



**Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental**

**Estrategia para la Gestión de los residuos asociados a los
Pasivos
Ambientales por Aero generación eléctrica en Chile**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: Cristian Eduardo Zambrano Zambrano
PROFESOR GUÍA: María Lorena Álvarez Sánchez**

VALPARAÍSO, 2020

Dedicatoria y Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico a mis compañeros y amigos de la carrea que siempre estuvieron apoyándome ya sea con una conversación, algún compartir en los almuerzos, realizando trabajos y carreteando también. A la profesora Lorena que me acepto como su alumno tesista, muchas gracias por su tiempo y paciencia (sobre todo paciencia).

Gracias a mis amigos de Talca que también han estado en este proceso largo, que por mucho que no compartiéramos el día a día de forma física, la conversaciones y los apoyos si se sentían y se agradecen.

Una especial dedicatoria a mi familia que han estado apoyando incondicionalmente desde el minuto cero, recibíendome en sus casas, dándome una buena comida, risas y motivación para poder sacar la carrea adelante.

A mis hermanos que me entraron conocimientos y me dieron la confianza para salir de casa e ir a estudiar a una ciudad desconocida, los quiero mucho.

A mis padres y en especial a mi mamá que está viéndome desde el cielo, todo el esfuerzo, todos los malos ratos, todas las fiestas a las que no pude ir y momentos que me perdí, valieron la pena y aquí esta la conclusión de todo eso. Muchas gracias por su confianza.

Y también porque no, esto me lo dedico a mí, por todo el esfuerzo que le puse para sacar adelante la carrera y no caer en el intento, costo pero se logro.

RESUMEN

Desde el inicio de los tiempos el ser humano ha utilizado la energía eólica para realizar distintas labores como transportarse de personas y cargas a través de barcos, la extracción de agua para regar los campos, la generación de energía eléctrica con aerogeneradores, entre otros; es en la generación de electricidad a través de las turbinas eólicas donde la humanidad ha puesto sus esfuerzos últimamente y Chile no se ha quedado atrás en esta materia mediante la instalación de alrededor de 593 aerogeneradores distribuidos en distintos parques eólicos a lo largo del país, esto con la finalidad de producir electricidad con una baja o nula huella de carbono. Sin embargo, una problemática que acarrea estos equipos son los residuos generados una vez finalizados sus ciclos de vida. En el presente informe se intentó dar una respuesta a esta problemática mediante un análisis de ciclo de vida de los aerogeneradores que se encuentran en el parque eólico Canela I para estimar los residuos y huellas de carbono de sus aerogeneradores y parque en general. Además de lo anterior se realizó un análisis a la normativa nacional y fue comparada con la normativa europea en materia de residuos de turbinas eólicas, y finalmente se estimó la cantidad de residuos provenientes de todos los aerogeneradores instalados en Chile hasta la actualidad, además de un diagnóstico de las empresas a nivel nacional con capacidad de recibir los residuos de las torres eólicas. Dentro de los resultados más destacados se encuentra que el análisis de ciclo de vida realizado al parque Canela I arroja una huella de carbono de 14,311 kgCO₂ eq/kWh y un total de 1.241,9 toneladas de residuos generados por el parque eólico al cabo de los 20 años de duración nominal del proyecto. Además, uno de los impactos más relevantes que fueron identificados fue producto de los residuos de las aspas de los aerogeneradores, ya que, actualmente en Chile no existe ningún tratamiento para estos residuos terminando su vida útil en un relleno sanitario.

Se puede desprender del presente informe que Chile tiene una gran labor para poder mejorar en materia legislativa, estructural y humana para poder tratar los futuros residuos derivado de los aerogeneradores y así evitar posibles problemáticas ambientales, junto con lo anterior se entregan recomendaciones de cómo gestionar los residuos generados por las turbinas eólicas además de otras recomendaciones para poder disminuir su huella de carbono.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Relación entre el ser humano y la energía eólica.....	1
1.2 ¿Qué son las turbinas eólicas?	4
1.2.1 LUGAR DE INSTALACIÓN DE LA TURBINA	5
1.2.2 CONECTIVIDAD CON LA RED ELÉCTRICA	5
1.2.3 ORIENTACIÓN DEL EJE DE LA TURBINA.....	5
1.3 La energía eólica en Chile y en el Mundo.	8
1.3.1 Panorama Nacional	8
1.3.2 Parques eólicos a nivel nacional	10
1.4 Panorama Mundial.....	12
1.5 Análisis de ciclo de vida y su utilidad.	14
1.6 Residuos de los aerogeneradores	17
1.6.1 Hormigón.	18
1.6.2 Metal.....	18
1.6.3 Tierras raras	18
1.6.4 Cables eléctricos.....	19
1.6.5 Plásticos compuestos	19
1.6.6 Aceites.....	19
1.7 Chile y los residuos de los aerogeneradores.....	20
2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	21
3. OBJETIVOS	22
3.1 Objetivo general.....	22
3.2 Objetivos específicos	22
4. METODOLOGÍA.....	23
4.1 Metodología para el análisis de ciclo de vida.	23

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

4.2 Metodología para el análisis y comparación legislativa en materia de residuos generados por las turbinas eólicas.....	30
4.3 Metodología para el diagnóstico de las capacidades físicas y humanas del país para tratar y/o revalorizar los residuos de los aerogeneradores en Chile.	32
5. RESULTADOS	35
5.1 Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de los aerogeneradores de eje horizontal	35
5.1.1 Definición de los Objetivos y Alcance del ACV.....	35
5.1.2 Análisis del Inventario de Emisiones	38
5.1.2.1 Etapa de Operación- Mantenimiento.....	40
5.1.2.2 Etapa de Abandono	44
5.1.3 Evaluación de las Emisiones.....	49
5.1.4 Resumen de las Emisiones del ACV.....	50
5.2 Comparación de la normativa nacional e internacional	51
5.2.1 Normas referentes a la disposición o tratamiento del hormigón	51
5.2.2 Normas referentes a la disposición o tratamiento del metal de los aerogeneradores.	52
5.2.3 Normas referentes a la disposición o tratamiento de Plásticos Compuestos.....	53
5.2.4 Normas referentes a la disposición o tratamiento de las tierras raras.	54
5.2.5 Normas referentes a la disposición o tratamiento de los cables.	54
5.2.6 Normas referentes a la disposición o tratamiento de los aceites	55
5.2.7 Resumen comparativo	56
5.3 Diagnóstico de las capacidades físicas y humanas del país para tratar y/o revalorizar los residuos de los aerogeneradores en Chile.	58
5.3.1 Diagnóstico de los Residuos provenientes de los Parques Eólicos	58
5.3.2 Jerarquización de los residuos provenientes de los aerogeneradores	58
5.3.3 Empresas con posibilidad de reciclar y/o dar disposición final a los residuos de los aerogeneradores.	59

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

5.3.4 Recursos humanos disponibles en Chile para el manejo, mantención y desarme de un parque eólico.	62
5.3.5 Estrategias para la gestión de residuos provenientes de los aerogeneradores.	62
6. DISCUSIÓN.....	64
7. CONCLUSIONES	71
8. BIBLIOGRAFÍA.....	73
9. ANEXOS.....	XI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Representación de una Panémona o torre eólica de eje vertical.	1
Figura 1.2: Molino de viento tipo pedestal.	2
Figura 1.3: Molinos de viento, tipo torre, sector de la Mancha, España.	2
Figura 1.4: Portada de la revista Scientific American sobre la turbina eólica de Brush. En ella se presentaba una descripción detallada de la turbina.	3
Figura 1.5: Aerogeneradores de Savonius y Darrieus.	6
Figura 1.6: Aerogeneradores de tipo Windside y aerogenerador Giromill o tipo “H”.	6
Figura 1.7: Torre eólica de eje horizontal y sus respectivas partes.	7
Figura 1.8: Capacidad total (Onshore y Offshore) instalada de energía eólica al año 2019 alrededor del mundo.	14
Figura 1.9: Ejemplos de etiquetas ecológicas que utilizan el ACV para establecer sus criterios.	16
Figura 1.10: Fases del análisis del ciclo de vida.	17
Figura 4.1: Diagrama resumen del paso a paso de la presente metodología.	31
Figura 4.2: Jerarquización para el manejo de los residuos.	33
Figura 4.3: Resumen de la presente metodología.	34
Figura 5.1 . Mapa con la distribución del parque eólico Canela I, se aprecian las 11 torres del proyecto, la Ruta 5 Norte, entre otros hitos.	37
Figura 5.2 . Ruta de transporte diario de los trabajadores desde Huentelauquen hasta el parque eólico Canela I.	39
Figura 5.3 . Recorrido entre el parque eólico Canela I y el vertedero Quebrada de Gallo.	39
Figura 5.4 . Diagrama general del sistema que está dividido en dos subsistemas, los cuales son la etapa de Uso y la de Cierre y Abandono.	40
Figura 5.5 . Diagrama de las entradas y salidas de masa que pasan por el subsistema de la etapa “uso y mantención” durante los 20 años de duración del proyecto.	41
Figura 5.6 . Emisiones consideradas en el subsistema de “Etapa de uso y reparaciones” durante los 20 años de duración del proyecto.	43

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

Figura 5.7 . Diagrama de flujo de materia para el subsistema de la etapa de cierre y abandono del parque eólico Canela I.....	45
Figura 5.8 . Diagrama de flujo con las emisiones del subsistema la etapa de cierre y abandono.....	46
Figura 6.1 . Vertedero con partes de palas de aerogeneradores en Casper, Wyoming, Estados Unidos.....	66
Figura 6.2 Tipos de equipos Chancadores para el reciclaje del hormigón.....	68
Figura 6.3 . Cobertizo para bicicletas construido con un aspa de turbina eólica en Dinamarca	69
Figura 6.4 . Parque infantil construido con las hojas de una turbina eólica ubicado en Rotterdam.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Partes de una torre eólica numerada según la figura 1.7	8
Tabla 1.2: Matriz energética de Chile dividida por sus fuentes de energía a noviembre del año 2020.....	9
Tabla 1.3: Distribución de la capacidad instalada de energía eólica en Chile a noviembre del año 2020.....	10
Tabla 1.4: Listado de parques eólicos a nivel nacional según el portal Energía Maps _{beta} .	10
Tabla 1.5: Capacidades instaladas de los principales productores de energía eólica en el mundo en los últimos 3 años, más la nueva capacidad instalada al año 2020.....	13
Tabla 1.6: Capacidad instalada per cápita de algunos países en el mundo al año 2019 con los datos de la población extraídos del banco mundial y la capacidad instalada de la asociación empresarial eólica.	14
Tabla 1.7: Elementos químicos clasificados como tierras raras.	18
Tabla 1.8: Formas en las que se manejan los residuos de los aerogeneradores en Chile actualmente.	20
Tabla 4.1: Valores para evaluar la naturaleza del impacto.....	26
Tabla 4.2: Valores para evaluar la intensidad del impacto.	26
Tabla 4.3: Valores para evaluar la extensión del impacto.	26
Tabla 4.4: Valores para evaluar el momento del impacto.....	27
Tabla 4.5: Valores para evaluar la reversibilidad del impacto.....	27
Tabla 4.6: Valores para evaluar la persistencia del impacto.....	27
Tabla 4.7: Valores para evaluar la recuperabilidad del impacto.	27
Tabla 4.8: Valores para evaluar la acumulación del impacto.....	28
Tabla 4.9: Valores para evaluar la sinergia del impacto.	28
Tabla 4.10: Valores para evaluar el efecto del impacto.....	28
Tabla 4.11: Valores para evaluar la periodicidad del impacto.	28
Tabla 4.12: Jerarquización de impactos.....	29

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

Tabla 5.1 . Detalle de los materiales utilizados para la construcción de la torre de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.....	35
Tabla 5.2 . Detalle de los materiales utilizados para la construcción de la góndola de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.....	35
Tabla 5.3 . Detalles de los materiales utilizados para la construcción del rotor de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.....	36
Tabla 5.4 . Detalles de los materiales utilizados para la construcción de los cimientos de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.....	36
Tabla 5.5 . Coordenadas del terreno donde está ubicado el parque eólico Canela I. Datos extraídos de la DIA del proyecto CANELA I.	36
Tabla 5.6 . Balance de materia del subsistema “Etapa de Uso” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.	42
Tabla 5.7 . Emisiones que fueron consideradas para el Subsistema de “etapa de uso y mantenimiento” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.	44
Tabla 5.8 . Balance de materia del subsistema de la etapa de cierre y abandono. Se presentan las cantidades de material por unidad funcional y del total del parque tomando en cuenta los 20 años de duración nominal del proyecto.....	46
Tabla 5.9 . Emisiones consideradas para el Subsistema de “Etapa de Cierre y Abandono” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.	48
Tabla 5.10 . Emisiones producidas durante el proceso de desmontaje de las góndolas y rotores de los aerogeneradores del Parque eólico Canela I.....	48
Tabla 5.11 . Extracto de la matriz de importancia con los impactos de carácter moderado y significativo identificados en la etapa de uso.	49
Tabla 5.12 . Extracto de la matriz de importancia con los impactos de carácter moderado y significativo identificados en la etapa de cierre y abandono.....	49
Tabla 5.13 . Resumen con las emisiones de residuos sólidos considerados durante el ACV a lo largo de los 20 de duración del proyecto Canela I.....	50
Tabla 5.14 . Resumen de la huella de carbono considerada durante el ACV a lo largo de los 20 años de duración del proyecto Canela I.....	50

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

Tabla 5.15 Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del hormigón.....	51
Tabla 5.16 . Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del metal.	52
Tabla 5.17 . Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del Plástico Compuesto	53
Tabla 5.18 . Listado de normas relacionadas a la disposición o tratamiento de las tierras raras.	54
Tabla 5.19 . Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento de los cables.	54
Tabla 5.20 . Listado de normas relacionadas a la disposición o tratamiento de los aceites.	55
Tabla 5.21 . Tabla resumen de los países en base a su legislación por residuos de aerogeneradores.	57
Tabla 5.22 . Residuos producidos por una turbina eólica al cabo de los 20 años de funcionamiento.	58
Tabla 5.23 . Residuos producidos por todos los parques eólicos definidos según la CNE al cabo de los 20 años de funcionamiento.	58
Tabla 5.24 . Clasificación de los residuos derivados de los aerogeneradores, según la jerarquización del manejo de residuos aplicable.	59
Tabla 5.25 . Empresas capacitadas para el reciclaje y revalorización de los residuos metálicos.	60
Tabla 5.26 . Empresa capacitada para el reciclaje de los residuos de los cables eléctricos.	61
Tabla 5.27 . Empresas capacitadas para tratar los residuos de aceites gastados.....	61
Tabla 5.28 . Carreas identificada a nivel nacional con las competencias para administrar, mantener y desmantelar un parque eólico.	62
Tabla 5.29 . Estrategias de gestión de los residuos en base a una forma de manejo recomendada.....	63
Tabla 6.1 . Huella de Carbono del parque eólico Canela I.	64

ÍNDICE GENERAL, DE FIGURAS Y DE TABLAS

Tabla 6.2 . Huella de Carbono de distintas fuentes de generación de energía convencionales.....	65
Tabla 6.3 . Tecnologías aplicables para el reciclaje y revalorización de los residuos de las aspas de los aerogeneradores.....	70

(maderas o latas), que tiene la característica de que gira gran parte de su estructura salvo la base donde se encontraba la rueda para moler los granos. En el siglo XV se desarrolló el molino hueco para bombear agua y en el siglo XIX se usó en gran medida el molino de torre (figura 1.3) que también se utilizó para moler granos. Era una estructura rígida de piedra en la que solo se movía la cúpula para aprovechar de mejor forma las corrientes de viento.



Figura 1.2: Molino de viento tipo pedestal.
(fuente: <https://cutt.ly/2mOVmfo>)



Figura 1.3: Molinos de viento, tipo torre, sector de la Mancha, España.
(Fuente: <https://cutt.ly/Ubc7jwh>)

En el año 1887, el científico estadounidense Charles F. Brush construyó la primera turbina eólica automática para la generación de electricidad (figura 1.4). El rotor tenía un diámetro de 17 metros y 144 palas de rotor, hechas de madera de cedro. Logró funcionar durante 20 años, pero su potencia de generación era de apenas 12 kW, esto debido a que el modelo de esta turbina eólica no era muy eficiente. (Naturgy, 2021)

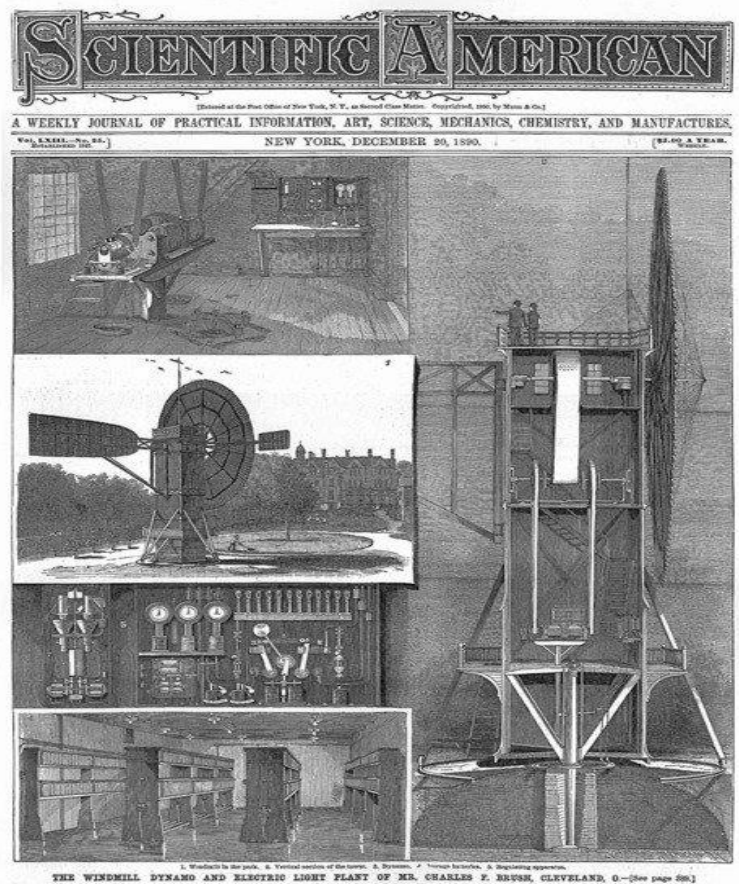


Figura 1.4: Portada de la revista Scientific American sobre la turbina eólica de Brush. En ella se presentaba una descripción detallada de la turbina.

(Fuente: <https://cutt.ly/GbveP6L>)

Más tarde en el año 1899 el científico danés Poul la Cour descubrió que las turbinas eólicas con bajo número de palas era más eficiente para la producción de energía eléctrica, debido a que a un menor número de palas mayor velocidad de rotación en comparación a la turbina de Brush.

Gracias a esto Dinamarca fue pionera en el desarrollo de la generación de energía eléctrica a través de las turbinas eólicas, lo que fomentó un modelo descentralizado de electrificación para dicho país. En 1908 había 72 generadores eólicos, con potencias que iban entre los 5 y 25 kW.

En Estados Unidos en el año 1930 se utilizaron ampliamente los molinos de viento para generar energía eléctrica debido a que el sistema de distribución no llegaba a las zonas rurales. Unos años más tarde el científico Palmer Cosslett Putnam con la ayuda de la compañía S. Morgan Smith, desarrollaron una turbina eólica con una potencia de 1,25 MW, que logró funcionar por alrededor de 1000 horas. (Mártil, 2021; Burton, *et al.*, 2001; Manwell, *et al.*, 2002; Hau, 2005)

Como se describió anteriormente la generación Eolo-eléctrica se desarrolló ampliamente durante la primera parte del siglo XX, estos avances fueron truncados debido a la primera y segunda guerra mundial, lo que dificultó el crecimiento de estas tecnologías. No fue sino hasta los años 70' donde los aerogeneradores volvieron a tomar fuerza debido a la crisis mundial del petróleo. (Manwell, *et al.*, 2002)

La energía eólica en sí se obtiene de las corrientes de viento aprovechando la energía cinética acumulada dentro de las masas de aire que se mueven a gran velocidad, pero, el viento es un recurso esencialmente variable y dependiente de muchos factores. Para poder utilizar y aprovechar la energía eólica de la forma más eficiente hay que tomar en cuenta las velocidades medias, ráfagas, direcciones dominantes de los vientos y eventuales obstáculos para seleccionar los lugares de emplazamiento como las características del aerogenerador a utilizar (Moragues, *et al.*, 2003).

1.2 ¿Qué son las turbinas eólicas?

Según la empresa energética acciona, a través de su portal de internet y el portal científico "textoscientificos", definen las turbinas eólicas como turbomáquinas que convierten la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica o en su defecto puede ser aprovechada para moler granos o bombear agua. Las turbinas eólicas se agrupan en parques o centrales eólicas para generar energía eléctrica y estos parques se pueden clasificar en base a 3 criterios generales:

- Lugar de instalación de las turbinas.
- Conectividad a la red.
- Orientación del eje de la turbina.

1.2.1 LUGAR DE INSTALACIÓN DE LA TURBINA

El lugar de emplazamiento de las turbinas eólicas puede ser en tierra firme (onshore) o en mar (offshore) de un país. Actualmente Chile solo tiene parques eólicos instalados en tierra firme, porque para poder instalar turbinas eólicas en el mar se debe mantener una distancia mínima de 10 kilómetros desde la costa hacia mar adentro y el límite de profundidad de los cimientos desde un punto de vista económico no debe ser superior a 30 metros (Creus Sole, 2014), y Chile no cumple con este último requisito, ya que, el promedio de profundidad de las costas chilenas va entre los 40 a 200 metros (Rovira. *et al.*, 2016). Además de esto José Escobar, presidente de la Asociación Chilena de Energías Renovables (ACERA), en una entrevista realizada el 16 de enero del 2020 dijo: “la tecnología offshore es carísima, porque se deben hacer fundaciones en el océano. Para aplicarla en Chile tendrían que construirse fundaciones muy profundas debido a la abrupta pendiente de la costa chilena”. Es por esta serie de razones que la tecnología offshore no se ha instalado en Chile.

1.2.2 CONECTIVIDAD CON LA RED ELÉCTRICA

En cuanto a la conectividad, se pueden clasificar de 2 maneras, las centrales eólicas con conectividad a la red de transmisión eléctrica y las centrales eólicas que no se encuentran conectadas a la red eléctrica. Las primeras son centrales de gran envergadura y que pueden producir grandes cantidades de electricidad para poder abastecer al sistema eléctrico nacional (para el caso de Chile), en cambio las centrales eólicas fuera de la red son de menor producción energética y se utilizan para entregar electricidad a pequeños poblados o empresas que no requieran una gran cantidad de energía eléctrica.

1.2.3 ORIENTACIÓN DEL EJE DE LA TURBINA

Según lo descrito por Juan Antezana en el 2004, las turbinas de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento y a trabajar con bajas velocidades de este (alrededor de 200 revoluciones por minuto). Se caracterizan por tener altos torques de partida (a excepción de la turbina de Darrieus), de fácil reparación ya que todos los transformadores se encuentran a nivel del suelo, pero una de las grandes desventajas es

que su rotor se encuentra a baja altura y las velocidades del viento son más bajas a medida que se llega al suelo. Es por este motivo que estos aerogeneradores no se utilizan en parques eólicos para producir grandes cantidades de energía (sus potencias van desde los 200 W a los 4 MW), aunque sí pueden ser eficientes para producir energía eléctrica a nivel local, ya sea para un domicilio o para electrificar el alumbrado público de una población.

Dentro de este tipo de aerogeneradores podemos encontrar 4 tipos distintos (figura 1.5), los cuales son: Aerogenerador de tipo Savonius, aerogenerador tipo Darrieus, aerogenerador tipo Giromill y aerogenerador tipo Windside.



Figura 1.5: Aerogeneradores de Savonius y Darrieus.
(Fuente: <https://cutt.ly/MndjzbzS>)



Figura 1.6: Aerogeneradores de tipo Windside y aerogenerador Giromill o tipo "H".
(Fuente: <https://cutt.ly/MndjzbzS>)

Respecto a los aerogeneradores de eje horizontal, los autores Tummala y colaboradores en el año 2016, los caracterizan como un tipo de aerogeneradores tienen su eje del rotor posicionado horizontalmente y paralelo al suelo. A diferencia de los aerogeneradores de eje vertical, este tiene la capacidad de auto arranque, así como un mecanismo de orientación. Este tipo de aerogeneradores dependen mucho de las corrientes de viento, por lo tanto, sus rotores están ubicados a grandes alturas para así poder aprovechar al máximo las corrientes de viento.

Aunque los aerogeneradores de eje vertical ofrecen algunas ventajas como su fácil mantención y ser omnidireccionales, su coeficiente de potencia (eficiencia con la que el aerogenerador convierte la energía eólica en eléctrica) está por debajo que los aerogeneradores de eje horizontal (Salas, *et al.*, 2017) y por esta razón, este tipo de aerogeneradores se utilizan de manera convencional para producir energía eléctrica de forma comercial.

En una turbina eólica de eje horizontal (figura 1.7), se pueden diferenciar las siguientes partes dentro de su estructura:

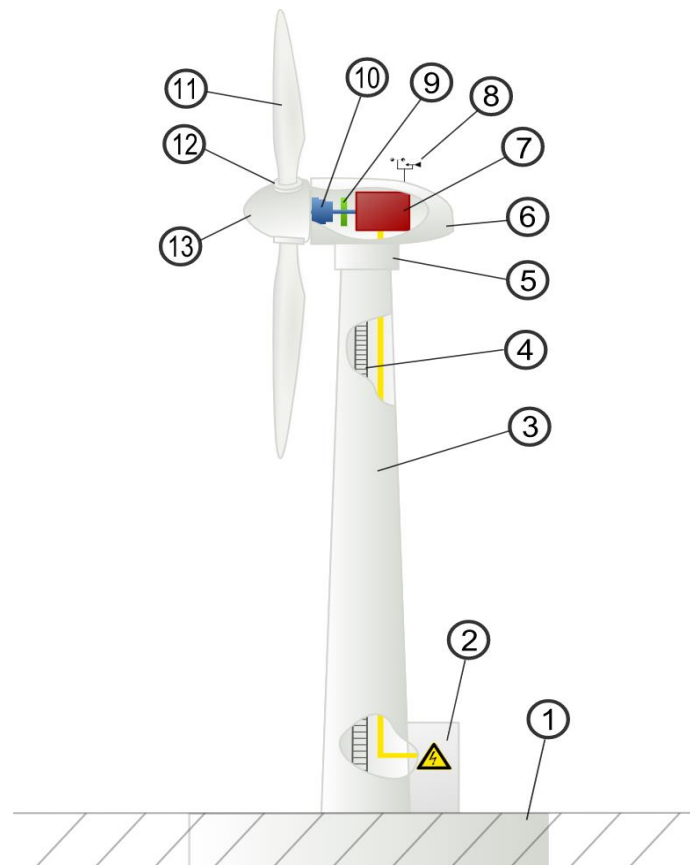


Figura 1.7: Torre eólica de eje horizontal y sus respectivas partes. (Fuente: <https://cutt.ly/cnh8HyZ>)

Tabla 1.1: Partes de una torre eólica numerada según la figura 1.7

ID	Parte de la torre eólica	Descripción
1	Cimientos	Es donde se asienta el aerogenerador y están hechos de hormigón armado y barras de acero.
2	Conexión a la red eléctrica	Permite conectar la turbina a la red eléctrica. En los parques eólicos, estos cables suelen estar bajo tierra.
3	Torre	Es la estructura física del aerogenerador y pueden tener alturas de 80 metros aproximadamente.
4	Escalera de acceso	Permite el acceso hacia la góndola y está por dentro de la torre.
5	Sistema de orientación	Permite el giro de la góndola en caso de que cambien las corrientes de viento.
6	Góndola	Se encuentra al final de la torre, almacena toda la maquinaria del aerogenerador y conecta las palas con la torre.
7	Generador	Es el componente que gira y produce la energía mecánica. también se les conoce como rotores
8	Anemómetro	Equipo meteorológico que se utiliza para medir la velocidad del viento.
9	Freno	Permite disminuir la velocidad del rotor cuando las velocidades del viento son muy altas.
10	Caja Multiplicadora	Permite multiplicar las revoluciones de giro de las palas de los aerogeneradores.
11	Pala	Son las estructuras unidas al buje y que se mueven con el viento y mueven al generador.
12	Raíz de la pala	Sección de la pala unida al buje.
13	Buje	Estructura que une las palas con el generador dentro de la góndola.

1.3 La energía eólica en Chile y en el Mundo.

1.3.1 Panorama Nacional

Según el portal educativo “aprendeconenergía.cl” a cargo del Ministerio de Educación dice que los primeros indicios de que en Chile se utilizó la energía eólica datan de las primeras décadas del siglo XX, cuando en el norte del país se usaron turbinas eólicas para bombear agua salada de la pampa que era desalinizada con energía solar.

El primer parque eólico industrial se instaló en Alto Baguales, en la cercanía de Coihaique, Región de Aysén, en noviembre de 2001. Genera 2 MW con tres rotores con capacidad nominal de 660 kW y abastece a casi 20.000 familias.

En noviembre de 2007 entró en operación el primer parque eólico unido al Sistema Interconectado Central (SIC), ubicado en la localidad de Canela, Región de Coquimbo. Este parque contó con once aerogeneradores de 1,65 MW cada uno, con una generación anual esperada de 46.000 MWh. Desde ese año en adelante surgió un boom de instalación de parques, principalmente en la costa del Norte Chico.

Según información disponible en el sitio web energiaabierta.cl al 23 de abril del 2021, la energía eólica representa un 9,29% del total de la matriz energética de Chile, lo que se traduce en 2.356,4 MW de capacidad instalada como se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Matriz energética de Chile dividida por sus fuentes de energía a noviembre del año 2020. (Fuente: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>)

Fuente de energía	Capacidad Instalada [MW]	Porcentaje de la capacidad instalada nacional
Biomasa	465,80	1,84%
Carbón	4477,80	17,6
Eólica	2356,40	9,29%
Gas Natural	3839,56	15,14%
Hidráulica de Embalse	3421,19	13,49%
Hidráulica de Pasada	2925,85	11,53%
Petróleo Diesel	3882,51	15,31%
Solar Fotovoltaica	3360,39	13,25%
Minihidráulica de Pasada	595,94	2,35%
Geotérmica	39,70	0,16%

Del total de la energía eólica instalada en Chile la mayor parte se distribuye en el sistema eléctrico nacional (SIC), que comprende desde la zona norte hasta la zona centro sur del país (desde Arica hasta la Araucanía) y una pequeña fracción se divide entre la zona sur y

zona austral (Sistema Eléctrico de Aysén y Sistema Eléctrico de Magallanes) del territorio nacional.

Tabla 1.3: Distribución de la capacidad instalada de energía eólica en Chile a noviembre del año 2020. (fuente: <https://cutt.ly/gnHmVaC>)

Sistema	Capacidad Instalada	Fracción aproximada de la capacidad instalada
Eléctrico Nacional	2.350,73	99,7%
Eléctrico de Aysén	3,12	0,2%
Eléctrico de Magallanes	2,55	0,1%

1.3.2 Parques eólicos a nivel nacional

Como se ha descrito anteriormente, la matriz energética nacional tiene una capacidad instalada de energía eólica de aproximadamente 2,4 GW a lo largo del territorio nacional lo que representa un 9,29% de la capacidad instalada total de la matriz energética chilena (tabla 1.2).

Los parques eólicos que entregan su energía al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) están conformados por aerogeneradores de eje horizontal y se encuentran a lo largo del territorio nacional *Onshore*, esto quiere decir, que las turbinas se encuentran instaladas en tierra firme y no en el mar como es el caso de los parques eólicos *Offshore*.

Según el portal a cargo de la Comisión Nacional de Energía, consultado el 10 de junio del año 2021, Chile cuenta con un total de 30 parques eólicos operativos hasta la fecha y en la tabla 1.4 se detalla la ubicación de los parques, sus capacidades instaladas y su ubicación respectiva.

Tabla 1.4: Listado de parques eólicos a nivel nacional según el portal Energía Maps^{beta}

Nombre del parque eólico	Fecha Operación	Capacidad instalada [MW]	Número de turbinas eólicas	ubicación
Alto Baguales	2001	1,98	3	Coyhaique, Aysén
Canela	2007	18,15	11	Canela, Coquimbo
Canela II	2009	60	40	Canela, Coquimbo
Eólica Lebu	2009	6,54	7	Lebu, Biobío

(continuación tabla 1.4)

Nombre del parque eólico	Fecha Operación	Capacidad instalada [MW]	Número de turbinas eólicas	Ubicación
Monte Redondo	2010	48	24	Ovalle, Coquimbo
Eólica Totoral	2010	46	23	Canela, Coquimbo
Cabo Negro	2010	2,55	3	Punta Arenas, Magallanes
Eólica Punta Colorada	2011	20	10	La Higuera, Coquimbo
Eólica Talinay Oriente	2013	90	45	Ovalle, Coquimbo
Ucuquer	2013	7,2	4	Litueche, O'Higgins
Valle los Vientos	2014	90	45	Calama, Antofagasta
Eólica Los Cururos	2014	109,6	57	Ovalle Coquimbo
Eólica Punta Palmeras	2014	45	15	Canela, Coquimbo
Ucuquer 2	2014	10,75	5	Litueche, O'Higgins
Eólica el Arrayán	2014	115	50	Ovalle, Coquimbo
Eólica San Pedro	2014	36	18	Dalcahue, Los Lagos
Eólica Cuel	2014	33	22	Los Ángeles, Biobío
Eólica Talinay Poniente	2015	60,6	32	Ovalle, Coquimbo
Eólica Taltal	2015	99	33	Taltal, Antofagasta
RAKI	2015	9	3	Lebu, Biobío
Huajache	2015	6	2	Lebu, Biobío
Eólica Lebu III	2016	5,25	5	Lebu, Biobío
Parque Eólico Renaico	2016	88	44	Renaico, La Araucanía
Eólica las Penas	2016	8,4	4	Arauco, Biobío
Alto Baguales 2	2016	1,8	2	Coyhaique, Aysén

(continuación tabla 1.4)

Nombre del parque eólico	Fecha Operación	Capacidad instalada [MW]	Número de turbinas eólicas	Ubicación
Eólica Los Buenos Aires	2016	24	12	Los Ángeles, Biobío
Eólica San Pedro II	2017	65	13	Dalcahue, Los Lagos
Parque Eólico La Esperanza	2017	10,5	5	Negrete, Biobío
Eólica San Juan	2017	193,2	56	Freirina, Atacama

1.4 Panorama Mundial

Según un reporte de prensa realizado por la WWEA (Asociación Mundial de Energía Eólica) el 24 de marzo del 2021, el mundo estableció un récord de nuevas instalaciones eólicas, sumando 93 GW de capacidad instalada en el año 2020. En este sentido, China fue el país que más aportó a este valor con 52 GW durante el año pasado lo que significó el 56% del total instalado.

Seguido a China se ubicaron Estados Unidos con 17 GW de nueva capacidad instalada (estableciendo un récord nacional), Rusia que triplicó su capacidad respecto al año 2019 (de 321 MW a 1027 MW). En tanto el mercado europeo sólo experimentó un crecimiento moderado. Todo esto se puede apreciar con más detalle en la tabla 1.5

Todos estos cambios en el mercado global de las turbinas eólicas permitieron aumentar en un 50% más el volumen de aerogeneradores respecto al año 2019. Lo que da que la capacidad instalada de todos los parques eólicos del mundo haya alcanzado el valor de 774 GW, lo suficiente para producir el 7% de la demanda mundial de electricidad. Este fuerte crecimiento fue una sorpresa para algunos expertos, ya que, varios países afirmaron de retrasos durante el año pasado debido a la interrupción de las cadenas de suministros internacionales y la falta de mano de obra.

Estos fuertes crecimientos, la falta de suministros y mano de obra se debió a la pandemia, que si bien el COVID-19 parece estar desacelerando el desarrollo en algunos países, en general no ha tenido ningún impacto negativo, más bien, parece estar acelerando los cambios a la energía eólica y a otras energías renovables.

Tabla 1.5: Capacidades instaladas de los principales productores de energía eólica en el mundo en los últimos 3 años, más la nueva capacidad instalada al año 2020.

Fuente: WWEA, 2021

País/Región	2020 [MW]	Nueva Capacidad 2020 [MW]	2019 [MW]	2018 [MW]
China	290.000	52.000	237.029	209.529
Estados Unidos	122.328	16.895	105.433	96.363
Alemania	62.784	1.427	61.357	59.313
India	38.625	1.096	37.529	35.129
España	27.446	1.638	25.808	23.494
Reino Unido	24.167	652	23.515	20.743
Francia	17.949	1.303	16.646	15.313
Brasil	18.010	2.558	15.452	14.707
Canadá	13.588	175	13.413	12.816
Italia	10.850	2.800	10.512	9.958
Turquía	9.305	1.249	8.056	7.369
Resto del Mundo	110.000	14.000	96.035	84.814
TOTAL	744.000	93.000	650.785	589.547

Si bien China es el líder mundial en la producción de energía eólica (tabla 1.5 y figura 1.8), es Alemania el país líder en la producción de esta energía por número de habitantes. En este sentido el valor per cápita entrega un dato más claro y preciso respecto a qué países están más avanzados en materia de la energía eólica. Como se aprecia en la tabla 1.6, al año 2019 Alemania se encuentra en un primer puesto de capacidad instalada de energía eólica por número de habitantes y China se encuentra solo en el cuarto puesto. Hay que destacar que estos valores son la suma de la capacidad instalada *Onshore* como *Offshore*.

Chile por su parte al año 2020 tenía una producción per cápita de 1×10^{-7} GW superando a países como Brasil, además de esto hay que resaltar el hecho de que Chile solo tiene sus parques eólicos *Onshore* lo cual igual limita su producción de energía eólica en comparación con otros países.

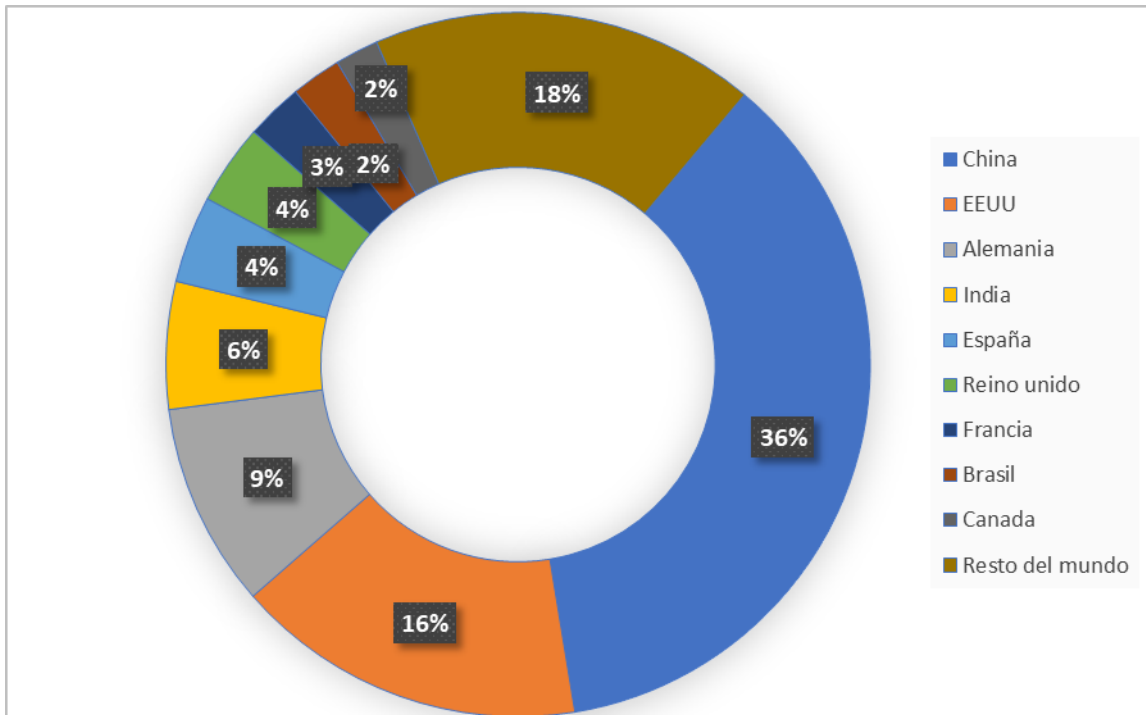


Figura 1.8: Capacidad total (Onshore y Offshore) instalada de energía eólica al año 2019 alrededor del mundo. Gráfico modificado de: <https://cutt.ly/3nOhltA>

Tabla 1.6: Capacidad instalada per cápita de algunos países en el mundo al año 2019 con los datos de la población extraídos del banco mundial y la capacidad instalada de la asociación empresarial eólica.

País	Capacidad instalada (GW)	Población al año 2019	Per cápita Energía Eólica (GW)
Alemania	61	83020000	7, E-07
España	26	46940000	6, E-07
Estados Unidos	105	328200000	3, E-07
China	236	1398000000	2, E-07
Brasil	15	211000000	7, E-08

1.5 Análisis de ciclo de vida y su utilidad.

La organización internacional para la estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la administración o gestión ambiental. Es en esta línea que han desarrollado la Norma ISO 14040 (la última

versión y la que se mantiene hasta la fecha data del año 2006), que define el análisis de ciclo de vida de la siguiente manera: “El análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

Esta herramienta de gestión ambiental permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de cada interacción ambiental. A pesar de manifestar que abarca todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos resulta difícil cubrir todas las actividades desde la “cuna a la tumba”, por lo que se debe determinar el sistema para que el producto cumpla con una determinada función.

Básicamente el ACV se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de como surgen nuevas alternativas. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados a través del producto; pero ya que éstos se seguirán fabricando, el ACV plantea manejar los residuos de forma sustentable (desde un punto de vista ambiental) minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo (Romero, B. 2003).

Además de lo anteriormente mencionado el ACV puede ayudar a la identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida, a la aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (para la planificación estratégica y el diseño y rediseño de productos o procesos), la selección de indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo las técnicas de medición, y el marketing por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental (figura 1.9) o una declaración ambiental de un producto.



Figura 1.9: Ejemplos de etiquetas ecológicas que utilizan el ACV para establecer sus criterios:
fuente: <https://cutt.ly/HnPTmu7>

El análisis de ciclo de vida consta de 4 etapas (figura 1.10) las cuales son:

Definición de objetivos y alcances: Aquí se definen los motivos por los cuales se quiere realizar el análisis de ciclo de vida (objetivos), se determina la unidad funcional del sistema y se establecen los límites de este.

Análisis de inventario: Se obtienen los datos de las entradas y salidas del sistema que fue definido anteriormente en base a la unidad funcional. Es en este punto donde se determina la carga ambiental del sistema en cuestión.

Evaluación de impactos: Fase del ACV centrada en conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales del sistema que se definió previamente a través del ciclo de vida.

Interpretación: En base a los análisis realizados en los pasos anteriores, se identifican y se evalúan las medidas de mejoramiento en base a los objetivos planteados en un inicio que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

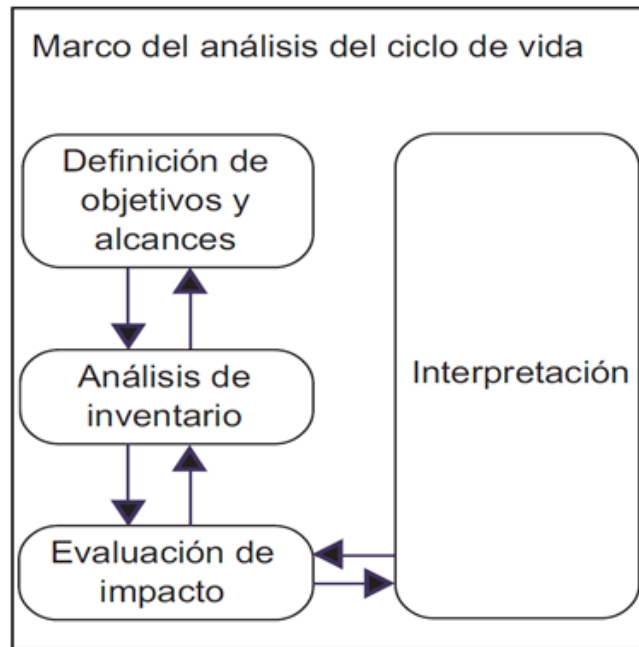


Figura 1.10: Fases del análisis del ciclo de vida. Fuente: Romero, I. (2003)

Como se aprecia en la figura 1.10, cada una de las etapas tiene flechas que las conectan de manera bidireccional, esto es porque, cada etapa puede aportar nueva información o en su defecto, nuevas ideas que permiten (por ejemplo) replantearse los objetivos que se tenían en un inicio y cambiar la idea original que se tenía, por lo tanto, se considera que cada etapa del ACV como un proceso iterativo.

1.6 Residuos de los aerogeneradores

Si bien ya se presentaron las partes y como está conformado un aerogenerador de eje horizontal dentro del apartado 1.2.3 (figura 1.7 y tabla 1.1), en esta sección se presentarán los residuos que una turbina eólica produce.

Estos residuos se han clasificado en 6 tipos: hormigón, metal, tierras raras, cables eléctricos, plásticos compuestos y aceites. Esta clasificación fue extraída desde el informe de la Organización Wind Europe, de noviembre del año 2020.

A continuación, se describirán cada uno de estos residuos, así como también, ejemplos de en qué lugares dentro de la turbina eólica se pueden encontrar.

1.6.1 Hormigón.

Según la definición extraída de Oxford Languages, el hormigón es un material de construcción formado por una mezcla de piedras pequeñas, cemento, arena y agua. El hormigón se encuentra en la parte inferior de una turbina eólica, específicamente enterrado en el suelo cumpliendo la función de cimiento en el cual se apoyará la turbina eólica. A modo de ejemplo la periodista Paula Chapple en el año 2008 realizó un reportaje del parque eólico canela I donde describía que las fundaciones de las turbinas eólicas median 16 metro de diámetro y tenían una profundidad de 3,5 metros. Además, agrego que se utilizaban entre 330 y 350 metros cúbicos de hormigón armado (mezcla de hormigón reforzado con barras de acero) por cada fundación.

1.6.2 Metal

Según el diccionario de Química general e Inorgánica del año 2007, el metal es un elemento dúctil (se pueden estirar para formar alambres) y maleables (pueden formar láminas delgadas). Presentan en general una alta conductividad térmica y eléctrica. Son sólidos a temperatura ambiente, salvo excepciones (mercurio y galio).

Este material se puede encontrar prácticamente en toda la turbina eólica, desde las fundaciones, en la torre de la turbina, en el motor del aerogenerador, por nombrar algunos.

1.6.3 Tierras raras

Según la definición extraída de Oxford Languages, las tierras raras son un conjunto de metales constituidos por el grupo de lantánidos y actínidos, a los cuales se añaden el escandio y el itrio (tabla 1.7), que se encuentran asociados en sus formas minerales y resulta muy difícil obtenerlos aisladamente en estado puro. Los imanes de neodimio-hierro-boro que son utilizados en las turbinas eólicas tienen dentro de su composición tierras raras.

Los elementos de tierras raras son los siguientes:

Tabla 1.7: Elementos químicos clasificados como tierras raras.

Nombre del elemento	Abreviación	Nombre del elemento	Abreviación
Cerio	Ce	Disproso	Dy
Erbio	Er	Europio	Eu
Gadolinio	Gd	Holmio	Ho
Lantano	La	Lutecio	Lu
Neodimio	Nd	Praseodimio	Pr
Prometio	Pm	Samario	Sm
Escandio	Sc	Terbio	Tb
Tulio	Tm	Iterbio	Yb
Itrio	Y		

1.6.4 Cables eléctricos

La empresa HHGM® define los cables eléctricos como un elemento fabricado y pensado para conducir electricidad y están constituidos principalmente por cobre, debido a su alto grado de conductividad. Los cables eléctricos se encuentran a lo largo de toda la turbina eólica y permiten transmitir la energía eléctrica producida en el aerogenerador hacia la red eléctrica a la cual se encuentra conectada dicha turbina.

1.6.5 Plásticos compuestos

Según lo descrito por un artículo del año 2016 en el blog científico “plásticosyfibras”, los plásticos compuestos son aquellos plásticos que han sido reforzados con un material adicional el cual posee propiedades particulares y que, al ser aportadas al plástico, lo enriquecen. Ambos están unidos (mezclados) y forman un todo. El material de refuerzo suele ser fibra de vidrio, fibras orgánicas, fibras sintéticas, fibras metálicas, fibras de carbono; etc.

Los productos obtenidos tienen propiedades superiores a los empleados para su fabricación. Este Material se puede encontrar en las aspas, buje y góndola del aerogenerador.

1.6.6 Aceites

Según la definición extraída del diccionario online “Oxford Languages”, los aceites son sustancia grasa de origen mineral, vegetal o animal, líquida, insoluble en agua, combustible y generalmente menos densa que el agua, que está constituida por ésteres de ácidos grasos o por hidrocarburos derivados del petróleo. El aceite se encuentra en los engranajes de la caja multiplicadora y en el rotor de la turbina eólica.

1.7 Chile y los residuos de los aerogeneradores.

Chile ha avanzado a pasos agigantados respecto a la actualización de su matriz energética para incluir energías renovables, prueba de esto, es la cantidad de capacidad instalada de energías renovables no convencionales (tabla 1.2) dentro de las cuales está incluida la energía eólica. El problema de estas nuevas energías es el tratamiento y disposición final de los residuos asociados a estas tecnologías. Prueba de esto, es que actualmente en Chile no se ha cuantificado ni analizado los residuos provenientes de los aerogeneradores y tampoco se han desarrollado leyes ni políticas para lograr estandarizar y regular el manejo de estos residuos.

A pesar de esto a nivel nacional existen los recicladores de base que están amparados por la ley del fomento de reciclaje o también conocida como “Ley REP”, que se encargan de reciclar de manera artesanal algunos residuos como lo son los cables eléctricos y los metales provenientes de cualquier fuente que logran encontrar.

A continuación, en la tabla 1.8 se presentan los residuos de los aerogeneradores y la disposición final que se realiza en Chile actualmente

Tabla 1.8: Formas en las que se manejan los residuos de los aerogeneradores en Chile actualmente. (fuente propia)

Residuo	Tipo	Reúso o tratamiento	Disposición final
Hormigón	Residuo de construcción; Residuo no peligroso	-	Sin antecedentes
Metal	Ferrosos y no ferrosos sin contacto con residuo peligroso	-	Venta como chatarra.
Plásticos compuestos	Residuo no peligroso	-	Sin antecedentes.
Tierras raras	Residuos no Peligrosos	-	Sin antecedentes.
Cables eléctricos	Residuo no peligroso	Reúso	Venta.
Aceites	Residuo peligroso	Tratamiento	El Decreto 148 de manejo de sustancias peligrosas norma la disposición de estos residuos.

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Chile es un país en vías de desarrollo que requiere grandes cantidades de energía eléctrica para seguir creciendo, dicha electricidad es generada principalmente fuentes de energías convencionales dependientes de recursos fósiles como el carbón mineral, petróleo y gas natural. En este sentido Chile ha firmado el acuerdo de Paris a fin de disminuir su huella de carbono para el año 2030; una de las principales medidas tomadas es el proceso de descarbonización de la matriz energética del país representa, entre otros, la transferencia y masificación de nuevas tecnologías basadas en fuentes de energía renovables no convencionales; una de ellas es la energía eólica. La producción de electricidad a través de centrales eólicas es una alternativa para obtener energía eléctrica no contaminante, que evita daños ambientales y que, al compararla con otras formas de producción de energía, tales como las centrales térmicas o nucleares, resulta la más cercana a la sustentabilidad (Caldera, 2000). Proyectos basados en estas nuevas tecnologías requieren entre otros de normativas, personal técnico calificado y servicios especializados para sus distintas etapas, entendiéndolas como construcción, puesta en marcha, operación y abandono. Actualmente se desconoce la real capacidad con que cuenta Chile para hacer una adecuada gestión de las externalidades ambientales específicas asociadas a este tipo de tecnologías, representando en el mediano plazo una vulnerabilidad potencialmente grave.

Es por estas razones que el presente proyecto de título busca identificar estas potenciales vulnerabilidades y plantear una estrategia de mediano plazo que permita reducir esta exposición utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida que está centrada en los aerogeneradores de eje horizontal.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Establecer lineamientos generales para una correcta gestión de los residuos asociados a la Aero-generación eléctrica.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar externalidades ambientales asociadas a las distintas etapas como la de uso/mantenimiento y etapa de abandono de proyectos de Aero-generación de energía eléctrica, mediante el análisis del ciclo de vida de los aerogeneradores de eje horizontal.
- Comparar la normativa nacional con la normativa Europea en relación a la disposición y/o tratamiento de los pasivos producidos por los aerogeneradores, con el fin de establecer diferencias en materia de economía circular.
- Establecer las necesidades físicas y humanas del país para hacerse cargo de los pasivos ambientales producidos por los aerogeneradores de eje horizontal.

4. METODOLOGÍA

4.1 Metodología para el análisis de ciclo de vida.

Esta herramienta como ya se explicó anteriormente en el apartado de la introducción consta de 4 etapas: Definición de los objetivos y alcances, análisis de inventarios de emisiones, evaluación de los impactos ambientales e interpretación de los resultados obtenidos.

Para la aplicación de esta metodología se utilizará como modelo de referencia los aerogeneradores presentes en el parque eólico Canela I, ubicado en la comuna de Canela en la región de Coquimbo.

Para el presente trabajo se utilizó la metodología descrita por la norma ISO 14040:2006 de análisis de ciclo de vida, que a continuación, se definirán en mayor detalle cada una de las etapas de esta herramienta.

1.- Definición de los objetivos y alcances

En esta primera etapa se deben identificar el o los objetivos que motivan el uso de esta herramienta, como los resultados esperados. De igual manera es importante definir los límites del sistema a analizar, ya que, un análisis de ciclo de vida completo es prácticamente imposible, debido a la gran cantidad de información necesaria, y donde muchas veces se necesitan gastar recursos económicos para obtener dicha información. Por lo tanto, se deben identificar los procesos unitarios o subsistemas que se pretenden abordar con el estudio. Cabe mencionar que también es necesario definir los límites geográficos del sistema a estudiar.

También hay que definir la unidad funcional del sistema, que hace referencia a la base de cálculo sobre la cual se realizarán los balances de materia y energía.

En el ámbito de selección de los límites del sistema, en el año 2017 Felipe Cortines en su memoria describió la siguiente clasificación de los límites:

- *Cradle-to-grave*: Incluye la cadena de producción de energía y materiales y todos los procesos desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, transporte y uso hasta llegar a la deposición final y el fin del ciclo de vida del producto.
- *Cradle-to-gate*: Incluye todos los procesos desde la extracción de la materia prima, pasando por su producción hasta llegar al producto terminado y listo para su uso. Este enfoque permite determinar los impactos ambientales de la producción del producto estudiado.

- *Gate-to-grave*: Incluye los procesos de uso y deposición final, es decir, fin del ciclo de vida del producto (todo lo que ocurre postproducción). Permite medir los impactos ambientales de un producto posterior a su producción.
- *Gate- to-gate*: Incluye los procesos de la fase de producción, permite determinar los impactos ambientales de un paso del ciclo de vida de un producto.

2.- Análisis de inventarios de emisiones

Este análisis es un balance de materia y energía del sistema, aunque de igual manera puede incluir otros parámetros (ruido, vibraciones, biodiversidad, etc.). Comprende la recopilación de los datos y la realización de los cálculos necesarios para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado:

Entradas: Son las materias primas y las fuentes de energía.

Salidas: Son las emisiones al aire, al agua y al suelo, y los productos.

El procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventarios incluye la construcción del diagrama de flujo, establecer la calidad de los datos (se requieren niveles de precisión), y recolección de los datos y cálculos de balances.

Es necesario especificar las unidades de medida (toneladas, KJ, GW), los niveles de incertidumbre de los datos y las fuentes. En el caso de los flujos energéticos, se debe identificar las cantidades de energía térmica y de combustible utilizado y el consumo eléctrico.

3.- Evaluación de los impactos ambientales

Es un proceso cuantitativo y/o cualitativo mediante el que se caracterizan y evalúan los efectos de las intervenciones medioambientales identificadas en el inventario. También pueden incluir juicios y aspectos sobre beneficios medioambientales relativos.

La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993) considera tres pasos en la evaluación de impactos:

- A. **Clasificación.** Es un paso cualitativo mediante el cual las entradas y salidas se asignan a diferentes categorías de impacto basadas en el tipo de impacto esperado sobre el ambiente.

La asignación ha de fundamentarse en el análisis científico de los procesos medioambientales relevantes y debe permitir responder la pregunta: ¿Cuáles son los impactos medioambientales esperados de cada entrada y salida del sistema?.

El propósito principal de esta actividad es describir los efectos medioambientales potenciales de las entradas y salidas, y decidir qué impactos medioambientales se consideran en la evaluación. Existen tres grandes categorías de impactos:

- Recursos Naturales
- Salud Humana
- Salud Ecológica

B. Caracterización. Es un paso cuantitativo en el que se evalúa la contribución proporcional de cada entrada y salida en la categoría de impacto que fue asignada anteriormente y se totalizan las contribuciones dentro de cada categoría. Esta caracterización debe ser fundamentada con análisis científicos de los procesos medioambientales relevantes y tiene que permitir responder a las preguntas: ¿Cuál es la contribución potencial de una entrada o salida específica a diferentes impactos medioambientales? y ¿cuál es la contribución potencial total del sistema a diferentes impactos medioambientales?.

C. Valoración. Es un paso que puede ser cualitativo o cuantitativo, y en el que se pondera la importancia relativa de los diferentes impactos medioambientales. La valoración puede no estar necesariamente fundamentada en el análisis científico, se pueden incluir valores de tipo ético, socioeconómico, etc.

Para poder clasificar, caracterizar y cuantificar se utilizará una matriz de impactos ambientales, ya que, de esta manera se podrán identificar los impactos ambientales (efecto) y relacionarlos con sus respectivos aspectos ambientales (causa).

Esta matriz consta desde la identificación de la actividad, aspecto e impacto ambiental, una valorización y el resultado de significancia. El criterio para la significancia del impacto se realiza bajo la ecuación 1.

Ecuación 1:

$$\text{Importancia} = Na * (3I + 2Ex + Mo + 2Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Mc)$$

Dónde: Na: Naturaleza del Impacto; I: Intensidad; Ex: Extensión; Mo: Momento; Rv: Reversibilidad; Pe: Persistencia; Mc: Recuperabilidad; Ac: Acumulación; Si: Sinergia; Ef: Efecto; Pr: Probabilidad.

A continuación, en una serie de tablas se detallan los criterios utilizados y cada cualidad asociada al valor designado para cada una de estas variables.

- Naturaleza (Na). Hace referencia a su carácter beneficioso (+) o perjudicial (-) respecto al estado previo, como se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores para evaluar la naturaleza del impacto.

Criterio	Valor
Positivo	+1
Negativo	-1

- Intensidad (I): Se refiere al grado de incidencia sobre el medio, en el ámbito específico en que actúa, como se observa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores para evaluar la intensidad del impacto.

Criterio	Valor
Baja	1
Media	3
Alta	5
Muy Alta	10
Total	15

- Extensión (Ex): Se refiere al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto considerado, como se observa en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Valores para evaluar la extensión del impacto.

Criterio	Valor
Baja	1
Media	3
Alta	5
Total	10

- Momento (Mo). Alude al tiempo que transcurre entre la realización de la acción y la aparición del efecto, como se observa en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valores para evaluar el momento del impacto.

Criterio	Valor
Largo Plazo	1
Medio Plazo	3
Corto Plazo	5
Inmediato	7

- Reversibilidad (Rv). Se refiere a la posibilidad de reconstruir las condiciones iniciales una vez producido el efecto, como se observa en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Valores para evaluar la reversibilidad del impacto.

Criterio	Valor
Inmediato	1
Corto Plazo	3
Medio Plazo	5
Largo Plazo	7
Irreversible	10

- Persistencia (Pe). La persistencia del impacto está ligada con el tiempo que supuestamente permanecería el efecto, a partir del inicio de la acción, como se observa en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6:Valores para evaluar la persistencia del impacto.

Criterio	Valor
Fugaz	1
Momentáneo	3
Temporal	5
Persistente	7
Permanente	10

- Recuperabilidad (Mc). Se refiere a la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales, por medio de la intervención humana, es decir mediante la aplicación de medidas correctoras o restauradoras, como se observa en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Valores para evaluar la recuperabilidad del impacto.

Criterio	Valor
Inmediata	1
Corto Plazo	3
Medio Plazo	5
Largo Plazo	7
Irrecuperable	10

- Acumulación (Ac). La acumulación implica el incremento progresivo en que se manifiesta el efecto, cuando la acción que lo genera persiste de forma continua o reiterada, como se observa en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Valores para evaluar la acumulación del impacto.

Criterio	Valor
Simple	1
Acumulativo	5

- Sinergia (Si). Se define como la acción de dos causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales. La acción puede ser no sinérgica, de sinergismo moderado o altamente sinérgica, como se observa en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Valores para evaluar la sinergia del impacto.

Criterio	Valor
Sin Sinergismo	1
Sinergismo Moderado	3
Muy Sinérgico	5

- Efecto (Ef). Muestra la relación entre la causa del impacto y su manifestación sobre el medio, como se observa en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Valores para evaluar el efecto del impacto

Criterio	Valor
Indirecto	1
Directo	5

- Periodicidad (Pr). Se refiere a la regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular), o constante en el tiempo (continuo), como se observa en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Valores para evaluar la periodicidad del impacto.

Criterio	Valor
Irregular	1
Periódico	3
Continuo	5

- Jerarquización de Impactos. En la Tabla 4.12 se detalla cómo se jerarquizó la significancia de los impactos.

Tabla 4.12: Jerarquización de impactos.

Criterio	Valor
Significativo	46 – 91
Moderado	34 – 45
No Significativo	< 33

4.- Interpretación de los resultados obtenidos en los pasos 2 y 3

Se combinan los resultados entregados en la fase 2 y 3 del ACV. La interpretación puede tomar forma de conclusión y recomendaciones (para la empresa o el productor) para la toma de decisiones, además de saber en qué fase del ciclo de vida del producto se producen las principales cargas ambientales y, por lo tanto, que puntos del sistema pueden o deben mejorarse. Todo lo anterior se consolida en un perfil del inventario de emisiones del sistema, en base a la unidad funcional determinada en el paso 1 del análisis del ciclo de vida.

4.2 Metodología para el análisis y comparación legislativa en materia de residuos generados por las turbinas eólicas.

Se realizará una revisión bibliográfica de la normativa nacional vigente en materia de tratamiento de residuos para determinar las capacidades actuales del país para hacerse cargo de los pasivos ambientales producidos por los aerogeneradores de eje horizontal desde el inicio de su etapa de operación hasta la etapa de desmantelamiento. Además de esto, también se realizará una recopilación de la legislación en materia de tratamiento de residuos vigente en los países europeos que tienen un mayor avance en materia de servicios y personal especializado para tratar los pasivos ambientales producidos por los aerogeneradores de eje horizontal.

La información que se reúna tanto de la legislación Chilena como europea se comparará para determinar el actual avance del país en materia de tratamiento de los pasivos ambientales asociados a los aerogeneradores.

El criterio de selección de los países europeos se basará en el texto guía “Decommissioning of Onshore Wind Turbines” del año 2020 a cargo de la organización Wind Europe. En dicho texto se entrega información sobre cómo realizar un desmantelamiento de las turbinas eólicas de forma más sustentable desde el punto de vista ambiental, tomando en cuenta la normativa de países clave, los cuales son: Francia, Dinamarca, Alemania, Italia, Países Bajos, España y el Reino Unido.

A continuación, se presentará un diagrama resumen de la metodología para el análisis y comparación legislativa en materia de residuos generados por las turbinas eólicas.

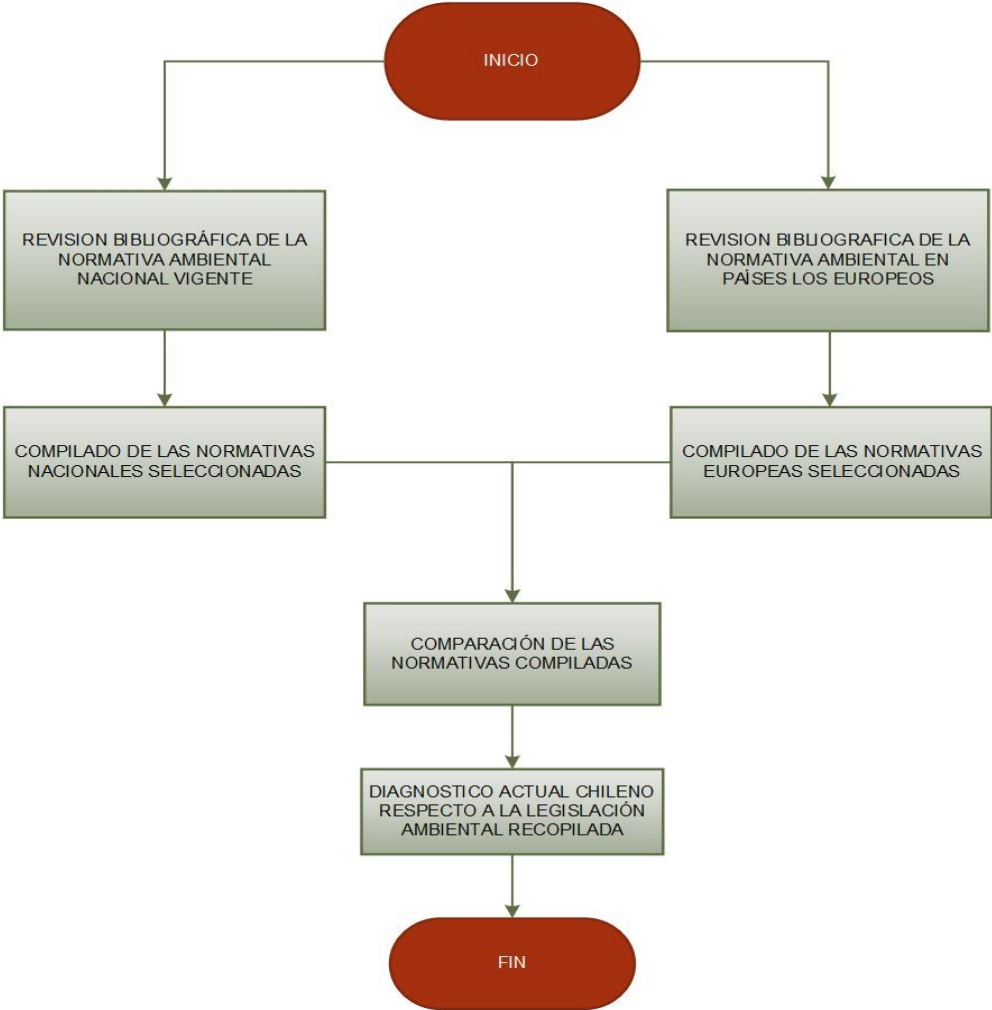


Figura 4.1: Diagrama resumen del paso a paso de la presente metodología.

4.3 Metodología para el diagnóstico de las capacidades físicas y humanas del país para tratar y/o revalorizar los residuos de los aerogeneradores en Chile.

Se realizará un diagnóstico a nivel nacional de la cantidad de residuos que serán producidos por los aerogeneradores de eje horizontal que se encuentran actualmente activos dentro de los parques eólicos.

La cantidad de aerogeneradores será estimada a través de fuentes bibliográficas del Gobierno de Chile como el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) o la Comisión Nacional de Energía (CEN) a través de sus portales de internet.

De igual manera la cantidad de residuos producidos por los aerogeneradores será determinada a través de la base de cálculo utilizada en el análisis de ciclo de vida (objetivo 1).

Una vez determinadas las cantidades de los residuos, se procederá a jerarquizar los residuos tomando en cuenta lo descrito por la ley de fomento al reciclaje, donde se orienta el orden de preferencia de manejo de residuos con cinco opciones, que considera como primera alternativa la prevención en la generación de residuos, luego la reutilización, el reciclaje de los mismos o de uno o más de sus componentes y la valorización energética de los residuos, total o parcial, dejando como última alternativa su eliminación. Esta jerarquización se aprecia de mejor manera en la figura 4.2 que muestra una pirámide invertida con las 5 formas para manejar los residuos anteriormente nombradas.

Cuando se haya jerarquizado el manejo de los residuos, se realizará un diagnóstico de las empresas que actualmente tengan las capacidades para manejar los residuos provenientes de los aerogeneradores, así como también, se llevara a cabo un análisis para determinar si existen los recursos humanos en Chile para realizar labores de manejo, mantención y desarme de los parques eólicos a través de una búsqueda de carreras tanto profesionales como técnicas en esta materia



Figura 4.2: Jerarquización para el manejo de los residuos. (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente)

A continuación, se presenta un diagrama resumen de la metodología para el diagnóstico de las capacidades físicas y humanas del país para tratar y/o revalorizar los residuos de los aerogeneradores en Chile.

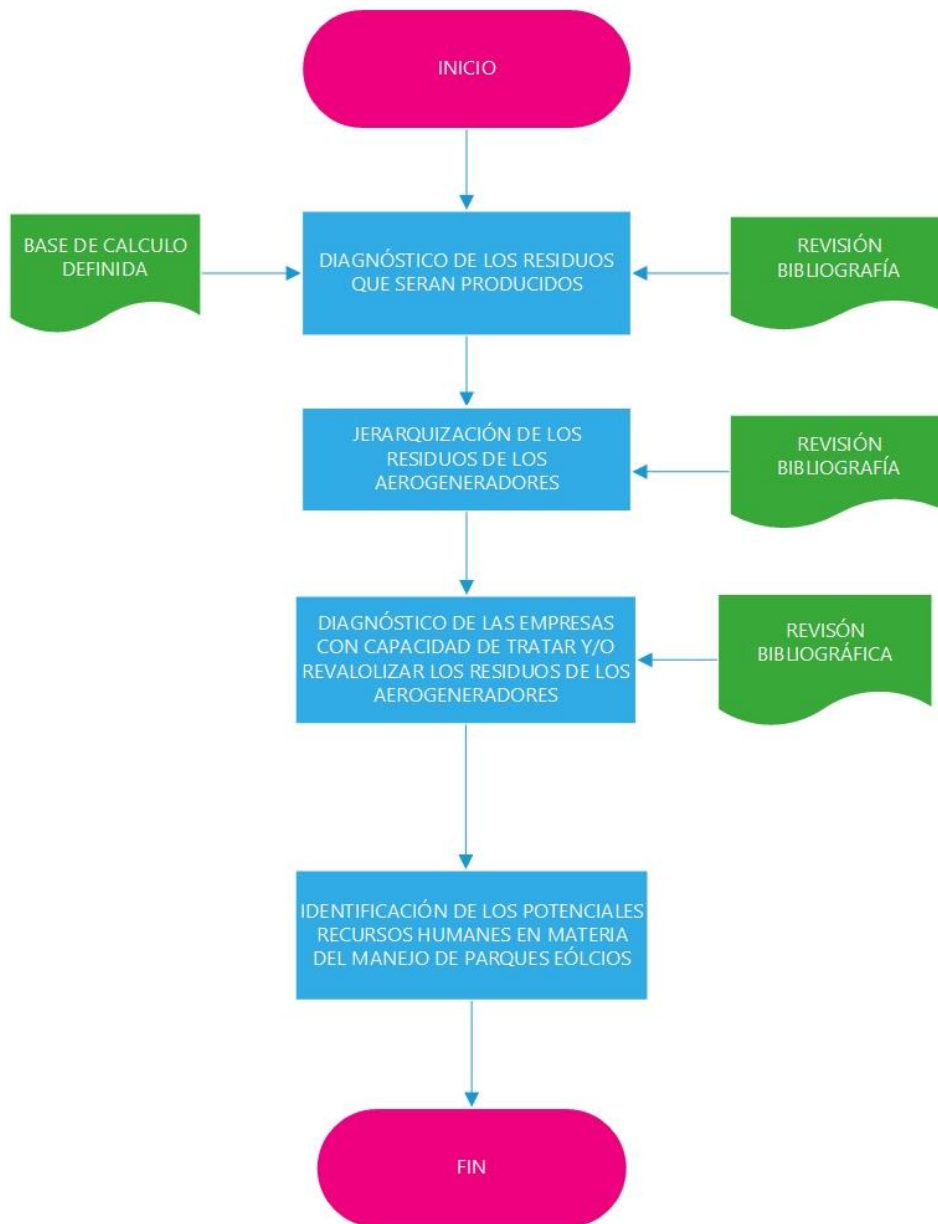


Figura 4.3: Resumen de la presente metodología

5. RESULTADOS

5.1 Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de los aerogeneradores de eje horizontal

El análisis de ciclo de vida consta de cuatro etapas que ya fueron nombradas y explicadas en el apartado de la metodología y a continuación se presentarán los resultados de cada una de dichas etapas.

5.1.1 Definición de los Objetivos y Alcance del ACV

5.1.1.1 Unidad Funcional del Sistema.

La unidad funcional es la turbina eólica tipo utilizada en el parque eólico Canela I y consiste de una turbina eólica de eje horizontal marca Vestas modelo V82/1650 con una potencia de 1650 kW y un diámetro de rotor de 82 m y con un peso total de 1061,2 Toneladas. Esta unidad funcional tiene una torre, una góndola, un rotor y los cimientos. Esta información se encuentra más detallada en el apartado 1.2.3 de la introducción. Cada una de las partes mencionadas anteriormente, poseen una composición determinada la cual se detallará a continuación a través de las tablas 5.1 hasta la tabla 5.4; dicha información se extrajo del informe del año 2006 desarrollado por la empresa Vesta denominado "Life Cycle Assessment of Electricity Produced from Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V82-1.65 MW Turbines.

Tabla 5.1. Detalle de los materiales utilizados para la construcción de la torre de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650

Material	Tipo de Residuo	Cantidad (Ton)
Acero	Metal	126,1
Aluminio	Metal	2,6
Cobre	Metal	1,3
Componentes Electrónicos	Metal	2,2
Plástico	Plástico Compuesto	2,0
Aceite	Aceites	1,0

Tabla 5.2. Detalle de los materiales utilizados para la construcción de la góndola de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.

Material	Tipo de Residuo	Cantidad (Ton)
Hierro Fundido	Metal	18,0
Acero Ingenieril	Metal	13,0
Acero Inoxidable	Metal	7,8
Acero	Metal	6,3
Cobre	Metal	1,6
Aluminio	Metal	0,5
Plástico	Plástico Compuesto	1,0
Fibra de Vidrio	Plástico Compuesto	1,8
Componentes Electrónicos	Metal	0,3
Aceite	Aceites	0,3

Tabla 5.3. Detalles de los materiales utilizados para la construcción del rotor de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.

Material	Tipo de Residuo	Cantidad (Ton)
Hierro Fundido	Metal	11,3
Acero Ingenieril	Metal	1,5
Acero	Metal	4,2
Fibra de Vidrio	Plástico Compuesto	25,2

Tabla 5.4. Detalles de los materiales utilizados para la construcción de los cimientos de una turbina eólica Vesta modelo V82/1650.

Material	Tipo de Residuo	Cantidad (Ton)
Concreto	Hormigón	805
Acero	Metal	27

5.1.1.2 Fronteras físicas del sistema.

El parque eólico seleccionado fue Canela I que está ubicado en la comuna de Canela, provincia de Choapa, Región de Coquimbo. Ubicado a un costado de la Ruta 5 Norte a 80 kilómetros de la ciudad de los Vilos. Este parque eólico fue seleccionado debido a que es uno de los parques más antiguos de Chile (año 2007) y fue el primer parque eólico a nivel nacional en suministrar su energía eléctrica al antiguo Sistema Interconectado Central (SIC), actual Sistema Eléctrico Nacional.

Las coordenadas (datum WGS-84) de los vértices aproximados del terreno donde se emplaza el parque eólico se presentan a continuación en la tabla 5.1.

Tabla 5.5. Coordenadas del terreno donde está ubicado el parque eólico Canela I. Datos extraídos de la DIA del proyecto CANELA I.

VERTICE	NORTE	ESTE
Noreste	-6.535.968	-253.043
Noroeste	-6.535.533	-249.509
Sureste	-6.535.356	-253.102
Suroeste	-6.535.292	-249.682

En la declaración de impacto ambiental del proyecto Canela I desarrollada por Endesa eco S.A. (actual ENEL), se encuentra una imagen (figura 5.1) con el detalle de la ubicación de las 11 torres eólicas, sala de control, mirador, entre otros puntos del parque eólico. Para efectos de este ACV las fronteras físicas de este sistema se considerará toda el área envuelta por la línea azul que se observa en la figura 5.1

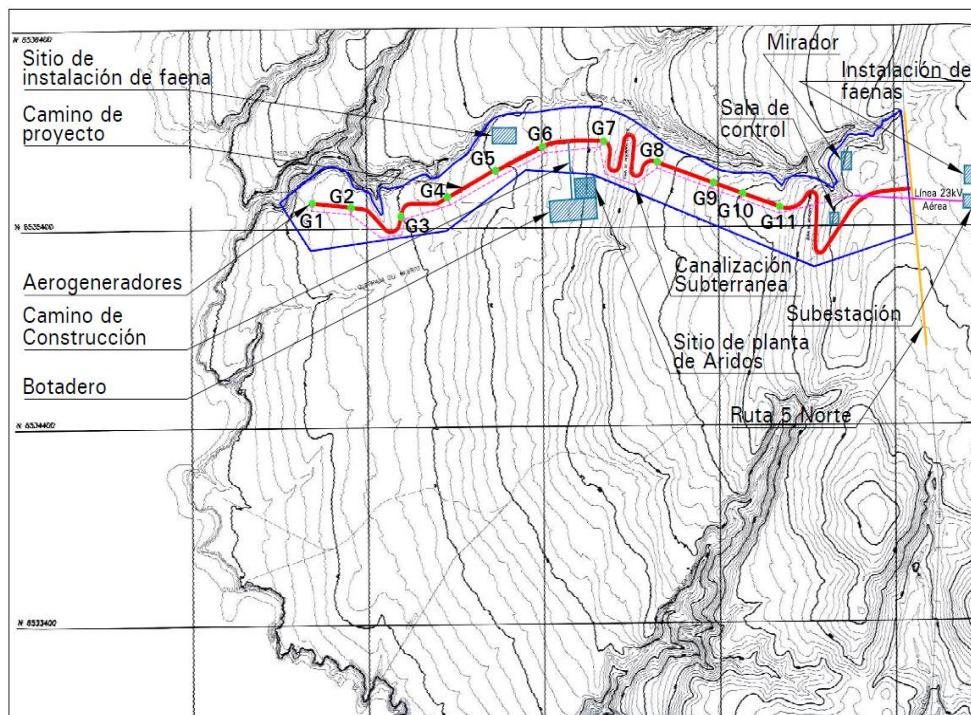


Figura 5.1. Mapa con la distribución del parque eólico Canela I, se aprecian las 11 torres del proyecto, la Ruta 5 Norte, entre otros hitos. (Fuente: ENDESA ECO. 2006)

5.1.1.3 Límites del Sistema a Analizar.

Según lo descrito por Cortines F., en el año 2017, el tipo de límite definido para el siguiente análisis de ciclo de vida será el “Gate-to-Grave” (de la puerta a la tumba), que consisten en delimitar el sistema desde el proceso de uso y operación de las turbinas eólicas de eje horizontal hasta su desarme y disposición final, esto permitirá medir los impactos ambientales de las turbinas posterior a su vida útil. Por tal motivo se tomarán en cuenta las emisiones producidas relacionadas con las reparaciones de las instalaciones, las emisiones inherentes al uso de las turbinas, emisiones relacionadas con el desarme de las turbinas eólicas y las emisiones relacionadas con el desmantelamiento de estas mismas.

5.1.1.4 Alcance temporal del estudio.

El presente análisis de ciclo de vida comprende un tiempo de 20 años, debido a que el parque eólico tiene prevista una duración preliminar de esta cantidad de años.

5.1.1.5 Alcances del ACV.

Los alcances o supuesto del análisis de ciclo de vida consisten en que durante el proceso de uso y reparación se realizaron cambios de aceite lubricantes provenientes del rotor cada 6 meses, en dichos cambios se extraerá todo este líquido para ser reemplazado por

uno nuevo. Respecto a las aspas, se consideraron el cambio de 1 aspa por turbina eólica a lo largo de los 20 años de duración del proyecto.

Para el balance de materia de este sistema se consideró que no hay materia que se disipa hacia el exterior y que la cantidad de material que entra será igual a la cantidad de material que sale; dentro de las entradas y salidas del sistema no se considerará el agua como materia y/o residuo.

Los datos presentados en el apartado del inventario de emisiones se basan en las peores condiciones posibles. En este sentido, se consideró que los residuos de aceite y metales serán enviados a Santiago y los plásticos compuestos (fibra de vidrio) serán enviados al vertedero Quebrada de Gallo, ubicado en la comuna de Canela; en esta misma línea, se consideró que una de las once torres del parque eólico debió cambiarse el casco por completo, manteniendo solo su fundación y el cableado interno.

5.1.1.6 Razones del ACV y los Resultados Esperados.

Los motivos por los cuales se utiliza esta herramienta son porque, permitirá determinar las externalidades ambientales asociadas a las etapas de uso y posterior abandono de las turbinas eólicas utilizadas en el parque eólico Canela I de una forma ordenada y objetiva. Los resultados esperados del ACV, serán la obtención de un diagnóstico preciso de la huella de carbono relacionada con las mantenciones, la huella de carbono del proceso de uso de las turbinas y los residuos peligrosos y no peligrosos producidos por una unidad funcional del parque eólico Canela I.

5.1.2 Análisis del Inventario de Emisiones

Para realizar el inventario de emisiones se ha dividido el sistema (Figura 5.4) en 2 subsistemas, lo cuales son el de etapa de operación y mantenimiento del parque eólico y el proceso de abandono del parque eólico; el primer subsistema considera la entrada de materia producto de las mantenciones programadas realizadas a las turbinas eólicas, las emisiones debido al transporte de los técnicos para realizar dichas labores de reparación durante el tiempo de duración del parque eólico y las emisiones producto del transporte diario de trabajadores desde la localidad de Huentaluquén, hasta el parque eólico (figura 5.2).

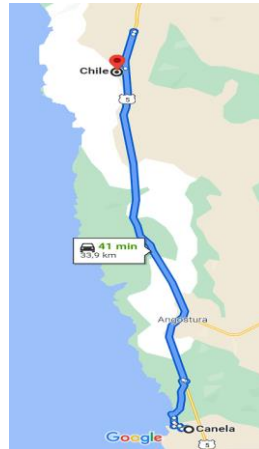


Figura 5.2. Ruta de transporte diario de los trabajadores desde Huentelauquen hasta el parque eólico Canela I.

En tanto, el subsistema de la etapa de cierre y abandono consideró las emisiones de la maquinaria y el personal asociado a este proceso, más los residuos que saldrán del sistema que provienen de la góndola y rotor, ya que, el resto de la turbina eólica (torre y fundación) permanecieron dentro del sistema y sólo se cambiaron la parte superior de la torre. Los residuos de las aspas eólicas generados a lo largo de los 20 años de duración del proyecto fueron enviados al vertedero quebrada de gallo ubicado en las cercanías del parque eólico (figura 5.3). Sumado a lo anterior, también se consideró el transporte de los residuos desde el parque eólico hasta Santiago.

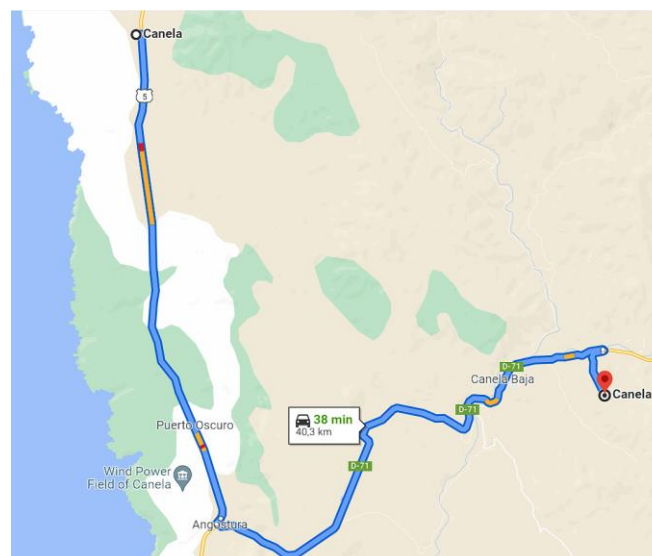


Figura 5.3. Recorrido entre el parque eólico Canela I y el vertedero Quebrada de Gallo.

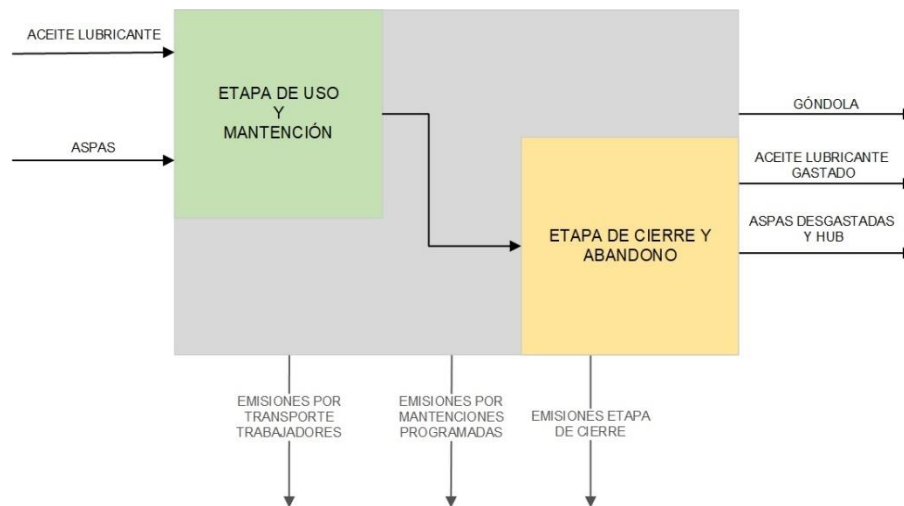


Figura 5.4. Diagrama general del sistema que está dividido en dos subsistemas, los cuales son la etapa de Uso y la de Cierre y Abandono.

5.1.2.1 Etapa de Operación- Mantenición

Según lo descrito por Ardente F. en el año 2008, se determina que durante los años de funcionamiento de un parque eólico se estima el recambio de una de las tres aspas por turbina eólica, por tal motivo se tomó en consideración que durante los 20 años de funcionamiento del parque eólico Canela I se realizaron dichos cambios a las turbinas eólicas. Sumado a lo anterior se consideraron que las mantenciones realizadas a los aerogeneradores consistieron en los cambios de aceite lubricante utilizados por los motores y cajas de cambio de los aerogeneradores cada 6 meses según lo descrito en la declaración de impactos ambientales realizada por ENDESA ECO (la actual ENEL) en el año 2006; junto con todo lo anterior se llevó a cabo el cambio del casco de una de los aerogeneradores como medida de una mantención preventiva, debido al desgaste del material (metal) de la torre.

- BALANCE DE MATERIA ETAPA DE USO Y MANTENCIÓN.

En la figura 5.5 se aprecia un diagrama con las entradas y salidas de materia del subsistema de la etapa de Uso y Mantenición.



Figura 5.5. Diagrama de las entradas y salidas de masa que pasan por el subsistema de la etapa “uso y mantención” durante los 20 años de duración del proyecto.

En la tabla 5.6 se presenta el balance de materia del subsistema de la etapa de uso y mantención en base a la unidad funcional descrita en el apartado 5.1.1.1. La cantidad de aceite que requiere una turbina eólica se extrajo de un informe desarrollado por la empresa Vesta denominado “Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines”, de aquí se desprende que la cantidad de aceite que requiere cada turbina es de 0,3 Ton. Este valor fue multiplicado por el número de mantenciones realizadas en un año (2) y multiplicado por los años de duración del parque eólico (20). Se consideró que la turbina eólica no retuvo nada del aceite lubricante y por lo tanto todo el aceite del rotor se cambió por completo.

En relación con el peso de las aspas del rotor presentado en la tabla 5.6, dicho dato se extrajo del “Life Cycle Assessment of Electricity Produced from Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V82-1.65 MW Turbines. y corroborado con la información disponible en un reportaje realizado por la Camara Chilena de la Construcción en el año 2008 denominado “PARQUE EÓLICO CANELA EL NIDO DEL VIENTO”. En ambas fuentes de información no se entrega el detalle específico de cuanto pesa cada aspa, sino que, se presenta el dato del peso total del rotor, por tal motivo se realizó una estimación lo más acertada posible del peso de cada aspa tomando en cuenta información disponible de otras turbinas eólicas de similares características.

Finalmente se incluye una columna con la cantidad de material que sale del parque. Estos valores fueron calculados multiplicando el valor de “Ton Material/F.U.” por 11 que es el número total de turbinas que componen el parque Canela I.

Tabla 5.6. Balance de materia del subsistema “Etapa de Uso” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.

Parte de la Turbina	Material	Ton material / F.U.	Ton. Material/ Parque	Tipo de Residuo
Góndola	Aceite Lubricante	12	132	Aceite
Rotor	Aspas	8,4	92,4	Plástico compuesto

- EMISIONES DE LA ETAPA DE USO Y MANTENCIÓN.

En relación con las emisiones de este subsistema (figura 5.6), se ha considerado la huella de carbono proveniente del transporte diario de los operarios del parque eólico Canela I, considerando que son un total de 5 empleados que deben ser transportados diariamente desde la localidad de Huentelauquen ubicado aproximadamente a 34 kilómetros del parque eólico. De igual forma, para los procesos de reparación de las turbinas eólicas se consideraron las emisiones por el transporte de los técnicos (se consideraron 3 técnicos) desde Santiago a La Serena en avión y de La Serena hacia Canela I por tierra a través de una van. Esta ruta se repite tanto para las mantenciones de los cambios de aceite como para los cambios de las aspas.

En cuanto a los cambios de aceite, además de los profesionales capacitados para dicha labor se consideró un camión que transporte los tambores con aceite nuevo y gastado desde la bodega de acopio temporal hasta cada una de las turbinas. Para el caso de las aspas, se consideró la situación de solicitar los repuestos a Dinamarca (país donde se desarrollaron las turbinas utilizadas en Canela I) en Barco y traerlas a Chile hasta el puerto de Coquimbo en un solo viaje, a esto hay que agregarle el transporte en camión de las aspas desde Coquimbo hasta el parque Canela I.



Figura 5.6. Emisiones consideradas en el subsistema de “Etapa de uso y reparaciones” durante los 20 años de duración del proyecto

En la tabla 5.7 se presenta un detalle de las fuentes emisoras que fueron consideradas en este subsistema, así como también las distancias recorridas por las fuentes emisoras, los factores de emisión de cada gas de efecto invernadero y el valor total en función de los kilogramos de CO₂ equivalente por unidad funcional. Los factores de emisión fueron extraídos del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA), específicamente de un reporte del año 2016 (DEFRA 2016 4th Assessment Report) y de la UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting del año 2017.

Para poder calcular los valores de la huella de carbono para el transporte de personal diario como transporte de técnicos para las distintas mantenencias, se desarrolló la siguiente ecuación:

Ecuación 2:

$$H.C.T. = \frac{[D_i * N^{\circ}P * (F.E. CO_2 + F.E. CH_4 + N_2O)] * N^{\circ}V * AP}{N^{\circ}T}$$

Donde:

H.C.T: Huella de carbono de la torre

D_i: Distancia recorrida en el viaje.

N[°]P: Número de pasajeros transportados.

F.E.: Son los factores de emisión de cada uno de los gases.

N[°]V: Número de viajes por año.

AP: Años de duración del proyecto.

N[°]T: Número de turbinas del parque eólico.

El resultado de la anterior formula entrega los kilogramos de CO₂ equivalente por unidad funcional, que es una torre eólica.

Para poder calcular la huella de carbono por el transporte de carga como el aceite, aspas y cascos de la torre eólica, se desarrolló la siguiente formula:

Ecuación 3:

$$H.C.T = Di * Pt * N^{\circ}T * (F.E.CO2 + F.E.CH4 + N2O)$$

Donde:

H.C.T: Huella de carbono de la torre

Di: Distancia recorrida.

Pt: Kilogramos transportados.

N°T: Número de turbinas.

F.E.: Factor de emisión de cada uno de los gases.

El resultado de la anterior formula entrega los kilogramos de CO₂ equivalente por unidad funcional, que es una torre eólica.

Tabla 5.7. Emisiones que fueron consideradas para el Subsistema de “etapa de uso y mantención” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.

Actividad	Fuente de Emisión	Distancia Recorrida	F.E. CO ₂	F.E. CH ₄	F.E. N ₂ O	kgCO _{2eq} /F.U.	kgCO _{2eq} /Parque
Cambio de Aceite Lubricante	Avión- Transporte Técnicos Santiago-Serena	387	0,2772	0,0001	0,0014	49,026	539,185
	Van- Transporte Técnicos Serena-Canela	176	0,0428	0,0001	0,0006	3,48	38,280
	Camión articulado promedio carga 11 Ton.	10,82	0,0855	0	0,0012	11,257	123,828
Transporte diario Trabajadores	Vehículo Particular Diesel	33,9	0,2453	0,0004	0,0034	56040,706	616447,770
Cambio de Aspas	Barco Dinamarca- Coquimbo	14608,15	3054,6952	3,3152	6,2751	376.013.755	4.136.151.302
	Camión articulado carga mayor a 33 Ton.	167	0,01402			19,667	216,340
	Avión- Transporte Técnicos Santiago-Serena	387	0,2772	0,0001	0,0014	49,026	539,185
	Van- Transporte Técnicos Serena-Canela	176	0,0428	0,0001	0,0006	3,48	38,280
	Camión articulado carga mayor a 33 Ton. Canela- Vertedero	40,3	0,01402			4,746	52,207

5.1.2.2 Etapa de Abandono

Para la etapa de cierre y abandono del proyecto se consideró que al llegar al año 20, el parque eólico Canela I no cesará su producción de energía eléctrica, sino que, se realizará un recambio de todas las góndolas y rotores de los aerogeneradores, manteniéndose así las torres y sus respectivas fundaciones.

En la figura 5.7 se presentan las entradas y salidas de materia del subsistema. Como se explicó en el apartado anterior (5.1.2.1) al presente subsistema entraran los residuos del subsistema de uso y reparaciones y nada más. En cuanto a las salidas de estos subsistemas que corresponden a las salidas del sistema inicialmente planteado, estos flujos corresponden a las góndolas del parque eólico, a los aceites lubricantes y aspas desgastados durante la vida útil nominal del parque eólico Canela I.

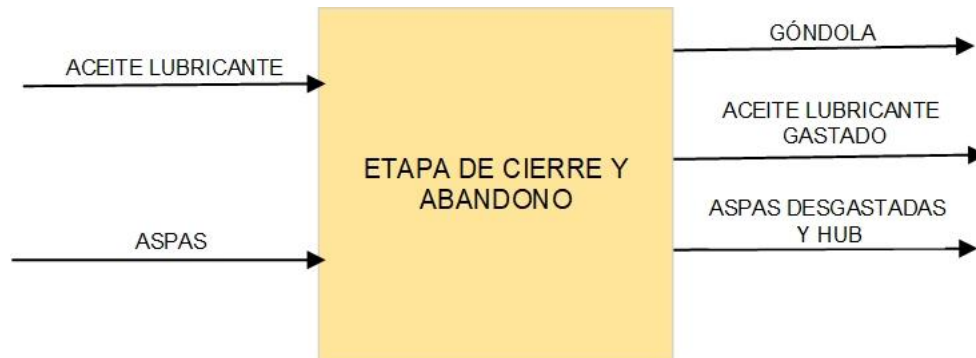


Figura 5.7. Diagrama de materia para el subsistema de la etapa de cierre y abandono del parque eólico Canela I

En la tabla 5.8 se muestra un detalle de cada uno de los residuos producidos en base a la unidad funcional y considerando las 11 turbinas eólicas (parque completo), este último valor fue calculado multiplicando el valor de “Ton Material/F.U.” por 11 que es el número total de turbinas que componen el parque Canela I. La información de la composición de la góndola y rotor fueron extraídas del informe desarrollado por la empresa Vesta denominado “Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines”.

Tabla 5.8. Balance de materia del subsistema de la etapa de cierre y abandono. Se presentan las cantidades de material por unidad funcional y del total del parque tomando en cuenta los 20 años de duración nominal del proyecto.

Parte de la Trabina	Material	Ton. material x Unidad Funcional	Ton. Material x Parque	Tipo de Residuo
Góndola	Aceite Lubricante	12,0	132	Aceite
	Hierro Fundido	18,0	198	Metal
	Acero Ingenieril	13,0	143	Metal
	Acero Inoxidable	7,8	85,8	Metal
	Acero	6,3	69,3	Metal
	Cobre	1,6	17,6	Metal
	Aluminio	0,5	5,5	Metal
	Componentes Electrónicos	0,3	3,3	Metal
	Plástico	1,0	11	Plástico compuesto
	Fibra de Vidrio	1,8	19,8	Plástico compuesto
Rotor	Aspas	33,6	369,6	Plástico compuesto
	Hierro Fundido	11,3	124,3	Metal
	Acero Ingenieril	1,5	16,5	Metal
	Acero	4,2	46,2	Metal

- EMISIONES ETAPA DE ABANDONO

Las emisiones de este subsistema (figura 5.8) corresponden a las producidas por las grúas para desmontar los rotores y góndolas, por los camiones encargados del transportar los residuos metálicos hasta Santiago, por el transporte de los residuos de aceite al lugar de tratamiento y por los camiones encargados del transporte de las aspas y otros residuos hechos de fibra de vidrio (plásticos compuestos) hasta el vertedero “Quebrada de Gallo” ubicado en la comuna de Canela. Hay que destacar que este subsistema solo considera las emisiones hasta que los residuos llegan al punto de reciclaje, lugar de tratamiento en el caso de los aceites o de abandono para el caso de las aspas (fibra de vidrio).

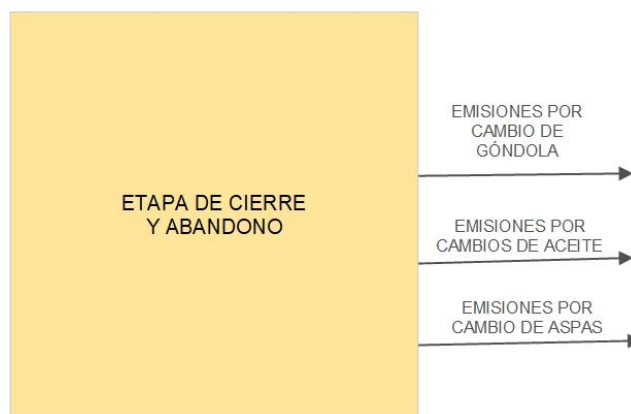


Figura 5.8. Diagrama de flujo con las emisiones del subsistema la etapa de cierre y abandono.

En la tabla 5.9 se encuentran los valores de las emisiones que fueron generadas durante las operaciones de cierre y abandono de la planta Canela I; los valores de huella de carbono por transporte de personal y transporte de carga se calcularon utilizando las ecuaciones 2 y 3 respectivamente. Se consideraron un total de 11 días para el cambio de aspas de cada una de las turbinas (un día por cada turbina), por tal motivo se calcularon las emisiones por transporte diario considerando estos días durante 1 año. Los factores de emisión fueron extraídos del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA), específicamente de un reporte del año 2016 (DEFRA 2016 4th Assessment Report) y de la UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting del año 2017, esta última fuente entregaba solo un valor de factor de emisión de CO₂, pero a su vez consideraba que el camión estuviera cargado a su máxima capacidad o no.

Respecto a las emisiones producidas por el desmontaje del rotor y de la góndola, estas fueron calculadas manualmente mediante la división de la energía utilizada por las grúas y la energía producida por la formación de la molécula de CO₂ (-393,5 KJ/mol), posteriormente este valor fue multiplicado por el peso molecular del CO₂ y de esta manera se obtuvieron las emisiones para el desmontaje del rotor y la góndola en base a la unidad funcional. Para el desmontaje del rotor se consideró que se tuvo que usar 2 grúas, una de estas sirvió de apoyo y solo soportó un cuarto del peso total del rotor (aspas más el Hub). Dichos resultados se presentan en la tabla 5.10.

Tabla 5.9. Emisiones consideradas para el Subsistema de “Etapa de Cierre y Abandono” tomando en cuenta los 20 años de duración del proyecto.

Actividad	Fuente de Emisión	Distancia recorrida KM	FE CO ₂	FE CH ₄	FE N ₂ O	kgCO _{2eq} /Parque	kgCO _{2eq} /F.U.
Transporte de la Góndola	Camión articulado carga > 33 Ton. Canela- Santiago	296	0,01402			2168,333	197,121
Cambios de Aceite Lubricante	Camión articulado promedio carga 11 Ton. Canela- Santiago	296	0,0855	0	0,0012	3387,5424	307,958
Transporte Hub	Camión articulado carga mayor a 33 Ton. Canela- Santiago	296	0,01402			423,292	70,549
Transporte Aspas	Camión articulado carga mayor a 33 Ton. Canela- Vertedero	40,3	0,01402			156,620	14,238
Transportes técnicos abandono.	Avión- Transporte Técnicos Santiago- Serena	387	0,2772	0,0001	0,0014	1617,854	147,078
	Bus Serena- Canela	176	0,027	0	0,0004	72,336	6,576
	Bus transporte diario	33,9	0,027	0	0,0004	153,262	1,267

Tabla 5.10. Emisiones producidas durante el proceso de desmontaje de las góndolas y rotores de los aerogeneradores del Parque eólico Canela I

Actividad	Fuente de Emisión	kgCO _{2eq} /Parque	kgCO _{2eq} /F.U.
Desmontaje Góndola	Grúa de 550 Ton.	110346	10031
Desmontaje Rotor	2 Grúas de 550 Ton.	115721	10520

5.1.3 Evaluación de las Emisiones

En base a las emisiones consideradas durante el análisis de ciclo de vida que se encuentran en el apartado 5.1.2, se han realizado 2 matrices de importancia para poder catalogar, valorar y caracterizar dichas emisiones. Por una cuestión de orden, en las tablas 5.11 y 5.12 se presentan extractos de las matrices que fueron realizadas y que se encuentran de forma completa en el apartado de Anexos, en dichas tablas se presentan solo los impactos de carácter moderado y significativos

Tabla 5.11. Extracto de la matriz de importancia con los impactos de carácter moderado y significativo identificados en la etapa de uso.

ID	Etapa	Actividad	Aspecto	Impacto	Importancia	Significancia
D1	ETAPA DE USO Y MANTENCIÓN	Cambio de aceite lubricante	Transporte Técnicos	Contaminación Atmosférica	-35	Moderado
D6			Generación de Residuos Peligrosos	Contaminación Atmosférica	-41	Moderado
D7				Contaminación de los cuerpos de agua	-90	Significativo
D8				Contaminación de la Tierra	-78	Significativo
D9				Impacto en el medio humano	-62	Significativo
D10			Daño ecológico	-76	Significativo	
D16		Cambios de Aspas	Transporte Aspas Nuevas	Contaminación Atmosférica	-43	Moderado
D17				Contaminación de los cuerpos de agua	-39	Moderado
D24		Transporte Diario de Trabajadores	Transporte de Personal	Contaminación Atmosférica	-37	Moderado

Tabla 5.12. Extracto de la matriz de importancia con los impactos de carácter moderado y significativo identificados en la etapa de cierre y abandono.

ID	Etapa	Actividad	Aspecto	Impacto	Importancia	Significancia
D31	ETAPA DE CIERRE Y ABANDONO	Desmontaje Góndola	Transporte Residuos Góndola hacia punto de Reciclaje	Impacto en el medio humano	41	Moderado
D32				Daño ecológico	49	Significativo
D41		Desmontaje Rotor	Transporte Residuos Hub hacia punto de Reciclaje	Impacto en el medio humano	41	Moderado
D42				Daño ecológico	49	Significativo
D45			Transporte Residuos Aspas hacia Vertedero	Contaminación de la Tierra	-49	Significativo
D46				Impacto en la salud humana	-35	Moderado
D47				Daño ecológico	-57	Significativo

5.1.4 Resumen de las Emisiones del ACV.

En el presente apartado se presenta un resumen de las emisiones de los residuos sólidos y la huella de carbono producidos a lo largo del análisis de ciclo de vida elaborado anteriormente. Los datos presentados en las tablas 5.9 y 5.10 están en base a la unidad funcional y en base al parque eólico Canela I que cuenta con un total de 11 torres eólicas, además de que estos valores están acotados a un periodo de tiempo de 20 años.

Tabla 5.13. Resumen con las emisiones de residuos sólidos considerados durante el ACV a lo largo de los 20 de duración del proyecto Canela I.

Tipo de residuo	Cantidad (Ton.)	Ton. Material/ Parque	Parte de la turbina
Aceite	12,0	132	Góndola
Metal	64,5	709,5	Góndola y Rotor
Plástico compuesto	36,4	400,4	Góndola y Rotor

Tabla 5.14. Resumen de la huella de carbono considerada durante el ACV a lo largo de los 20 años de duración del proyecto Canela I.

Etapa	Actividad	kgCO _{2eq} / F.U.	kgCO _{2eq} /Parque
Etapa de Uso y Mantenciones	Cambio de Aceite Lubricante	63,763	701,393
	Cambio de Aspa	376.013.933,9	4.136.153.273
	Transporte Diario Trabajadores	56.040,706	616.448
Etapa de Cierre y Abandono	Transporte Aspas hacia Vertedero	14,238	156,618
	Transporte Góndola hacia Reciclaje	197,121	2168,331
	Transporte Hub Planta Reciclaje	70,549	423,292
	Transporte Trabajadores	1,267	153,262
	Transporte Aceite Planta Tratamiento	307,958	3387,538
	Desmontaje Góndola	10031	110341
	Desmontaje Rotor	10520	115720
TOTAL EMISIONES		376.091.180	4.137.002.985

5.2 Comparación de la normativa nacional e internacional

Como ya se explicó y definió en el apartado 1.7 del presente trabajo, los residuos de los aerogeneradores se pueden clasificar en 6 tipos diferentes (hormigón, acero, tierras raras, plástico compuesto, cables eléctricos y aceites) y a continuación se presentan diferentes tablas con las normativas nacionales y europeas vigentes que tienen relación con la disposición o tratamiento de los residuos de los aerogeneradores.

Las normas revisadas se centran en la necesidad de ampliar la responsabilidad al productor, aumentar el reciclaje, gestionar los residuos sin poner en peligro la salud humana y no dañar el medio ambiente además de fomentar la economía circular a fin de generar un crecimiento sostenible en los países.

5.2.1 Normas referentes a la disposición o tratamiento del hormigón

Tabla 5.15 Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del hormigón.

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	-	Actualmente no se tiene un cuerpo normativo en esta materia.
Dinamarca	Ley de protección ambiental	En su artículo segundo establece que los municipios deben adoptar reglamentos sobre clasificación de desechos de construcción y edificación, asignación de desechos de construcción y demolición y notificación de las cantidades de estos.
Francia	Libro V, Título IV Residuos del código de Medio Ambiente	Los residuos de demolición deben ser caracterizados en función de si son inertes; no inertes, pero no peligrosos; o no inertes y peligrosos.
	Código de Medio Ambiente, artículo R. 515-106	Los residuos de demolición y desmantelamiento deben ser recuperados o eliminados en los sectores debidamente autorizados.
	Artículo 29 de desmontaje sección 7	Es posible dejar la parte inferior de los cimientos en el suelo según lo demuestre un estudio ambiental enviado a la autoridad competente. En su defecto los cimientos serán reemplazados con tierra con características comparables a la tierra cercana al proyecto.
Italia	D. Lgs 152/2006 y sus modificaciones	Norma medioambiental (código de habitación)
	D.M. 5/2/98	Identificación de residuos no peligrosos sometidos a procedimientos de recuperación simplificados de conformidad con los artículos 31 y 33 del Decreto legislativo núm. 22

(Continuación tabla 5.15)

País	Cuerpo normativo	Descripción
Holanda	Lap 3	El hormigón que venga de la renovación o demolición de edificios, carreteras y otras infraestructuras debe reciclarse o reutilizarse.
España	Real Decreto 105/2008	Regula la gestión de los residuos de construcción y demolición.
Reino Unido	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.
Alemania	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.

5.2.2 Normas referentes a la disposición o tratamiento del metal de los aerogeneradores.

Tabla 5.16. Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del metal.

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	-	Actualmente no se tiene un cuerpo normativo en esta materia.
Dinamarca	Ley de protección ambiental	En su artículo segundo establece que los municipios deben adoptar reglamentos sobre clasificación de desechos de construcción y edificación, asignación de desechos de construcción y demolición y notificación de las cantidades de estos.
Francia	Artículo D543-282 del código de Medio Ambiente	Los productores y poseedores de residuos de papel, metal, plástico y vidrio deberán llevar a cabo la valorización de estos residuos, ya sea de forma autónoma, a través de la transferencia de estos a una instalación de revalorización o transferirlos a un intermediario.
Alemania	UE (2008/98/EC)	El metal proveniente de las turbinas eólicas debe mantenerse separado de otras corrientes de desechos.
Italia	D. Lgs 205/2010	Adaptación y actualización del marco de residuos UE (2008/98/CE)
Holanda	Plan sectorial Lap 3 y Plan sectorial 12	Todos los metales (ferrosos y no ferrosos) deben llevarse a una planta de reciclaje.
España	Ley 22/2011 de residuos y tierras raras	En esta ley, entre otras cosas, describe que España sigue el marco normativo de residuos UE (2008/98/ EC) para metales
Reino Unido	UE (2008/98/EC)	Reino Unido sigue esta directiva desde el 2015 para el tratamiento de metales.

5.2.3 Normas referentes a la disposición o tratamiento de Plásticos Compuestos

Tabla 5.17. Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento del Plástico Compuesto

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	-	Actualmente no se tiene un cuerpo normativo en esta materia.
Francia	Decreto de 22 de junio de 2020 por el que se modifica el Decreto de 26 de agosto de 2011 relativo a las instalaciones de producción de electricidad que utilizan energía eólica mecánica [...]	<p>Establece objetivos de reciclaje para las turbinas eólicas en su conjunto, y las palas de los rotores en particular.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proponen metas de reciclajes para cumplirse de forma gradual partiendo el año 2022 exigiendo un 35% de reciclaje o reutilización de la masa del rotor para aerogeneradores ya existentes. • Al 1 de enero del 2023, el 45% de la masa del rotor debe reutilizarse o reciclarse, al cabo de este año se toman en cuenta los nuevos proyectos eólicos. • Finalmente, al 1 de enero del 2025, el 55% de la masa del rotor debe reutilizarse o reciclarse. Aquí también se considerarán los futuros proyectos eólicos.
Alemania	-	Si bien no es una ley específica para los plásticos compuestos, desde el 2009 existe una prohibición de verter directamente al ambiente residuos con Contenido Orgánico Total (COT) superior al 3%. Dado que las palas de los aerogeneradores tienen COT debido a la resina que se utiliza para pegar la fibra de vidrio, no se pueden verter las palas en vertederos.
Holanda	Plan Nacional de Gestión de Residuos. Tercera edición.	El vertido de residuos compuesta está prohibido “en primera instancia”, ya que, los operadores de parques eólicos gozan de una “exención” si las soluciones alternativas se consideran demasiado costosas
Dinamarca	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.
España	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.
Reino Unido	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.
Italia	-	No tiene cuerpo normativo en esta materia.

5.2.4 Normas referentes a la disposición o tratamiento de las tierras raras.

Tabla 5.18. Listado de normas relacionadas a la disposición o tratamiento de las tierras raras.

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	-	Actualmente no se tiene un cuerpo normativo en esta materia.
Unión Europea	-	Según la Directiva marco de residuos (2008/98/CE), los elementos de tierras raras se clasifican como no peligrosos. Hasta la fecha, no hay legislación europea o nacional específica relacionada con las tierras raras

5.2.5 Normas referentes a la disposición o tratamiento de los cables.

Tabla 5.19. Listado de las normas relacionadas a la disposición o tratamiento de los cables.

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	-	Actualmente no se tiene un cuerpo normativo en esta materia.
Unión Europea	WEEE 2012/19/EU, artículo 2 sección 4 (c)	“Esta directiva no se aplicará a los siguientes Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE): instalaciones fijas a gran escala, excepto cualquier equipo que no esté específicamente diseñado e instalado como parte de esas instalaciones.”. Según el anexo VII de la Directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) de la UE (2012/19 / UE), los cables eléctricos externos deben retirarse de cualquier RAEE recogido por separado y eliminarse o recuperarse de conformidad con la Directiva marco de residuos (2008 / 98 / CE).

5.2.6 Normas referentes a la disposición o tratamiento de los aceites

Tabla 5.20. Listado de normas relacionadas a la disposición o tratamiento de los aceites.

País	Cuerpo normativo	Descripción
Chile	Artículo 10 de la ley 20.920/2016 del Ministerio del Medio Ambiente	“Obligaciones de los generadores de residuos. Todo generador de residuos deberá entregarlos a un gestor autorizado para su tratamiento, de acuerdo con la normativa vigente, salvo que proceda a manejarlos por sí mismo en conformidad al artículo siguiente. El almacenamiento de tales residuos deberá igualmente cumplir con la normativa vigente.”
	D.S. 148/2004 del Ministerio de Salud	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo 18. Los residuos presentes en el listado que se encuentran en este artículo se considerarán peligrosos a menos que su generador pueda demostrar ante la autoridad sanitaria lo contrario. Dentro de este listado se encuentran los aceites minerales residuales no aptos para el uso al que estaban destinados • Artículo 60. “No se podrán eliminar en rellenos de seguridad los siguientes residuos peligrosos: [...] c) Aceites residuales. [...]” • Artículo 86. Las operaciones de eliminación a las que pueden someterse los residuos peligrosos serán solamente las que se señalan en el listado presente en este artículo, dentro de los cuales se incluyen los aceites que dice lo siguiente “Recuperación o reutilización de aceites usados”.
Dinamarca	UE (2008/98/EC)	Dinamarca sigue esta directiva para el tratamiento de los aceites usados. Los aceites usados se tratan principalmente mediante regeneración y/o incineración con recuperación de energía
Francia	Desde el artículo R 543-3 al R 543-15 del Código Ambiental	Se entregan las directrices de cómo se deben gestionar los aceites usados en Francia
Alemania	Ordenanza sobre aceites usados del 01-05-2002	Se entregan las directrices de cómo se deben gestionar los aceites usados en Alemania.
	Artículo 19 de la Ley Federal de Aguas	
Italia	D. Lgs 205/2010	Transpone la Directiva marco de residuos de la UE (2008/98/EC) para el tratamiento de aceites usados

(Continuación tabla 5.20)

País	Cuerpo normativo	Descripción
Holanda	Plan sectorial 56 Aceite Residual	Establece que el petróleo de las turbinas eólicas debe tratarse principalmente mediante regeneración y/o incineración con recuperación de energía.
España	Ley 22/2011 de Residuos y Tierras Contaminadas.	Transpone la Directiva marco de residuos de la UE (2008/98/EC) para el tratamiento de aceites usados
Reino Unido	Guía de prevención de la contaminación sección "Almacenamiento y eliminación seguros de aceites usados (PPG 8).	Escocia, Gales e Irlanda del Norte gestionan sus aceites usados en base a este cuerpo normativo.
	Control de la contaminación (almacenamiento de aceites) regulaciones de 2001	Inglaterra por su parte gestiona sus aceites usados mediante este cuerpo normativo que es similar al utilizado por los otros países del Reino Unido.

5.2.7 Resumen comparativo

Como se puede observar en las tablas presentadas a lo largo de la sección 5.1 la mayor parte de los países europeos tienen normado gran parte de los residuos provenientes de los aerogeneradores. En caso contrario Chile solo tiene normado uno de estos residuos en la actualidad (aceites).

A continuación, en la tabla 5.7 se presenta un resumen con los países seleccionados y sus respectivas normativas según el tipo de residuos provenientes de los aerogeneradores. Con una "X" se encuentra marcado el país que si presenta un cuerpo normativo sobre el residuo y con una "-" se encuentra el país que no presenta un cuerpo normativo sobre el residuo.

Tabla 5.21. Tabla resumen de los países en base a su legislación por residuos de aerogeneradores.

País	Hormigón	Metal	Plástico compuesto	Tierras raras	Cables eléctricos	Aceites
Chile	-	-	-	-	-	X
España	X	X	-	-	-	X
Reino Unido	-	X	-	-	-	X
Holanda	X	X	X	-	-	X
Italia	X	X	-	-	-	X
Dinamarca	X	X	-	-	-	X
Francia	X	X	X	-	-	X
Alemania	-	X	X	-	-	X

"X": presenta normativa respecto al residuo; "-": No presenta una normativa respecto al residuo

Si bien no hay legislación formal para tratar ciertos residuos, si existen buenas prácticas dentro de las empresas que trabajan con alguno de los materiales anteriormente nombrados, además de esto hay países europeos que tampoco tienen normados algunos residuos y optan por adoptar las normativas de la Unión Europea referente a dichos materiales.

5.3 Diagnóstico de las capacidades físicas y humanas del país para tratar y/o revalorizar los residuos de los aerogeneradores en Chile.

5.3.1 Diagnóstico de los Residuos provenientes de los Parques Eólicos

Tomando en cuenta los alcances y los resultados obtenidos dentro del análisis de ciclo de vida (apartado 5.1), se cuantificó la cantidad de residuos producidos por una turbina eólica (unidad funcional); esta información se presenta a continuación en la tabla 5.22:

Tabla 5.22. Residuos producidos por una turbina eólica al cabo de los 20 años de funcionamiento.

Tipo de residuo	Cantidad (Ton.)	Parte de la turbina
Aceite	12,0	Góndola
Metal	194,5	Góndola y Rotor
Plástico compuesto	25,9	Góndola y Rotor

Según la información extraída de la Comisión Nacional de Energía (CNE) a través del portal “energiaabierto.cl” y que se presentó en la tabla 1.4 del presente informe, Chile posee un total de 593 torres eólicas operativas que entregan su energía al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Dicho valor fue multiplicado por cada uno de los residuos que se observan en la tabla 5.22 dando los valores presenten en la tabla 5.23; estos valores son la cantidad total de residuos que serán generados por los parques eólicos tomando en cuenta los alcances definidos en el objetivo 1 y la información recopilada de la CNE.

Tabla 5.23. Residuos producidos por todos los parques eólicos definidos según la CNE al cabo de los 20 años de funcionamiento.

Tipo de residuo	Cantidad (Ton.)	Parte de la turbina
Aceite	7.116,0	Góndola
Metal	115.338,5	Góndola y Rotor
Plástico compuesto	15.358,7	Góndola y Rotor

5.3.2 Jerarquización de los residuos provenientes de los aerogeneradores

Para realizar la jerarquización del manejo de los residuos se tomarán en cuenta todos los desechos provenientes de una torre eólica y el manejo de estos se realizará según la normativa vigente en Chile.

Tabla 5.24. Clasificación de los residuos derivados de los aerogeneradores, según la jerarquización del manejo de residuos aplicable.

Tipo de residuo	Tipo de manejo del residuo
Metal	Reciclaje
Concreto	Eliminación
Cables Eléctricos	Reciclaje
Tierras Raras	Reciclaje
Plástico Compuesto	Eliminación
Aceite	Valorización energética- eliminación

Para los casos de los residuos de tipo metálico que son cables eléctricos, tierras raras y metales, no se encuentran normados como residuos que se deban reciclar, a pesar de esto, en Chile si son reciclados a fin de obtener un beneficio económico por parte de quien los recicla.

Respecto a los residuos del concreto, no se encontró información sobre alguna empresa que a nivel nacional o local realizará algún tipo de manejo de residuos, por lo tanto, deberá ser dispuesto en un relleno industrial; esto mismo aplica para los residuos de plásticos compuestos.

5.3.3 Empresas con posibilidad de reciclar y/o dar disposición final a los residuos de los aerogeneradores.

A continuación, se presentarán una serie de tablas con los distintos residuos provenientes de los aerogeneradores incluyendo los residuos que no fueron considerados en los alcances del análisis de ciclo de vida como lo son el hormigón, tierras raras y cables eléctricos. Las empresas seleccionadas fueron consideradas por la infraestructura y por la descripción que entregaban dentro de sus sitios a través de internet.

RESULTADOS

En la tabla 5.19 se incluyen los residuos de metales y tierras raras, estos últimos están incluidos debido a que pueden ser reciclados a través de procesos de fundición.

Tabla 5.25. Empresas capacitadas para el reciclaje y revalorización de los residuos metálicos.

Residuo	Nombre Empresa	Ubicación	Página de la Empresa
Metal y Tierras Raras	AZA Aceros Sostenibles	Panamericana Norte 18.968 Colina, Santiago; Héctor Gómez Cobo 2100, Sector Uribe, Antofagasta; Jaime Repullo 1014, Talcahuano; Calle Milano 03605 Barrio Industrial, Temuco.	https://www.aza.cl/recicladores/
	Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. (Grupo CAP)	Av. Gran Bretaña 2910, Talcahuano; Gertrudis Echeñique 220, Las Condes, Santiago.	https://www.capacero.cl/cap_acero/site/edic/base/port/sustentabilidad_medioambiente.html
	Comercial Cammar Ltda.	Avenida Balmaceda 0714 Peñaflo. Región Metropolitana.	https://www.mercantil.com/empresa/cammar-ltda/penaflo/300086844/esp/
	Sociedad Importadora y Exportadora de Aceros y Metales Ltda.	Avenida Nataniel 1473 Of. Santiago.	https://www.mercantil.com/empresa/soc-importadora-exportadora-de-aceros-y-metales-limitada/santiago/300300102/esp/
	Comercial Romerelli S.A.	Arz. Subercaseaux 4169, Estación Central; Los Yacimientos 640, Maipú; C. Panam. Norte Km 38 Manz C LT 11 N°221, Tiltill; Tucapel 1695, La Pintana; San Martín PC17 Km 297, Linares; Manuel Montt 2990, Rancagua.	https://romerelli.cl/
	CERENOR	-	https://www.genealog.cl/Geanexus/empresa/CHILE/TNzYyTwNTA0MjltNw-jTw/nombre-y-rut/CENTRO-DE-RECICLAJE-DEL-NORTE-LIMITADA-76250422-7#gsc.tab=0&gsc.q=CENTRO%20DE%20RECICLAJE%20DEL%20NORTE%20LIMITADA
	Recmetal Industrial	Sotomayor 2080, Iquique	http://www.recmetal.cl/quienes-somos/
	Metalúrgica y Mecánicas Midas Ltda.	Juan de la Fuente #834, Lampa, Región Metropolitana, Chile	https://www.midaschile.cl/

-Cables eléctricos

Tabla 5.26. Empresa capacitada para el reciclaje de los residuos de los cables eléctricos.

Material	Empresa	Ubicación	Página de la empresa
Cables eléctricos	Metalúrgica y Mecánicas Midas Ltda.	Juan de la Fuente #834, Lampa, Región Metropolitana, Chile	https://www.midaschile.cl/

-Aceite

Tabla 5.27. Empresas capacitadas para tratar los residuos de aceites gastados.

Material	Empresa	Ubicación	Página de la empresa
Aceite	VIA LIMPIA Gestión de Residuos	No la indican. Tienen operaciones desde Arica a Punta Arenas.	https://vialimpia.cl/
	INGESAT	Américo Vespucio 1245, Enea Fase II, Oficinas 2 y 8, Pudahuel, Santiago; Calle Limache 3637, El Salto, Viña del Mar.	http://www.ingesat.cl/planta-tratamiento-aceite/
	Castañeda Hnos. Ltda.	Camino Santa Margarita N°601, San Bernardo, Santiago.	https://www.industriaminera.cl/castaeda-hermanos-ltda/
	Petroquímica Futuroil Ltda.	Camino Lo Castro, Parcela N°9, Quilicura, Santiago.	http://www.futuroil.cl/
	Sociedad Recycling Instruments Ltda.	Rivas N°1026, San Miguel, Santiago.	https://recycling.cl/
	Hidronor	Ruta 5 Norte km 1396, Antofagasta; Av. Vizcaya 16907-1, Pudahuel, Santiago; Santiago Watt 4525, Parque Empresarial, Talcahuano; Ruta Cabrero-Concepción, Km. 51,6, Fundo los Radales, Copiulemu, Florida.	https://www.hidronor.cl/transporte-tratamiento-y-disposicion-final-de-residuos/

5.3.4 Recursos humanos disponibles en Chile para el manejo, mantención y desarme de un parque eólico.

A continuación se presenta la tabla 5.28, que muestra todas las carreras técnicas y profesionales a nivel nacional que capacitan a las personas para poder realizar labores de administrar, mantención y desmantelamiento de los parques eólicos. Junto con esto se ha encontrado una institución europea que imparte cursos técnicos, profesionales y de posgrado en formato online llamado “Euroinova” que esta certificada por la Unión Europea.

Tabla 5.28. Carreras identificada a nivel nacional con las competencias para administrar, mantener y desmantelar un parque eólico.

Nombre de la carrera	Institución	Modalidad	Ubicación	Link de la carrera
Técnico en generación de energía limpia	IPLACEX	Online- Presencial	Copiapó	https://www.iplacex.cl/carreras/tecnicas/tecnico-energias-renovables-2
Técnico en Energías Renovables y Eficiencia Energética	I.P. Virginio Gómez	Presencial	Concepción	https://admission.virginiogomez.cl/carreras/tecnico-en-energias-renovables-y-eficiencia-energetica/
Ingeniería de Ejecución en Energías Renovables y Sustentabilidad Ambiental	I.P. Virginio Gómez	Presencial	Concepción	https://admission.virginiogomez.cl/carreras/ingenieria-de-ejecucion-en-energias-renovables-y-sustentabilidad-ambiental/
Técnico en energías renovables	DUOC	Presencial	Región Metropolitana	https://www.duoc.cl/carreras/tecnico-energias-renovables/

5.3.5 Estrategias para la gestión de residuos provenientes de los aerogeneradores.

A continuación se presentarán la tabla 5.29 con una serie de estrategias para poder realizar el manejo de los residuos tomando en cuenta la pirámide invertida de la jerarquización de estos que se encuentra en la ley REP. Se considerará que para el cumplimiento de dichas estrategias tiene que pasar un tiempo igual o mayor a 5 años, ya que, se necesitan realizar investigación y analizar las respectivas conclusiones a las cuales se llegaron.

Tabla 5.29. Estrategias de gestión de los residuos en base a una forma de manejo recomendada. (fuente propia)

Forma de manejo de residuo	Tipo de residuo	Estrategia implementada
Prevención	Aerogenerador	Se espera que gracias a los avances tecnológicos los aerogeneradores produzcan una mayor cantidad de energía por unidad, además de disminuir su tamaño, lo cual permitiría la generación de menos residuos por parques eólicos.
Reutilización	Concreto	Estos grandes bloques de cemento reforzado pueden volver a ser utilizados, ya sea para nuevos aerogeneradores que serán instalados sobre estas fundaciones o simplemente como un refuerzo para los suelos. Hay que tener en cuenta que será necesario realizar un análisis a las fundaciones para comprobar su resistencia mecánica y de ser necesario agregar nuevo material a la estructura.
Reciclaje	Metal, cables eléctricos y tierras raras	Actualmente estos materiales ya son reciclados en Chile, pero es necesario aumentar el número de empresas que reciban este tipo de metales centrando los esfuerzos en crear estas empresas en la zona norte del país. Existe una mayor concentración de parques eólicos en esta zona y además estas empresas podrán ser aprovechadas por particulares, empresas del rubro de las minería, municipalidades, entre otros.
	Plásticos compuestos (fibra de vidrio y fibra de carbono)	Este material tiene múltiples usos como la construcción de cobertizos para bicicletas, paraderos de transporte de pasajeros, construcción de plazas de juegos, entre otras aplicaciones (se detallan en la discusión). Además de lo anterior es necesario realizar investigaciones para determinar factibilidad de este material en el rubro de la construcción de viviendas o caminos.
Valoración energética	Aceites	Se deben realizar investigaciones para determinar el poder energético de estos aceites, de forma que puedan ser utilizados como combustible. En caso de tener PCB deberán ser dispuestos de manera ambientalmente segura.

6. DISCUSIÓN

Según lo desprendido de las estimaciones realizadas en el análisis de ciclo de vida para el parque eólico Canela I se pudo determinar la huella de carbono de una turbina eólica (unidad funcional) y del parque en su totalidad por kilowatt de energía producido anualmente. Dichos valores se presentan en la tabla 6.1. Estos valores incluyen las emisiones de las etapas de operación y mantenimiento y la etapa de cierre y abandono, no obstante, hay que aclarar que dichas emisiones son de carácter indirecto, esto quiere decir, que son fuentes ajenas a las turbinas eólicas las que generan dichas emisiones.

Tabla 6.1. Huella de Carbono del parque eólico Canela I.

Fuente de energía	kgCO _{2 eq} /kWh anuales	kg CO _{2 eq} /kWh por 20 años
Una Turbina Eólica	1,301	0,769
Parque Eólico Canela I	14,311	8,455

La fuente de mayor aporte para la huella de carbono del sistema es el transporte de las aspas desde Dinamarca hasta el puerto de Coquimbo; si dicho valor se eliminara del total de las emisiones calculadas para la huella de carbono, el valor de los kilogramos de dióxido de carbono equivalente por unidad funcional disminuiría drásticamente a aproximadamente 0,0003 kgCO_{2eq}/kWh. La Wind Europe enfatiza que los residuos provenientes de las aspas pueden evitarse y/o disminuirse a través de acciones como la disminución de la masa utilizada en las aspas, disminuyendo la tasa de fallas y así extender la vida útil de las aspas (las pruebas de resistencia y las certificaciones juegan un papel importante en este punto) y también realizando correctamente las mantenciones de rutina que requieren las aspas para de esta manera alargar su vida útil el mayor tiempo posible.

Para hacer una comparación de las emisiones producidas por la generación de energía eólica con otras formas de generación de energías no convencionales, se tomó en cuenta los datos extraídos de la tesis del año 2019 titulada como “Análisis comparativo de la Huella de Carbono de Un Parque Eólico en Tenerife-España” de Paula Cortez que estimo la huella de carbono de la red eléctrica (producida por energías convencionales) de la Isla de Tenerife España, Dicha información se presenta en la tabla 6.2. Las huellas de carbono presentadas en la tabla son de primer alcance, esto quiere decir, que para la

generación de electricidad se han tenido que emitir gases de efecto invernadero al medio ambiente; además los valores mostrados solo alcanzan la etapa de uso de las fuentes energéticas durante un año.

Para la REE (Red Eléctrica de España) la generación de emisiones por el uso de tecnología eólica es nula, ya que, no se requieren de combustibles fósiles de modo directo para el funcionamiento de las turbinas eólicas.

Tabla 6.2. Huella de Carbono de distintas fuentes de generación de energía convencionales.
(Modificado de: Cortez, 2019)

Fuente de energía	kgCO ₂ eq/kWh anuales
Ciclo combinado	0,61
Motores diésel	0,53
Turbinas de gas	1,01
Turbinas Vapor	0,79

Si bien como se puede apreciar comparando las tablas 6.1 y la 6.2 la huella de carbono por concepto kilowatt de energía producido anualmente es levemente superior en la energía eólica, para las estimaciones de huella de carbono de las energías convencionales no se han considerado las emisiones indirectas que conlleva el funcionamiento de dichas centrales energéticas.

En cuanto a los resultados presentados por la matriz de importancia de la tabla 5.11, los impactos causados por la emisión de los aceites dieléctricos tienen una calificación de “significativo”, debió a que, el derrame o el mal manejo de estos si puede causar grandes daños al medio biótico y abiótico; esto se puede confirmar gracias a un trabajo de grado realizado por John Castro en el año 2014, donde dice que los aceites dieléctricos son contaminantes para el medioambiente y la salud humana durante todo el ciclo de vida del producto, donde los mayores impactos encontrados durante el ciclo de vida se presentan en las categorías de impacto como cambio climático, agotamiento de ecosistemas acuáticos marinos y toxicidad humana. La actividad de transporte diario de trabajadores tiene un impacto moderado principalmente porque tiene un carácter periódico a lo largo de los 20 años de duración del parque eólico; la actividad del transporte de los técnicos tiene un carácter de moderado, debido a las grandes distancias que deben recorrer los técnicos desde Santiago hasta el parque eólico Canela I usando medios como aviones, de forma semi periódica (2 veces por año) a lo largo de la duración del proyecto; finalmente la actividad por el transporte de nuevas aspas hasta Canela I tienen un carácter moderado a pesar de tener una alta huella de carbono por el transporte en barco de las aspas desde Dinamarca hasta Chile, esto ocurre solo una vez a lo largo de los 20 años de duración del parque eólico.

La tabla 5.12 muestra un resumen con los impactos de mayor importancia durante la etapa de cierre y a diferencia de la tabla 5.11, todos los valores con una significancia “moderada” o “significativa” tienen una naturaleza positiva, excepto por la disposición final de las aspas en los vertederos, esto es porque, todos los otros residuos podrán ser reciclados y revalorizados, lo que generara empleos nuevos, no se tendrán que extraer nuevos materiales desde el medioambiente, ya que, esa necesidad podría suplirse con los materiales reciclados provenientes de los aerogeneradores; sin embargo, los impactos causados por las aspas eólicas tienen una naturaleza negativa porque actualmente a nivel nacional no se están reciclando o tratando estos residuos terminando así en los vertederos como se aprecia en la figura 6.1. Si bien las palas de las turbinas eólicas no son especialmente tóxicas, el vertedero resultante, si se maneja incorrectamente, puede contribuir a impactos ambientales peligrosos, incluida la contaminación de la tierra y las vías fluviales (Neslen, 2021)

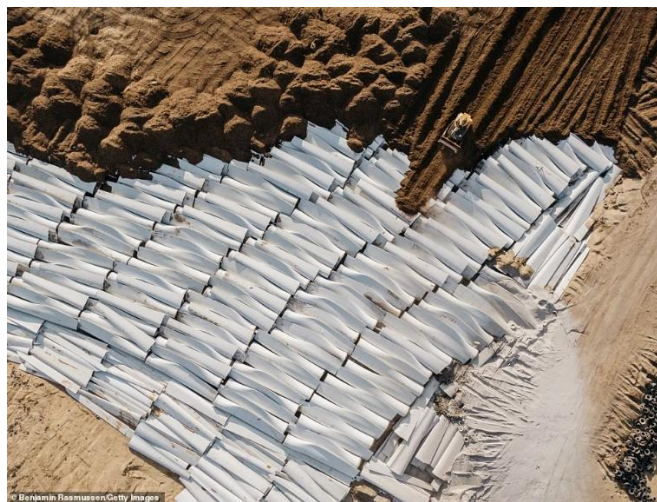


Figura 6.1. Vertedero con partes de palas de aerogeneradores en Casper, Wyoming, Estados Unidos. (fuente: <https://bit.ly/30gmVjP>)

Respecto a los supuestos planteados para la etapa de cierre de la planta Canela I, se tomó la decisión de solo extraer las góndolas y los rotores del parque eólico por razones ambientales y económicas, ya que, es ilógico invertir alrededor de 17 millones de dólares y retirar por completo el parque eólico al año 20, por tal motivo se decidió sacar solo los rotores y góndolas, debido a que en la actualidad ya hay torres eólicas con mayor capacidad de generación de energía eléctrica que las que se usaron para el parque Canela I; todo lo anterior asumiendo que las estructuras de las torres se encuentran en las óptimas condiciones para seguir operativas.

Como se pudo observar en la tabla 5.23, desde la fecha actual hasta alrededor de 20 años más se generarán una gran cantidad de residuos provenientes de los distintos parques eólicos a nivel nacional. En relación con los residuos normados en Chile actualmente, aparte de los aceites que son regulados por ser residuos peligrosos, es necesario ir aumentando los residuos que regula la ley N° 20.920 (Ley REP) a través de modificaciones e ir agilizando los procesos para que en el menor tiempo posible abordar los residuos provenientes de los aerogeneradores y de esta manera revalorizar dichos residuos, lo que a su vez generaría nuevos empleos y nuevas industrias que podrías crearse; de hecho, la organización Wind Europe, declara que entre un 85% a 90% de los materiales provenientes de los aerogeneradores son reciclables.

Actualmente la Ley REP solo contempla la recolección de envases y embalajes de residuos domiciliario de vidrio, papel y cartón, metales, plásticos y cartón para líquidos; pero es imperativo que esta ley amplie sus horizontes a residuos nuevo que puedan ir apareciendo y que comenzaran a ser una problemática a largo plazo como es el caso de la fibra de vidrio (plástico compuesto), hormigón o también conocidos como residuos de construcción, cables eléctricos que involucran a empresas del rubro energético y de telecomunicaciones, metales que no sean del tipo de embalaje y tierras raras o imanes que pueden ser incluidos dentro del grupo de los metales, ya que, uno de los procesos de revalorización de los imanes sería la fundición de estos.

En cuanto a la infraestructura que posee el país actualmente, existe capacidad para revalorizar los residuos de metales principalmente, existen plantas de tratamiento de los aceites utilizados por las turbinas eólicas, se ha encontrado información de solo una planta con capacidad de revalorizar los residuos de los cables eléctricos. En cuanto al hormigón, si bien no existe una normativa que regule este residuo, la empresa constructora “Echeverría Izquierdo” tiene buenas prácticas al reciclar parte del material de hormigón utilizado en sus diversas construcciones a modo de abaratar costos principalmente, lo que conlleva un menor impacto de sus construcciones al disminuir en parte los requerimientos de hormigón; y como se ha mencionado anteriormente, sería bueno nombrar al hormigón residual como “residuo de construcción” (como ocurre con los países europeos nombrados en el apartado 5.2), para que de esta manera se pueda normar gradualmente el reciclaje de este material.

La forma utilizada para el reciclaje de este material es a través de procesos mecánicos con equipos de chancado (figura 6.2), ya sea móviles o fijos; para el caso de las plantas eólicas será conveniente la utilización de chancadores móviles debido a que las plantas se encuentran distribuidos a lo largo del territorio nacional.



Figura 6.2 Tipos de equipos Chancadores para el reciclaje del hormigón.
(Fuente: <https://bit.ly/3q6EQEa>)

En cuanto a la fibra de vidrio o plástico compuesto, no se encontró una empresa a nivel nacional como internacional que reciclara o tratara este residuo proveniente de las aspas de los aerogeneradores, no obstante, en el año 2020 la Wind Europe desarrollo un manual que explica y entrega recomendaciones para poder revalorizar los residuos de las aspas denominado “Accelerating Wind Turbine Blade Circularity”. En dicho texto presentan ejemplos de cómo emplear las aspas residuales en otros contextos que no sean la generación de electricidad, como en la figura 6.3 donde se aprecia que utilizaron un aspa como estacionamiento de bicicletas en Dinamarca o en la figura 6.4 que se presenta un pequeño parque recreativo que fue construido con partes de las hojas de los aerogeneradores.



Figura 6.3. Cobertizo para bicicletas construido con un aspa de turbina eólica en Dinamarca.
(fuente: <https://bit.ly/3F7GTw7>)



Figura 6.4. Parque infantil construido con las hojas de una turbina eólica ubicado en Rotterdam.
(fuente: <https://bit.ly/3ET8JvG>)

A continuación, en la tabla 6.3, se presentan las 6 tecnologías presentadas en el manual Accelerating Wind Turbine Blade Circularity para poder reciclar los residuos de plástico compuesto, cada una de estas tecnologías tiene distinto grado de madurez y por lo tanto

no todas están disponibles para poder ser aplicadas a una escala industrial, esto se ve reflejado por el nivel de preparación tecnológica o TRL por sus siglas en inglés (Technology Readiness Level), que fue determinado para cada tecnología. El indicador TRL y su niveles se encuentran explicados en el apartado de anexos (9.2 Anexo-B).

Tabla 6.3. Tecnologías aplicables para el reciclaje y revalorización de los residuos de las aspas de los aerogeneradores.

Nombre de la Tecnología	Descripción	TRL
Coprocesado de Cemento	En primera instancia las palas de las turbinas se desarman y son enviadas a las plantas productoras de cemento, en estos lugares las palas son quemadas para generar energía para los hornos utilizados en la producción del cemento. Las cenizas que quedan por la quema de las palas son utilizadas como componentes para la mezcla del cemento. Aunque es muy prometedor en términos de rentabilidad y eficiencia, la fibra de vidrio desaparece y no puede volverá ser utilizada.	9
Rectificado Mecánico	Es una tecnología común de bajo costo y bajo requerimiento energético, pero disminuye en gran medida el valor de los productos reciclados que son fibra de carbono cortada y matriz molida (polvo), que pueden ser utilizadas como material de refuerzo en materiales termo plástico (en bajas cantidades) en el caso de la fibra cortada y como material de relleno en caso de la matriz molida. Esta tecnología debe mejorarse ya que, las fibras utilizadas suelen contener otros residuos no deseados y que interfieren con la fabricación de los termo plásticos reforzados.	Fibra de vidrio: 9 Fibra de Carbono: 6-7
Pirólisis	Proceso de reciclado térmico que permite la recuperación de fibra de carbono en forma de ceniza y de matriz polimérica en forma de productos de hidrocarburos. Es el método con la pérdida más baja de valor de los residuos. Las matrices pueden ser convertidas en polvo y aceite, que tienen el potencial de ser usados como aditivos y relleno. La pirólisis requiere de una alta inversión.	Pirólisis: 9 Pirólisis por microondas: 4-5
Pulso de Alta Tensión Fragmentada	Tecnología electromecánica que divide de manera efectiva la fibra de carbono del resto del aspa, sin embargo, solo las fibras pequeñas pueden recuperarse del proceso, pero para obtener fibras de mayor calidad se requiere una mayor cantidad de energía. En comparación al triturado mecánico, la calidad de fibras es superior al ser más largas y limpias.	6
Solvólisis	Tratamiento químico en el que se utilizan solventes (agua, alcohol y/o ácido) para romper los enlaces de la matriz a una temperatura y presión determinadas. Esta tecnología ofrece un amplio espectro de aplicaciones debido a las opciones de disolventes, temperatura (bajas en comparación a las tecnologías térmicas que dañan las fibras) y presión. La solvólisis es fácilmente escalable, pero requiere altos costos de inversión.	5-6
Cama Fluidizada	La característica única de este proceso es que puede tratar materiales mixtos (por ejemplo, superficies pintadas o núcleos de espuma) y, por lo tanto, podría ser particularmente adecuado para desechos al final de su vida útil.	5-6

7. CONCLUSIONES

Si bien la huella de carbono calculada en el análisis de ciclo de vida dio un valor levemente más alto que las huellas de carbono de las fuentes de energías convencionales (tablas 6.1 y 6.2), esto no quiere decir que la energía eólica sea más contaminante que las energías convencionales, ya que, las huellas de carbono de las otras fuentes de energías no consideran las emisiones de la etapa de cierre y las emisiones por transporte de suministros, considerando solo las emisiones por el uso de las plantas generadoras de electricidad, que en el caso de las energías eólicas, sus emisiones por concepto de generación de electricidad son nulas.

Respecto a las externalidades encontradas durante el análisis de ciclo de vida, se recomienda dar especial énfasis a las que tienen relación con el transporte de repuestos de aspas eólicas y las externalidades relacionadas con la disposición final de las aspas de los aerogeneradores. Para poder mitigar los impactos de estas actividades anteriormente nombradas se sugiere que para el caso del transporte de los repuestos de los aerogeneradores se busque un proveedor de aspas que se encuentre a una distancia más cercana a Chile y que cumpla con todos los estándares de calidad necesarios; en el caso de la disposición final de las palas de los aerogeneradores se recomienda invertir en investigación científica y el desarrollo de tecnologías para poder revalorizar dichos residuos para que no terminen en un relleno industrial, todo esto con la finalidad de disminuir la huella de carbono de los aerogeneradores.

Se espera que a un mediano plazo los aerogeneradores podrán producir una mayor cantidad de energía por torre lo cual disminuiría la cantidad de residuos generados por parque eólico y generarían la misma cantidad o más energía que en la actualidad.

En relación a los resultados obtenidos de la comparación entre la normativa nacional y europea se puede concluir que, Chile tiene una gran carencia en la regulación de los residuos provenientes de los aerogeneradores, lo que a futuro puede desencadenar un mal manejo de estos por parte de las empresas que utilicen aerogeneradores. Por este motivo se recomienda una actualización de la legislación nacional en materia de estos residuos tomando como referencia las leyes de los países que fueron presentados dentro de este informe (apartado 5.2) que pueden adaptadas a las futuras necesidades de Chile.

En cuanto a la información recopilada respecto al análisis de las capacidades físicas y los recursos humanos del país en materia de los residuos de los aerogeneradores, se puede concluir que Chile cuenta con la infraestructura para poder recibir ciertos residuos de los aerogeneradores como los metales, tierras raras, cables eléctricos y aceites, sin embargo, no se encuentra disponible ninguna empresa capaz de reciclar y/o tratar los residuos del hormigón y de plásticos compuestos. Por esto último se recomienda que empresas privadas y/o el estado invierta en el desarrollo de plantas para el reciclaje de estos residuos, así como también aumentar la infraestructura ya vigente a fin de poder cubrir las futuras demandas de reciclaje o tratamiento de residuos. En relación a los recursos humanos del país para realizar mantenciones, desmontaje de las plantas y administración de los parques eólicos, se demostró que si existen carreras de educación superior que pueden proveer de los profesionales requeridos, aun así, se recomienda a las instituciones de educación superior implementar estas carrera a los largo de todo Chile.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Brano, V. L. (2008). Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 200-217. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.013>.
- Asociación Empresarial Eólica. (2019). *AEE*. [Recuperado el 4 de mayo de 2021] < <https://n9.cl/021v7>>
- BBVA. (2020). BBVA.COM < <https://bit.ly/2YoSY06>> [Consultado el 05 de noviembre de 2021]
- Burton Tony, David Sharpe y Nick Jenkins (2001), *Wind energy handbook*, 1a edición, Inglaterra, Wiley.
- Caldera, M. E. (2000). Potencial de la energía eoloeleétrica en México. México D.F.: Greenpeace. < <http://journalalphacentauri.com/index.php/revista/article/view/5/7>> [Consultado el 25 de mayo del 2021]
- Castaño Orozco, J. (2014). Metodología de gestión ambiental para aceite dieléctrico de transformador: "Análisis del Ciclo de Vida (ACV)".
- Creus Sole, A. (2014). *Aerogeneradores*. Cano Pina. < <https://elibro.net/es/ereader/uvalparaiso/43078?page=223>> [Consultado el 5 de junio del 2021]
- Cortines Felipe. (2017). ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UN CONTEXTO REGIONAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, Universidad de Chile.
- Díez, P. F. (1993). *Energía eólica*. Servicio Publicaciones, Universidad de Cantabria.
- Electricidad. (2020). Turbinas eólicas en alta mar: una apuesta que se acerca al continente. <<https://cutt.ly/AmO7L1X>> [Recuperado el 12 de Julio del 2021]
- Educar Chile. El desarrollo de la energía eólica en Chile. <<https://cutt.ly/2nHvQvB>> [Consultado el 20 de mayo 2021]
- Hau, Erich (2005), *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, 2a edición, Alemania, Springer. <<https://cutt.ly/RbcMcLN>> [Consultado el 18 de Abril 2021]
- HHGM®. < <https://hhgm.mx/comunidad/enterate/que-es-un-cable-electrico>> [Consultado el 14 de Julio 2021]
- ISO. (2006). ISO — All rights reserved. <<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>> [Recuperado el 8 de mayo de 2021]
- Juan Cristóbal Antezana Nuñez, 2004. Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical. Pag 29. <<https://cutt.ly/MnOuHnO>> [Recuerado el 5 de mayo 2021]
- Lazcano, P. (02 de Mayo de 2018). Chile ya tiene 651 torres eólicas. *La Tercera*. < <https://www.latercera.com/tendencias/noticia/chile-ya-651-torres-eolicas/150492/>> [Recuperado el 3 de mayo 2021]

- Landazuri, P. A. C. (2019). Análisis comparativo de la Huella de Carbono de Un Parque Eólico en Tenerife-España (Doctoral dissertation). < <http://hdl.handle.net/10400.8/4619>> [Consultado el 31 de agosto de 2021]
- Manwell J. F., J. G. Mc Gowan y A. L. Rogers (2002), Wind energy explained. Theory, design and application, 2a edición, Inglaterra, Wiley.
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Energía eólica. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi, 22.
- Ministerio de energía. *EnergíaAbiertaBeta*. < <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/> > [Consultado el 16 de abril de 2021]
- Ministerio de Medio Ambiente. 2018. Curso E-learning Prevención, Valorización y Buen Manejo de los Residuos. < <https://educacion.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/05/Prevenci%C3%B3n-Valorizaci%C3%B3n-y-Buen-Manejo-de-Residuos.pdf> > [Consultado el 15 de diciembre de 2021]
- Naturgy. (2021). Naturgy.com ©. <<https://n9.cl/y0ghi>> [Consultado el 20 de abril 2021]
- Neslen A. (2021). Surging wind industry faces its own green dilemma: landfills. Reuters. <https://www.reuters.com/legal/litigation/surging-wind-industry-faces-its-own-green-dilemma-landfills-2021-09-10/> [Consultado el 10 noviembre de 2021]
- Oxford. LEXIO ©. Tierras Raras < https://www.lexico.com/es/definicion/tierras_raras > [Consultado el 14 de Julio 2021]
- Oxford. LEXIO ©. Aceite. <<https://www.lexico.com/es/definicion/aceite>> [Consultado el 14 de Julio 2021]
- Plásticosyfibras. (2016) Plásticos Compuestos < <https://plasticosyfibras.wordpress.com/2016/03/09/plasticos-compuestos/>> [Consultado el 14 de Julio 2021]
- Profesor en línea. Relieve del Mar de Chile < <https://bit.ly/3m4L7NI> > [consultado el 31 de mayo del 2021]
- Paula Chapple C. PARQUE EÓLICO CANELA EL NIDO DEL VIENTO. Revista BIT 58: 30-37. <<https://extension.cchc.cl/datafiles/21184.pdf>> [Recuerdo el 10 de Julio 2021]
- Romero, I. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental, Extracto boletín IIE, Pag 91-97.
- Rovira, J., & Herreros, J. (2016). Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva. Departamento de Panificación y Políticas en Biodiversidad. División de Recursos Naturales y Biodiversidad. Ministerio del Medio Ambiente.
- Rizzotto, M. (2007). Diccionario de química general e inorgánica. Corpus Editorial. < <https://elibro.net/es/ereader/uvalparaiso/67133?page=165>> [Recuperado el 14 de Julio 2021]
- Salas, A. T. (2017). Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical.
- Schmid, M., Ramon, N. G., Dierckx, A., & Wegman, T. (2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Wind Europe. Available online at: <https://windeurope.org/wp->

content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity. [Consultado el 5 de noviembre del 2021].

- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.
- UPC. análisis de ciclo de vida. < <https://bit.ly/30qavpy> > [Consultado el 22 de Abril 2021]
- Vestas. (2006). Life Cycle Assessment of Electricity Produced from Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V82-1.65 MW Turbines. *Vestas*. ULR < <https://windfarmrealities.org/wp-content/uploads/wfr-docs/vestas-v82-lca.pdf> >
- WWEA, 2021. Worldwide Wind Capacity Reaches 744 Gigawatts – An Unprecedented 93 Gigawatts added in 2020. < <https://bit.ly/30x6a48> > [consultado el 10 de junio 2021]

9. ANEXOS

9.1 ANEXO-A Matrices de importancia para la etapa de uso y etapa de cierre

Tabla A. Matriz de importancia etapa de uso y operaciones.

ID	Etapa	Actividad	Aspecto	Impacto	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	Importancia	Significancia	
D1	ETAPA DE USO Y MANTENCIÓN	Cambio de aceite lubricante	Transporte Técnicos	Contaminación Atmosférica	-1	3	5	3	3	1	1	1	3	1	3	35	Moderado	
D2				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	1	3	1	1	1	1	5	3	1	1	23	No Significativo	
D4				Impacto en el medio humano	1	3	3	5	1	3	1	1	3	1	1	31	No Significativo	
D5				Daño ecológico	-1	3	3	3	3	1	1	5	1	1	1	31	No Significativo	
D6			Generación de Residuos Peligrosos	Contaminación Atmosférica	-1	5	3	3	3	3	3	1	1	3	5	1	41	Moderado
D7				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	10	10	7	7	7	5	5	3	5	1	90	Significativo	
D8				Contaminación de la Tierra	-1	10	5	7	5	7	7	5	1	5	1	78	Significativo	
D9				Impacto en el medio humano	-1	10	3	7	3	5	3	1	1	5	1	62	Significativo	
D10				Daño ecológico	-1	10	3	7	7	7	7	5	1	5	1	76	Significativo	
D11			Cambios de Aspas	Transporte Técnicos	Contaminación Atmosférica	-1	3	5	3	3	1	1	1	3	1	1	33	No Significativo
D12		Contaminación de los cuerpos de agua			-1	1	3	1	1	1	1	5	3	1	1	23	No Significativo	
D14		Impacto en el medio humano			1	3	3	5	1	3	1	1	3	1	1	31	No Significativo	
D15		Daño ecológico			-1	3	3	3	3	1	1	5	1	1	1	31	No Significativo	
D16		Transporte Aspas Nuevas		Contaminación Atmosférica	-1	5	5	3	3	1	1	5	3	1	1	43	Moderado	
D17				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	5	5	3	3	1	1	1	3	1	1	39	Moderado	
D18				Impacto en la salud humana	-1	3	3	1	3	1	3	1	3	5	1	33	No Significativo	
D19				Daño ecológico	-1	3	3	1	3	3	3	1	1	5	1	33	No Significativo	
D20		Transporte Residuos Aspas hacia Vertedero		Contaminación Atmosférica	-1	3	3	1	1	1	1	3	1	1	3	27	No Significativo	
D21				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	3	3	1	1	1	1	3	1	1	3	27	No Significativo	
D22				Impacto en el medio humano	-1	3	3	1	3	1	3	3	1	1	3	31	No Significativo	
D23				Daño ecológico	-1	3	3	1	3	1	3	3	1	1	3	31	No Significativo	
D24		Transporte Diario de Trabajadores		Transporte de Personal	Contaminación Atmosférica	-1	3	5	3	3	1	1	1	3	1	5	37	Moderado
D25					Contaminación de los cuerpos de agua	-1	1	3	1	1	1	1	5	3	1	5	27	No Significativo
D26					Impacto en el medio humano	1	3	3	3	1	3	1	1	3	1	5	33	No Significativo
D27					Daño ecológico	-1	3	3	3	3	1	1	3	1	1	5	33	No Significativo

Tabla B. Matriz de importancia de la etapa de cierre y abandono

ID	Etapa	Actividad	Aspecto	Impacto	Na	I	Ex	Mo	Rv	Pe	Mc	Ac	Si	Ef	Pr	Importancia	Significancia	
D28	ETAPA DE CIERRE Y ABANDONO	Desmontaje góndola	Transporte Residuos góndola hacia punto de Reciclaje	Contaminación Atmosférica	-1	5	3	1	1	1	1	3	1	1	3	33	No Significativo	
D29				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	3	5	1	1	1	1	3	1	1	3	31	No Significativo	
D31				Impacto en el medio humano	1	5	3	3	3	7	3	1	1	1	1	41	Moderado	
D32				Daño ecológico	1	5	3	3	3	7	3	1	5	5	1	49	Significativo	
D33			Uso Grúa para el Desmontaje	Contaminación Atmosférica	-1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	19	No Significativo	
D34				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	19	No Significativo	
D36				Impacto en la salud humana	-1	3	1	7	1	1	1	1	1	1	1	25	No Significativo	
D37				Daño ecológico	-1	3	1	7	1	1	1	1	1	1	1	25	No Significativo	
D38		Desmontaje Rotor	Transporte Residuos Hub hacia punto de Reciclaje	Contaminación Atmosférica	-1	3	3	1	1	1	1	3	1	1	3	27	No Significativo	
D39				Contaminación de los cuerpos de agua	-1	3	5	1	1	1	1	3	1	1	3	31	No Significativo	
D41				Impacto en el medio humano	1	5	3	3	3	7	3	1	1	1	1	41	Moderado	
D42				Daño ecológico	1	5	3	3	3	7	3	1	5	5	1	49	Significativo	
D43			Transporte Residuos Aspas hacia Vertedero	Contaminación Atmosférica	-1	5	3	1	1	1	1	3	1	1	3	33	No Significativo	
D45				Contaminación de la Tierra	-1	3	3	1	7	7	7	5	1	1	5	49	Significativo	
D46				Impacto en la salud humana	-1	1	1	1	7	7	7	5	1	1	1	35	Moderado	
D47				Daño ecológico	-1	3	5	1	7	7	7	5	1	5	5	57	Significativo	
D48			Transporte Trabajadores	Transporte de técnicos para el desmontaje	Contaminación Atmosférica	-1	1	1	5	1	1	1	1	1	5	1	21	No Significativo
D51					Impacto en el medio humano	1	3	1	5	1	1	1	1	1	5	1	27	No Significativo
D47					Daño ecológico	-1	3	3	5	1	1	1	1	1	1	1	27	No Significativo
D48					Contaminación Atmosférica	-1	3	5	3	3	1	1	1	3	1	1	33	No Significativo
D51	Transporte Trabajadores	Transporte de técnicos para el desmontaje	Contaminación de los cuerpos de agua	-1	1	3	1	1	1	1	5	3	1	1	23	No Significativo		
D48			Impacto en el medio humano	1	3	3	3	1	3	1	1	3	1	1	29	No Significativo		
D49			Daño ecológico	-1	3	3	3	3	1	1	3	1	1	1	29	No Significativo		

9.2 ANEXO B.



			Componentes / subsistemas / sistemas	Entorno de verificación y validación
TRL 9	El sistema real es probado satisfactoriamente en operaciones reales	Aplicación real de la tecnología en su sistema final y bajo las condiciones de las misiones operativas.	Sistemas de serie	Entorno operativo
TRL 8	El sistema real es probado mediante test y demostraciones	El sistema que contiene la tecnología se encuentra completamente desarrollado e integrado con los sistemas existentes, y se llevan a cabo las pruebas de calificación del mismo en los escenarios operativos simulados para los que se requiere.	Primeros sistemas de serie	
TRL 7	Se realiza una demostración de un prototipo de sistema en un entorno operativo	El prototipo está cerca o al nivel del sistema operativo planeado, y las funcionalidades críticas y de riesgo de la tecnología se demuestran y prueban en un entorno operativo (ejemplo: en una aeronave, vehículo o en el espacio).	Prototipo industrializado	
TRL 6	Se hace una demostración de un modelo o prototipo de sistema/ subsistema en un entorno relevante	El modelo representativo o prototipo del sistema, que está cerca de la configuración deseada en términos de rendimiento, aspectos físicos y/o interfaces, se prueba en un entorno relevante. Representa un avance considerable en la madurez de la tecnología que se demuestra en un entorno de laboratorio de alta fidelidad o en un entorno operativo simulado.	Modelo o prototipo de demostración del sistema (demostrador)	Entorno relevante
TRL 5	Los componentes de la tecnología son validados en un entorno relevante	Los componentes básicos de la tecnología se integran con elementos de soporte razonablemente realistas de manera que puedan ser probados en un entorno simulado. Representa una réplica de "alta fidelidad" que integra componentes de laboratorio con sistemas existentes.	Componentes / subsistemas críticos integrados con elementos de soporte (alta fidelidad)	
TRL 4	Los componentes de la tecnología son validados en un entorno de laboratorio	Los componentes básicos de la tecnología se integran para determinar que trabajarán de forma conjunta en laboratorio. Representa una réplica de "baja fidelidad" comparado con el sistema final, en cuanto a la eficiencia y robustez.	Componentes / subsistemas críticos integrados en breadboard (baja fidelidad)	Laboratorio
TRL 3	Existe una analítica y experimentación de la funcionalidad crítica y/o una prueba del concepto	Comienza el I+D activo. Se obtienen resultados de estudios analíticos y pruebas de laboratorio de los componentes o subsistemas críticos, que no están todavía integrados o no son todavía representativos, llevadas a cabo para medir parámetros de interés y validar las hipótesis.	Componentes / subsistemas críticos de la tecnología separados	
TRL 2	Se ha formulado el concepto y/o la aplicación de la tecnología	Inicio de la invención práctica. Actividades de investigación aplicada, estudios analíticos, publicaciones u otras referencias que resumen la aplicación bajo consideración, proporcionan el análisis que respalda el concepto y comparan las tecnologías competidoras.		Publicaciones
TRL 1	Están identificados y se han observado los principios básicos de la tecnología	Nivel de desarrollo tecnológico más bajo posible. Actividades de investigación básica y publicaciones científicas que identifican los principios básicos de la tecnología.		

Figura I. Explicación de los niveles de los 9 niveles de preparación tecnológica (TRL) (fuente: <https://bit.ly/301Mrsr>)