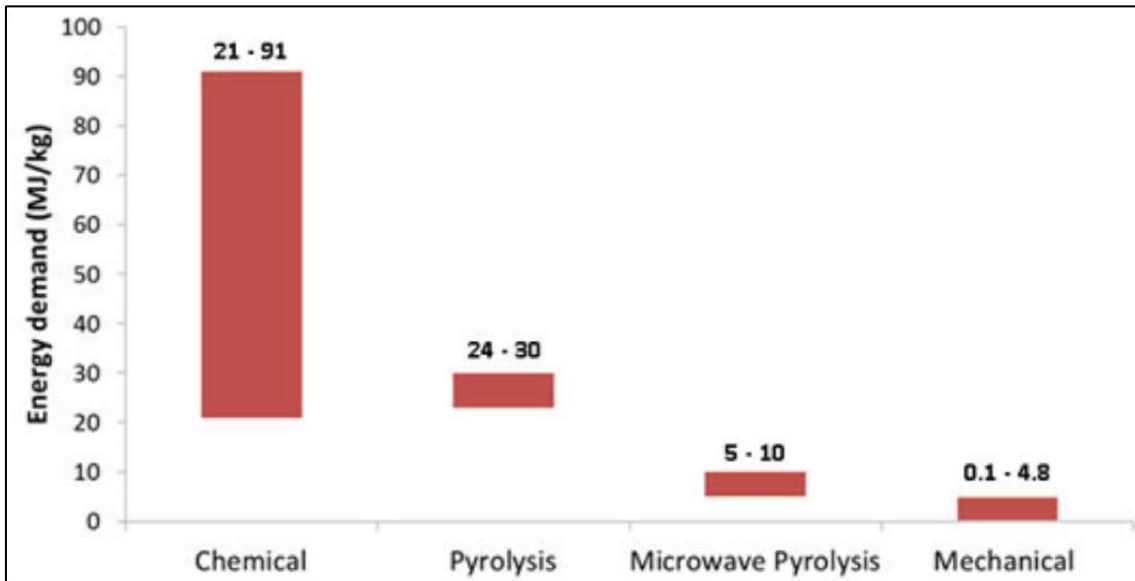


Figura 17 Gráfico de la demanda de energía en métodos de reciclaje para palas de aerogeneradores
 Fuente: C. Bank, 2018.

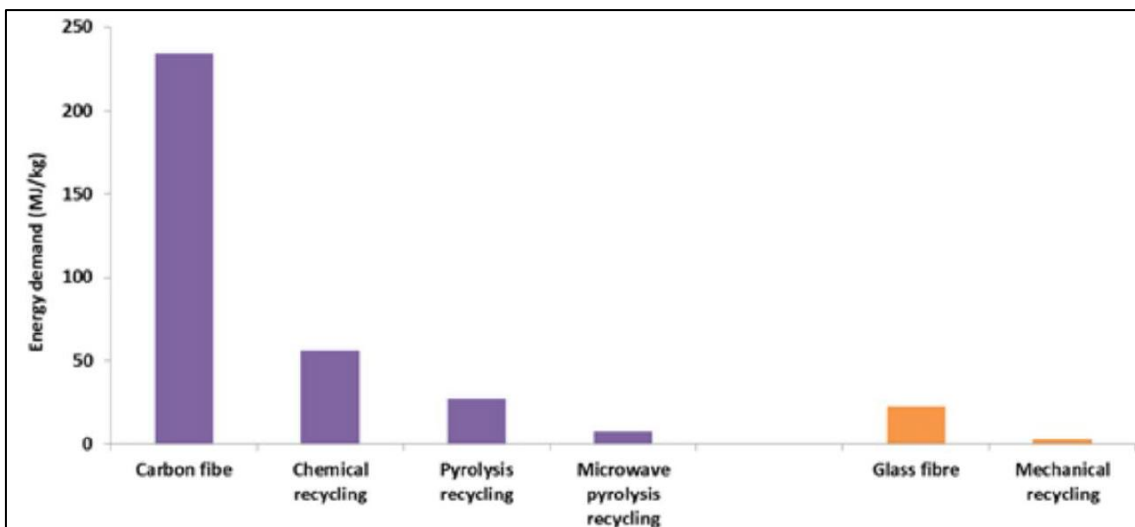


Figura 18 Gráfico comparativo entre energía incorporada de la fibra producida y potencial procesos de reciclaje (promedio)
 Fuente: C. Bank, 2018.

Acorde a lo anterior, podemos comparar la cantidad de energía utilizada para la fabricación de las aspas de fibra de carbono y fibra de vidrio, y en ambos casos sus alternativas de reciclaje utilizan menos energía de la que fue necesaria para la creación. Esto es un aspecto positivo respecto de estos métodos de reciclaje, sin embargo, como se ha mencionado en su mayoría se encuentran a escala de laboratorio y son poco

rentables en la actualidad, esperándose que a futuro mejoren estos puntos y se puedan aplicar estas técnicas en la industria.

Al comparar los métodos, el reciclaje por lecho fluidizado tiene como desventaja que las fibras se degradan más que por solvólisis o pirolisis, es decir que pierden sus propiedades mecánicas, y que además aún no se desarrolla en grandes escalas como para evaluar sus emisiones. La pirolisis tiene como beneficio la obtención de subproductos como aceite y gas que pueden utilizarse, y la pirolisis por microondas resulta aún mejor ya que provoca menor daño a la fibra y sus propiedades. Y reafirmando lo anterior el reciclaje mecánico resulta muy eficiente y tiene un alto rendimiento de costos (WindEurope, 2020). El coprocesamiento en hornos de cemento, por su parte, tiene la ventaja de ya ser escalable a nivel técnico y comercial y la reducción de un 16% de las emisiones de CO₂ provenientes de la fabricación de cemento, además de la reducción de extracción de recursos naturales (áridos) y que no se obtienen cenizas como subproducto (WindEurope, 2020).

Cabe señalar que, si bien existen diversas tecnologías para reciclar fibra de vidrio y carbono provenientes de las palas de aerogeneradores, como se ha mencionado estas alternativas aún no se encuentran disponibles a escala industrial, además el costo de fibra nueva es de 1 a 2 euros por kilo, lo que hace que la fibra recuperada no sea competitiva económicamente en los mercados. No obstante, en la Figura 19 se observa que el coprocesamiento y el reciclaje mecánico tienen los más bajos costos seguidos de la pirolisis (WindEurope, 2020).

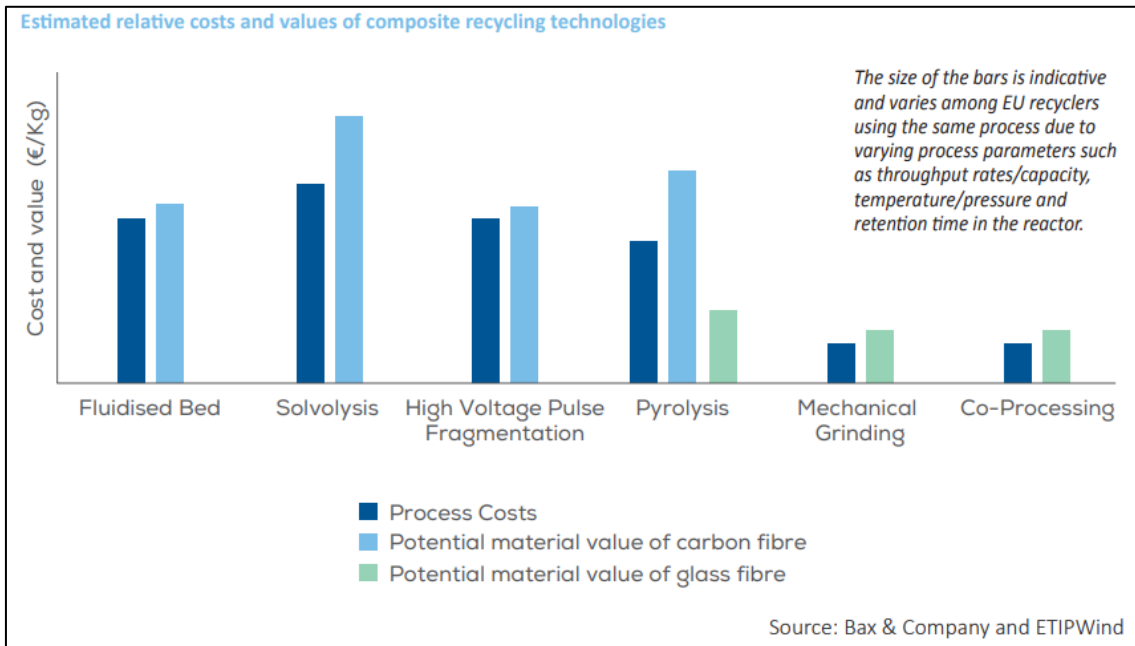


Figura 19 Costos y valores relativos estimados de las tecnologías de reciclaje de materiales compuestos
 Fuente: WindEurope, 2020.

De este modo al analizar el escenario internacional, en Alemania desde el año 2009 se prohíbe el vertido directo de residuos con contenido orgánico superior al 5%, lo cual corresponde con el caso de las palas debido a su porcentaje de resina, lo que ha impulsado el coprocesamiento en hornos de cemento, el cual tiene un costo de 150 euros por tonelada. En cambio, en Países Bajos, también se encuentra prohibido el depósito de residuos compuestos en vertederos por el Plan Nacional de Gestión de Residuos, pero existe una exención en relación al costo de la gestión, si el costo de reciclaje supera los 200 euros por tonelada se permite su vertido, lo cual ocurre en la mayoría de los casos continuando así con la disposición en vertederos, ya que el reciclaje cuesta entre 500 y 1000 euros por tonelada, y el reciclaje mecánico entre 150 y 300 euros por tonelada (WindEurope, 2020).

En este sentido se debe prestar atención a los modelos que quieren incentivar de modo que la legislación finalmente no sea ni una piedra de tope para la industria al momento de disponer de sus residuos, pero tampoco muy permisivos desincentivando el modelo de economía circular al que se desea acercar.

Finalmente, uno de los principales problemas detectados para Chile al igual que en otros países, son las economías de escala para instalar plantas de reciclaje debido a la

irregularidad de la generación de estos residuos y al alto nivel de incertidumbre hace que pensar en métodos de reciclaje más avanzados no sean un negocio rentable, así como por la distribución geográfica de los parques debido a la geografía propia del país, encareciendo cualquier intento de reutilización por las distancias y el transporte

XI. PROPUESTAS Y MEJORAS

Las propuestas y mejoras se realizan analizando la realidad nacional y considerando aquellas opciones más sustentables. Por lo tanto, al ser Chile un país en vías de desarrollo se cree que las alternativas más adecuadas corresponden a las de la reutilización, ya que requieren de menor inversión en ciencia y procesos tecnológicos, en comparación al reciclaje, y representa una opción más viable al corto plazo, además porque se identifica un amplio potencial mercado, en el caso de la reutilización estructural, la cual podría responder al rubro de la construcción ante la falta de infraestructura que existe a nivel nacional, por lo que la inversión incluso podría provenir del gobierno, cumpliendo así el Estado, por un lado un rol impulsor y por otro siendo un consumidor de material secundario proveniente de aspas de turbinas eólicas, utilizándolo para la construcción de puentes, paraderos de micros y buses, estacionamientos de bicicleta (medio de transporte que ha incrementado durante los últimos años), techos de estacionamientos, techos de viviendas sociales, entre otros. Respecto de los privados, también se identifican posibles mercados, estos podrían reutilizar el material de las aspas para construcción de tiny houses o casas pequeñas que son utilizadas para la recepción de turistas en periodos estivales, construcción de oficinas y bodegas móviles para instalaciones de faenas de proyectos, construcción de postes y/o torres eléctricas, entre otros. Por su parte la reutilización para venta de segunda mano si bien es una buena opción se debe considerar el transporte lo que disminuye la sustentabilidad de la alternativa, ya que esta opción apuntaría a mercados internacionales, por lo tanto, ideal sería limitar este mercado a otros países de Latinoamérica, de manera que estos se encuentren cercanos y la huella de carbono asociada al transporte sea la menor posible.

Con una mirada más al largo plazo, pero que requiere de comenzar pronto, es el fomento de la investigación, la innovación y el desarrollo de alternativas que se encuentren en los eslabones más altos de la jerarquía de residuos (J. Nangle et al., 2020), de manera de preparar al país para los problemas que deberá enfrentar en un futuro cercano, teniendo así disponibles diferentes y variadas alternativas que se ajuste a la realidad local y económica, y que no sature solo un mercado u opción de gestión de residuos.

Respecto del reciclaje, se destaca como una de sus principales dificultades para la implementación es la rentabilidad económica que se requiere, esto frente a la

complejidad de alcanzar economías de escala, los altos niveles de inversión que se necesitan y los gastos asociados al transporte. En este sentido se cree que sería factible un método de trituración in situ con una empresa, como el utilizado en España por la empresa Constrictor, que se dedique a ello y que sea la empresa que se traslade a cada lugar y no al contrario, para luego emplear las fibras en las plantas cercanas que existan de hormigón o procesarlas en instalaciones instaladas estratégicamente de acuerdo a la regiones identificadas para las que se prevé una mayor generación de residuos durante los próximos años, es decir en Antofagasta, Coquimbo, Biobío y Magallanes. Una posibilidad de aumentar esta rentabilidad podría ser que estas plantas recicladoras pudieran recibir además residuos provenientes de otras industrias, pero de composición similar como lo son aeronaves y aparatos automotrices.

Independiente de la alternativa seleccionada se cree que el primer paso, y quizá el más importante, para dar solución al problema de los residuos de los parques eólicos, es trabajar en la mejora de las barreras legislativas, ya que la gestión jerarquizada de residuos es fundamental para priorizar las alternativas de gestión prefiriendo siempre la prevención desde el diseño, luego la reutilización, el reciclaje y por último la disposición final. Por lo que se debe seguir avanzando en esta línea e incorporar grandes residuos industriales como las palas de los aerogeneradores en la Responsabilidad Extendida del Productor, mediante Ley REP, para evitar la disposición en vertederos o rellenos sanitarios, o bien optar por elaborar otras políticas públicas que incorporen la gestión de este tipo de residuos o que prohíban la disposición de residuos de gran tamaño en rellenos sanitarios.

También dentro de la línea legislativa, respecto de la evaluación ambiental se destaca que la principal falencia identificada es la falta de inclusión de los aerogeneradores en desuso dentro del proceso de evaluación, sin tener en consideración los impactos ambientales causados durante todo el ciclo de vida de los proyectos, en este sentido se visualiza un punto de mejora que debe ser abordado con urgencia.

Se recomienda también estandarizar legislativamente la clasificación LER de los residuos de las palas eólicas para realizar la declaración de residuos en el sistema SINADER y que con ello aparezcan en el listado, de este sistema, las opciones de tratamiento y destinos autorizados. Esto con el objetivo de que exista claridad para los generadores de los residuos y la gestión de éstos sea la adecuada, o la que se indique

normativamente, y además con esto se facilitarían la fiscalización y el seguimiento por parte de las autoridades de la adecuada gestión de este tipo de residuos.

Incorporar propuestas de economía circular en la industria eólica requiere cierta logística y tecnología para proceder al desmontaje, recogida, transporte, residuos tratamiento de gestión y la forma de reintegración al valor cadena (WindEurope, 2020), es en este último punto donde se deben tomar medidas inmediatas tomando en cuenta la jerarquía en el manejo de residuos de Chile, es decir, Prevención, Reutilización, Reciclaje, Valorización Energética y como última opción la Eliminación, al respecto se propone lo siguiente:

1° Que se prevenga la generación de residuos de palas mediante el fomento de la extensión de la vida útil de las palas, aumentando su período de funcionamiento, realizando mantenciones y/o revisiones periódicas, y ejecutando reparaciones. Asimismo, se debe continuar trabajando en el rediseño de las palas para que generen menos residuos, o que posean una fácil actualización, considerada desde el diseño.

2° Que se fomente la reutilización de las palas mediante venta de segunda mano en países latinoamericanos menos exigentes o en otros parques eólicos usándolas para el mismo fin que fueron fabricadas, o bien por Reconstrucción o Refabricación de piezas deterioradas y luego vendiéndolas reacondicionadas con garantía. Asimismo, existe una tercera alternativa de reutilización que es la estructural que también tiene nicho de crecimiento en nuestro país, reutilizando las palas para otras infraestructuras, edificios o productos. Este punto es fundamental se fomente desde políticas públicas e inversiones, ya que en Chile actualmente no existen empresas reconocidas que se dediquen a estos negocios (reconstrucción o reutilización estructural).

3° Reciclaje, cuando ya no sean posibles las opciones anteriores, las palas podrán convertirse en un nuevo producto o material, siendo la alternativa más recomendable en nuestro país el reciclaje mecánico que demanda menos energía y tiene menores costos, lo que lo hace más sustentable, y su producto es posible de introducir en el mercado para fibras de hormigón, solución que ya se encuentra disponible a escala industrial, por lo que sería fácil y rápido implementar esta alternativa en el país.

4° Valorización energética, es posible quemar las palas para generar energía o el

coprocesamiento en hornos de cemento, sin embargo, se debe considerar la generación de residuos y que no se recupera material, solo energía.

5° Eliminación, cuando no sean posibles las alternativas anteriores o con los restos de material, es aceptable desde el punto de vista legislativo aún la disposición en rellenos sanitarios, sin embargo, no es recomendable desde el punto de vista ambiental. No obstante, se sugiere que se prohíba la disposición de estos voluminosos residuos en rellenos sanitarios, y así opciones previas como prevención, reutilización y reciclaje serían indispensables.

XII. DISCUSIÓN

La literatura indica que la vida útil de los aerogeneradores es entre 20-30 años, esperándose un aumento de residuos para Chile hacia el año 2040. Estos datos han sido coincidentes con los resultados obtenidos en este estudio, donde se espera que los aerogeneradores instalados y por instalar (en calificación o con RCA obtenida) tendrán una vida útil de 27 años promedio, esperándose un importante aumento en la cantidad de residuos al año 2040. Por lo tanto, se reafirma la importancia de trabajar en prontas soluciones a nivel nacional, ya que este es un problema que tendrá su comienzo dentro de los próximos años (2025), y que aún no presenta soluciones concretas, especialmente a nivel local, lo que obligaría a los titulares de proyectos a disponer estos residuos en vertederos autorizados, lo anterior con todas las implicancias ambientales y sociales que esto conlleva, como contaminación de suelos, contaminación atmosférica, contaminación de aguas, y desmedro social de las familias que habitan los alrededores, bajando el valor de los sus propiedades, entre otros (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). Sobre todo, considerando los grandes volúmenes de los residuos de aerogeneradores, pudiendo saturar los rellenos sanitarios disponibles en la actualidad, lo cual podría desencadenar un problema de salud pública al no tener donde disponer sus residuos el resto de las industrias, incluidos los servicios municipales de residuos domiciliarios.

Respecto de la materialidad de estas aspas, se confirma la complejidad recuperación de los materiales y la falta de soluciones desarrolladas a nivel industrial, en este sentido se identifica una alerta respecto de la rapidez del desarrollo de la ciencia y la tecnología, y la manera en que se presentan los problemas en la industria. Problema que se acrecentaría mucho más en países en vías de desarrollo como Chile, donde la inversión en innovación, ciencia y tecnología es baja, por lo que este es un punto donde se debe poner especial atención, tal como lo indica también Wind Europe en su publicación “Accelerating Wind Turbine Blade Circularity” del 2021.

Tal como se esperaba las soluciones analizadas, permiten aumentar la sostenibilidad de la energía eólica y en su mayoría acercarnos más al modelo de economía circular, considerando que son capaces de recuperar materiales, evitando su disposición final en rellenos sanitarios, por lo que la reutilización y el reciclaje permiten disminuir la extracción de materiales desde la Tierra, así como la gran cantidad de energía que es necesaria para la fabricación de estos componentes, además con su instauración se

crean puestos de trabajo y se evitan los impactos socioambientales ligados a la disposición de residuos, entre otros beneficios.

Respecto de la prohibición de disponer residuos voluminosos como las palas eólicas en rellenos sanitarios, es una opción para Chile, considerando el escaso suelo disponible, a pesar de que hay evidencia donde esta medida no ha funcionado, como en Países Bajos, también existen casos donde los resultados han sido positivos, como en Alemania (WindEurope, 2020), es por ello que entidades como WindEurope y Asociación de Empresarial Eólica, desde el año 2021 están llamando a que se proponga esta prohibición en la Unión Europea para el año 2025 (Asociación Empresarial Eólica (AEE), 2021).

En cuanto a la estandarización del código LER para los residuos de materiales compuestos, como se dijo anteriormente, existen múltiples posibilidades, sin embargo, la Asociación Empresarial Eólica propone que se clasifiquen como plástico con el código 17 02 03, lo cual es necesario revisar y requiere ser material de otra investigación.

El problema dado por las economías de escala y hacer rentable el negocio del reciclaje eólico, tal como se ha indicado podría mejorarse aumentando los residuos a transformar, empleando más material proveniente de otras industrias como la aeronáutica, automotriz, y otros. Ya que la industria eólica no es la única que genera residuos de materiales compuestos, por lo que la recuperación y transformación de estos materiales es un desafío intersectorial (WindEurope, 2020). Cuya factibilidad para Chile podría investigarse en otro trabajo de tesis.

XIII. CONCLUSIÓN

En la presente investigación se logró identificar diversas oportunidades de economía circular para el fin de vida útil o desperfecto de las aspas de aerogeneradores, de las cuales sólo algunas resultaron ser viables para llevar a cabo en Chile debido principalmente a la industrialización de las alternativas, ya que, si bien existen varias, son escasas las que actualmente se realizan a nivel industrial o poseen un mercado para lograr establecerse económicamente.

Primeramente, se realizó un diagnóstico de los parques eólicos en Chile y se proyectaron la cantidad de residuos a generar de acuerdo con la cantidad de palas, masa, distribución geográfica, composición de los residuos, entre otros. Mediante este estudio se identificó un incremento en la inversión en proyectos eólicos en el país, desde el año 2012, lo cual se asocia con la publicación de la Estrategia Nacional de Energía. Los proyectos eólicos, de acuerdo con este estudio, se concentran en las regiones de Biobío, Antofagasta y Coquimbo, por lo tanto, en estas regiones se debe priorizar la implementación de soluciones de gestión de residuos, considerando además aquellas que, si bien no se encuentran en las de mayor desarrollo en la actualidad, si son las de mayor potencial de desarrollo de energía eólica como la región de Magallanes, Aysén y Los Lagos, de esta manera las soluciones se encontrarán descentralizadas, atendiendo a los territorios que las necesitan, incrementado la oferta laboral local y al mismo tiempo haciéndolas más económicas y con menos emisiones asociadas a transporte, es decir, más sustentables. Adicionalmente, al realizar un análisis desde la perspectiva de la cantidad de palas que se espera generar por cierre de parques eólicos en Chile, esta pudiera parecer en términos de masa como un número poco significativo, 7.066 ton/año en promedio, sin embargo, se debe considerar que se espera que se continúen instalando parques, por lo tanto estos números se verán incrementados, por lo que el escenario se volverá más pesimista y tomará mayor urgencia, y por otra parte esto debe ser analizado considerando los espacios y volúmenes que ocuparían este tipo de residuos, lo cual podría provocar una falta de lugares autorizados que tengan la capacidad de recibir este tipo de componentes en desuso. Asimismo, del total de proyectos estudiados el 86% propone extender su vida útil, mediante mejoras o innovaciones tecnológicas, mantenciones adecuadas y/o renovación de equipos, es decir, desde el eslabón de la gestión jerarquizada de “prevenir” la generación de residuos. Asimismo, los proyectos en la descripción de la fase de cierre o abandono proponen acciones como reciclaje, reutilización o venta. Sin embargo, si estas

soluciones teóricas las contrastamos con la realidad actual, en donde se espera que la generación de este tipo de residuo comience en un plazo de aproximadamente tres años, identificamos que aún no se cuenta con empresas especializadas que puedan prestar los servicios de gestión propuestos, por lo que se visualiza una oportunidad de mercado que se debe desarrollar con urgencia durante los próximos años.

En segundo lugar, se llevó a cabo un análisis del marco legal, dando cuenta que Chile cuenta con instituciones sólidas y variadas normativas, tanto en temas ambientales como energéticos, no obstante, ninguna de estas resultó ser específica para residuos de gran tamaño, o para materiales compuestos, en general se reconoció una falta de regularización para la gestión de residuos que no sean considerados peligrosos, por lo que se debe trabajar en este sentido. Al respecto, se considera que el país se encuentra en una cierta posición de ventaja, al no generar residuos de aspas (en teoría) aún, por lo que hay tiempo para desarrollar iniciativas, visualizar e implementar mejoras, crear normativa, fomentar mercados y evitar así los problemas que se han presentado en países más desarrollados, como por ejemplo estandarizar el código LER para este tipo de residuos, el cual es utilizado al realizar la declaración en el Sistema Nacional de Declaración de Residuos No Peligrosos (SINADER) para asegurar su trazabilidad y gestión adecuada. Además, se reconoció una falta de inclusión total respecto a las aspas, ya que, en los procesos de evaluación de impacto ambiental, no se les da una visión de ciclo de vida completa y circular, es decir, se identifica que solo algunos proyectos indican cual será la gestión de estos “residuos” al cierre del parque, sin embargo otros no lo indican, siendo aprobados por el SEIA con la incertidumbre de qué pasará una vez termine la vida útil de estos aerogeneradores o en caso de ser necesario el recambio de algún componente. Lo que debe mejorarse en el corto plazo para disminuir los riesgos ambientales de la disposición de estos residuos de gran tamaño. Otra mejora normativa recomendable es prohibir la disposición de residuos de gran tamaño como las palas eólicas en rellenos sanitarios o vertederos, promoviendo así la gestión jerarquizada a través de la Ley REP.

Posteriormente se materializó un análisis del escenario internacional sobre el manejo de residuos de las palas eólicas, del cual se obtuvieron varias soluciones que podrían ser aplicables en Chile, así como falencias en sus sistemas que lograrían ser prevenidos en nuestro país. De este modo primero se propone fomentar la gestión jerarquizada de residuos promoviendo la prevención y reutilización, la prevención mediante la extensión

de la vida útil y desarrollando investigación para el rediseño de las palas con la finalidad de generar menos residuos y de poder realizar una fácil actualización, y así mismo trabajar en la estandarización de estos componentes; mientras la reutilización debe fomentarse mediante venta de segunda mano en países latinoamericanos para el mismo fin o para refabricación de piezas deterioradas, o bien a través de la reutilización estructural, es decir, utilizando las palas para generar otras infraestructuras, edificios o productos. Para esto es necesaria la creación de estos nuevos mercados, los que deben ser fomentados a través de la legislación, apoyando la creación de nuevas empresas dedicadas a la recuperación de este tipo de material, ya sea para su reparación y venderlo reacondicionado, o para un mercado secundario de materias primas que acepte incorporar, por ejemplo, fibras provenientes de la trituración de las palas, como podría ser la industria cementera del país. Respecto de la implementación de soluciones asociadas a el reciclaje en Chile se identificaron problemas; el primero se refiere a las economías de escala, ya que el flujo de residuos a reciclar no es permanente ni constante, lo que genera incertidumbre ante la inversión que se debe realizar; segundo las características geográficas del país, y la generación en diferentes zonas de este, lo que implica costos y emisiones asociadas al transporte, lo que podría encarecer mucho la solución del reciclaje, por lo que, como se menciona anteriormente es necesario un plan de acción descentralizado; y el tercer problema corresponde a la baja industrialización de los métodos de reciclaje, ya que en su mayoría aún se encuentran en etapas de estudio a nivel laboratorio, pero sin duda, más adelante se desarrollarán alternativas más masivas, para esto Chile no puede quedarse atrás y debe fomentar la investigación, innovación y desarrollo en estas temáticas.

Finalmente, de cada uno de los análisis realizados se pudo obtener diversas propuestas de economía circular para el fin de vida de las palas eólicas en Chile, visibilizando principalmente la necesidad de aumentar la investigación e innovación para desarrollar nuevos materiales de alto rendimiento que permitan la circularidad desde el diseño, es decir, que tengan una vida útil más larga, que estén elaborados para reutilizarse y originarse desde materiales recuperados, o ser fabricados para ser reciclados. Así como también, resulta necesario estudiar las barreras de mercado del reciclaje de las palas eólicas y medidas para derribarlas, esto puede ser tomado como una recomendación para futuros trabajos respecto de este tema a nivel nacional, ya que la información económica es escasa y corresponde a un punto de partida para los inversionistas.

XIV. BIBLIOGRAFÍA

- A. Alshannaq, A., C.Bank, L., W. Scott, D., & Gentry, R. (7 de julio de 2021). A Decommissioned Wind Blade as a Second-Life Construction. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/constrmater1020007>
- Agenda 2030 en América Latina y el Caribe. (s.f.). *Agenda 2030 en América Latina y el Caribe*. Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos: <https://agenda2030lac.org/es/ods/7-energia-asequible-y-no-contaminante>
- Asociación Empresarial Eólica (AEE). (12 de Noviembre de 2021). *aeolica.org*. ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO: https://aeolica.org/wp-content/uploads/2021/12/AEE-2021-Economia-Circular-en-el-sector-eolico_Palas-de-los-Aerogeneradores.pdf
- Bank, L., Delaney, E., Mcninley, J., Gentry, R., & Leahy, P. (14 de mayo de 2021). *Defining the landscape for wind blades at the end of service life*. <https://www.compositesworld.com/articles/defining-the-landscape-for-wind-blades-at-the-end-of-service-life>
- BBVA. (2 de noviembre de 2021). *BBVA*. El reciclaje de los aerogeneradores: asignatura pendiente: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-reciclaje-de-los-aerogeneradores-asignatura-pendiente/>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Chile Nuestro País: https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/index_html
- C. Bank, L. (julio de 2018). Opportunities for Recycling and Reuse of FRP Composites for Construction in a Circular Economy. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17046.80965>
- Cárdenas, A. V. (mayo de 2022). *Biblioteca del Congreso Nacional, Asesoría Técnica Parlamentaria*. Acuerdo de Escazú: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33189/2/Acuerdo_de_Escazu._Aprobacion_1T_Camara.pdf
- CDT. (17 de mayo de 2022). De aspa de un generador eólico a proteger bicicletas. <https://www.cdt.cl/de-asta-de-un-generador-eolico-a-proteger-bicicletas/>
- Colbún S.A. (31 de enero de 2020). *SEA*. EIA Parque Eólico Horizonte: https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=2145533743
- Comisión Nacional de Energía. (1 de Octubre de 2006). *Ministerio de Energía*. Guía para evaluación ambiental energías renovables no convencionales proyectos eólicos:

- https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/guia_eolica.pdf
- Comisión Nacional de Energía. (19 de Enero de 2022). *Resolución Exenta N°37*. Retrieved 17 de junio de 2022, from Aprueba informe definitivo de previsión de demanda 2021-2041 Sistema Eléctrico Nacional y Sistemas Medianos: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/01/Res.Exta_.N%C2%B0-37_Aprueba-Informe-Def-Prev-Dda._19-01-2022.pdf
- Comunidad Madrid. (s.f.). *Comunidad Madrid*. Lista europea de residuos (LER): <https://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/categorias-residuos>
- CORDIS EU . (2014). *High Voltage Pulse Fragmentation Technology to recycle fibre-reinforced composites*. <https://cordis.europa.eu/project/id/323454>
- CORDIS UE. (2014). *High Voltage Pulse Fragmentation Technology to recycle fibre-reinforced composites*. <https://cordis.europa.eu/article/id/170290-recycling-and-reuse-of-carbon-fibres/es>
- CORFO. (17 de junio de 2021). *CORFO*. Corfo lanza programa para acelerar el desarrollo colaborativo del Hidrógeno Verde en: https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/17_06_2021_magallanes_hidrogeno_verde;jsessionid=H64dEu6cX7Z8JxqjgHDIZEancjj-3MZLUtyuPhci9acSace9s3dB!624013544!NONE
- Cousins, D. (2018). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Cleaner Production*, 12.
- Deeney, P., J. Nagle, A., Gough, F., Lemmertz, H., L.Delaney, E., M. McKinley, J., . . . Mullally, G. (12 de mayo de 2021). End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices. Ireland. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0921344921002512?token=ABE3AD4AA84FFF13136851D20272A03080843699A42B93DCDBDE92E26E093E27B09C65642815F2EB2E78AC2D4B3D2A41&originRegion=us-east-1&originCreation=20221020233736>
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. (1999). DIRECTIVA 1999/31/CE DEL CONSEJO relativa al vertido de residuos. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*.
- Diario Sustentable. (24 de Diciembre de 2021). *Diario Sustentable*. Retrieved 17 de junio de 2022, from Ranking Climatescope de Bloomberg: Chile es reconocido como el mejor país para invertir en energías renovables en América: <https://www.diariosustentable.com/2021/12/ranking-climatescope-de->

bloomberg-chile-es-reconocido-como-el-mejor-pais-para-invertir-en-energias-renovables-en-america/

ENDESA. (31 de enero de 2022). *Endesa y PreZero España construirán la primera planta de reciclaje de palas eólicas de la Península Ibérica con el apoyo de GE Renewable Energy.* <https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/eficiencia-energetica/economia-circular/primera-planta-reciclaje-palas-eolicas-peninsula-iberica>

Enel Green Power. (26 de marzo de 2021). *Enel Green Power.* Nueva vida y nuevos materiales, el desafío de innovación y sostenibilidad para la energía eólica: <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2021/03/reciclaje-turbinas-eolicas>

evwind. (1 de agosto de 2022). *Siemens Gamesa instala la primera pala eólica reciclable del mundo.* <https://www.evwind.com/2022/08/01/siemens-gamesa-instala-la-primera-pala-eolica-reciclable-del-mundo/>

García Bernal, N. A. (1 de Abril de 2021). *Biblioteca del Congreso Nacional.* Impacto ambiental de aerogeneradores: Campos Eólicos Situados en tierra: https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/detalle_documento.html?id=79372

Generadoras de Chile. (s.f.). *Generadoras de Chile.* Generación Eléctrica en Chile: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

Generadoras de Chile. (s.f.). *Generadoras de Chile.* Energía Eólica: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>

Induambiente. (2021). Reciclaje Eólico. *Induambiente*, 84-85. <https://www.induambiente.com/especial/energia/reciclaje-eolico>

Inerco. (15 de febrero de 2018). *SEIA.* DIA Parque Eólico Litueche: <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2138522708>

Instituto Nacional de Estadística. (s.f.). *INE.* Estadísticas: <https://www.ine.cl/estadisticas/>

J. Nangle, A., L. Delaney, E., C. Bank, L., & G. Leahy, P. (17 de agosto de 2020). A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620333667>

Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. (18 de marzo de 2021). Structural reuse of wind turbine blades through segmentation. Holanda. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100137>

Józef B Flizikowski, W. K. (2018). Destruction assessment of wind power plastics blade. *Polimery*, 63(5), 5.

- Karuppannan Gopalraj, S., & Kärki, T. (18 de febrero de 2020). A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. (S. A. Sciences, Ed.)
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
- Kieran Rueane, A. N. (2022). Wind turbine blades afterlife. *Wind energy Ireland Conference*.
- Leahy, P., Zhang, Z., Nagle, A., Gentry, R., J. Nagle, A., Ruane, K., . . . Gentry, T. (26 de agosto de 2021). Greenway bridges from wind blades Greenway pedestrian and cycle bridges from repurposed wind turbine blades. Irlanda.
https://www.researchgate.net/publication/355394590_Greenway_bridges_from_wind_blades_Greenway_pedestrian_and_cycle_bridges_from_repurposed_wind_turbine_blades
- Lefevre, A., Garnier, S., Jacquemin, L., Pillain, B., & Sonnemann, G. (2019). Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. *ELSEVIER*, 30-39.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918303732>
- Liu , P., & Barlow, C. (2017). Wind Turbine blade waste in 2050. *Elsevier*(62), 12.
- Marsh, G. (2017). What's to be done with 'spent' wind turbine blades? *Renewable Energy Focus*, 22, 4.
- Materplat. (s.f.). *Materplat*. Reciclalia: <https://materplat.org/capacidades/reciclalia/>
- Mello, G., Ferreira Dias, M., & Robaina, M. (2 de febrero de 2022). Evaluation of the environmental impacts related to the wind farms end of life. *Elsevier*, 8, 6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.024>
- Ministerio de Energía. (2014). *Energía Renovables en Chile, El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé*.
- Ministerio de Energía. (2021). *MAPA NORMATIVO DEL SECTOR ENERGÉTICO CHILENO - ABRIL 2021*.
https://energia.gob.cl/sites/default/files/mapeo_normativa_energetica_2021.pdf
- Ministerio de Energía. (16 de octubre de 2022). *Potenciales de energía*.
https://potenciales.minenergia.cl/potencialesv2/?page_id=83#home
- Ministerio de Energía. (Febrero de 2022). *Transición Energética de Chile Política Energética Nacional*.
https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pen_2050_-_actualizado_marzo_2022_0.pdf
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Mesa de Trabajo Descarbonización*.

- <https://www.energia.gob.cl/panel/mesa-de-trabajo-descarbonizacion>
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Ministerio de Energía*. Polo de Desarrollo - Antofagasta:
<https://energia.gob.cl/pelp/polo-de-desarrollo-antofagasta>
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Planificación Energética de Largo Plazo*.
<https://energia.gob.cl/pelp/repositorio>
- Ministerio de Relaciones Exteriores. (23 de mayo de 2017). *Biblioteca del Congreso Nacional*. DECRETO 30 PROMULGA EL ACUERDO DE PARÍS, ADOPTADO EN LA VIGÉSIMO PRIMERA REUNIÓN DE LA CONFERENCIA DE LAS PARTES DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO:
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1103158>
- Ministerio de Salud. (29 de abril de 2000). *Biblioteca del Congreso Nacional*.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- Ministerio de Salud. (16 de junio de 2004). *Biblioteca del Congreso Nacional*. DECRETO 148 APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- Ministerio del Medio Ambiente. (12 de agosto de 2013). *Biblioteca del Congreso Nacional*. DECRETO 40 APRUEBA REGLAMENTO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL:
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563&idParte=9369919>
- Ministerio del Medio Ambiente. (02 de mayo de 2013). *Biblioteca del Congreso Nacional*. DECRETO 1 APRUEBA REGLAMENTO DEL REGISTRO DE EMISIONES Y TRANSFERENCIAS DE CONTAMINANTES, RETC:
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1050536>
- Ministerio del Medio Ambiente. (14 de mayo de 2015). *Hoy, 36 países utilizan REP como instrumento de gestión de residuos*. <https://mma.gob.cl/hoy-36-paises-utilizan-rep-como-instrumento-de-gestion-de-residuos/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (01 de junio de 2016). *Biblioteca del Congreso Nacional*. LEY 20920 Firma electrónica ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE:
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>
- Ministerio del Medio Ambiente. (1 de diciembre de 2020). *Economía Circular Ministerio del Medio Ambiente*. Propuesta Hoja de Ruta Nacional a la Economía Circular para un Chile sin basura 2020-2041: <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp->

- content/uploads/2020/12/Propuesta-Hoja-de-Ruta-Nacional-a-la-Economia-Circular-para-un-Chile-sin-Basura-2020-2040.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (26 de febrero de 2020). *Resolución 144 exenta Aprueba Norma básica para la implementación de modificación al reglamento del registro de emisiones y transferencias de contaminantes, RETC*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1142758>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente*. <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/06/REMA2021.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (13 de junio de 2022). *Biblioteca del Congreso Nacional*. LEY 21455 Firma electrónica LEY MARCO DE CAMBIO CLIMÁTICO: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *La ley 20.920, marco para la gestión de residuos*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/ley-rep/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Ministerio del Medio Ambiente*. Economía Circular: <https://mma.gob.cl/economia-circular/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Ministerio del Medio Ambiente*. Estructura Organizacional: <https://mma.gob.cl/estructura-organizacional/>
- Ministerio Secretaría General de La Presidencia. (09 de marzo de 1994). *Biblioteca del Congreso Nacional*. LEY 19300 APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667&idVersion=2022-06-13&idParte=9705635>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (22 de septiembre de 2005). *Biblioteca del Congreso Nacional*. DECRETO 100 FIJA EL TEXTO REFUNDIDO, COORDINADO Y SISTEMATIZADO DE LA CONSTITUCION POLITICA DE LA REPUBLICA DE CHILE: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=242302>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (13 de junio de 2022). *Biblioteca del Congreso Nacional*. LEY 19300 APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Morales Estay, P. (6 de Diciembre de 2021). *Biblioteca del Congreso Nacional*. ODS 7: Energía asequible y no contaminante: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32737/1/ODS_7_Energia_asequible_y_no_contaminante__Situacion_de_Chile_y_el_mundo.pdf
- Moseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources conservation*, 153.

- Naturgy. (5 de julio de 2022). *Naturgy y Ruralia crean la primera empresa española para el reciclaje integral de parques eólicos*.
https://www.naturgy.com/sala_de_prensa/notas_de_prensa/2s2022/naturgy_y_ruralia_crear_la_primera_empresa_espanola_para_el_reciclaje_integral_de_parques_eolicos
- Nautiyal, H., & Goel, V. (2021). Chapter 3- Sustainability assessment: Metrics and methods. *Methods in sustainability science*, 27-46.
- ODEPA. (20 de julio de 2020). ODEPA. Energías Renovables No Convencionales:
<https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/energias-renovables-no-convencionales>
- Oliveira, P. S. (2020). Use of waste collected from wind turbine blade production as an ecofriendly ingredient in mortars for civil construction. *Cleaner Production*, 9.
- OVACEN. (s.f.). OVACEN. De palas de un generador eólico a proteger bicicletas:
<https://ovacen.com/pala-aerogenerador/>
- Repowering. (s.f.). *SOLUCIONES PARA RECUPERAR VALOR DE SUS ACTIVOS DE ENERGÍA*.
https://repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores_segunda_mano/index.htm
- Revista Energía. (10 de Agosto de 2012). *Revista Energía*. (R. Energía, Editor) Energías Renovables No Convencionales (ERNC): <https://revistaenergia.com/1135/>
- Re-Wind Network. (24 de enero de 2022). *Re-Wind BladePole Paper accepted for ARCC-EAAE 2022 International Conference in Miami in March 2022*.
<https://www.re-wind.info/update/2022/1/24/re-wind-bladepole-paper-accepted-for-arcc-eaae-2022-international-conference-in-miami-in-march-2022>
- ReWind. (s.f.). *Productos re.wind*. <http://www.re-wind.es/productos.html>
- Risco Aysén. (26 de Diciembre de 2019). *riscoaysen*. Edelaysén confirmó la caída de uno de los cinco aerogeneradores que conforman el parque eólico Alto Baguales:
<https://www.riscoaysen.cl/2019/12/26/edealaysen-confirmando-la-caida-de-uno-de-los-cinco-aerogeneradores-que-conforman-el-parque-eolico-alto-baguales/>
- SEA. (s.f.). SEA. ¿Qué es el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental?:
<https://www.sea.gob.cl/evaluacion-de-impacto-ambiental/que-es-el-sistema-de-evaluacion-de-impacto-ambiental-seia>
- SEA. (s.f.). SEA. ¿Cuál es el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental?:
<https://www.sea.gob.cl/evaluacion-de-impacto-ambiental/cual-es-el-proceso-de-evaluacion-de-impacto-ambiental>

- Servicio de Evaluación Ambiental. (s.f.). *Servicio de Evaluación Ambiental*.
<https://www.sea.gob.cl/sea/quienes-somos>
- Skelton, K. (2017). *Discussion paper on managing composite blade waste*. WindEurope.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22748.90248>
- Sostenible o Sustentable. (s.f.). *Las 9 R de la Economía Circular*.
<https://sostenibleosustentable.com/es/economia-verde/9-r-de-la-economia-circular/>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (s.f.). *Superintendencia del Medio Ambiente*.
<https://portal.sma.gob.cl/index.php/que-es-la-sma/>
- Total HSE. (s.f.). *recursos total HSE*. Global Wind Organisation BLADE REPAIR 1
Partes de la Pala: https://recursos.totalhse.com/AFUVI/manuales/br_1.pdf
- Tribunal Ambiental. (s.f.). *Tribunal Ambiental*. <https://tribunalambiental.cl/quienes-somos/>
- Tribunal Ambiental. (s.f.). *Tribunal Ambiental*. <https://tribunalambiental.cl/informacion-institucional/que-hace-el-tribunal/funciones-y-competencia/>
- Unidad Gestión de Información División Energías Sostenibles. (Diciembre de 2021).
Ministerio de Energía. Retrieved 17 de junio de 2022, from Identificación y
Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021:
https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/mine-2021_identificacion_y_cuantificacion_de_potenciales_de_energias_renovables_v2.pdf
- Valentin Sommer, G. W. (2020). Recycling and recovery infrastructures for glass and carbon fiber reinforced plastic waste from wind energy industry: A European case study. *Elsevier, ScienceDirect*, 11.
- WindEurope. (mayo de 2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity.
<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>
- WindEurope. (2020). *How to build a circular economy for wind turbine blades through policy and partnerships*. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/WindEurope-position-paper-how-to-build-a-circular-economy.pdf>

XV. ANEXOS

- Anexo 1- Base de Datos