

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y CIENCIAS



End-Life-Cicle Palas de aerogenerador

PASANTÍA INGENIERÍA CIVIL EN ENERGÍA Y
MEDIOAMBIENTE



GERENCIA DE SOSTENIBILIDAD

Tomás Eduardo Barrera Stuen

1 de Diciembre de 2023

Índice

1. Resumen ejecutivo	2
2. Introducción	4
3. Objetivos	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos específicos	6
4. Metodologías	7
4.1. Metodología para disposición	7
4.2. Metodología para extensión de vida	7
4.3. Metodología para reúso	7
4.4. Metodología para reciclaje	7
5. Medidas de desempeño	8
6. Estado del Arte	9
6.1. Extensión de vida	9
6.2. Reúso	10
6.3. Reciclaje	11
6.4. Contexto global	13
7. Solución propuesta	14
7.1. Etapa extensión de vida	14
7.2. Etapa tratamiento	15
7.3. Etapa decisión	15
8. Desarrollo del proyecto	19
8.1. Disposición	19
8.2. Extensión de vida	20
8.3. Reúso	21
8.4. Reciclaje	22
9. Resultados	26
9.1. Disposición	26
9.2. Extensión de vida	26
9.3. Reúso	26
9.4. Reciclaje	26
9.5. Diagrama final	27
10. Conclusiones y discusión	28
11. Anexos	30
12. Referencias	32

1. Resumen ejecutivo

El proyecto aborda la gestión sostenible de las palas de aerogeneradores al final de su vida útil para ENEL. Con el aumento proyectado en el retiro de estas palas, es crucial desarrollar estrategias para su manejo, considerando los impactos económicos y medioambientales.

El proyecto tiene como objetivo desarrollar e implementar un enfoque integral de economía circular para el tratamiento de las palas de aerogeneradores, evaluando opciones como la extensión de vida, reúso y reciclaje en sus diversas modalidades.

Dado que se trata de economía circular, se propone la implementación de un enfoque integral. Cada alternativa se evalúa detalladamente, proporcionando un marco sólido para la toma de decisiones informadas.

La adopción de este enfoque aborda eficazmente la problemática de residuos y ofrece oportunidades económicas y ambientales. Desde la generación de ingresos por la extensión de vida hasta el tratamiento de residuos mediante el reciclaje, la solución propuesta demuestra un valor multifacético.

Este trabajo resuelve un problema clave en la gestión de residuos de la generación de energía no convencional, destacando la importancia de prácticas sostenibles en la industria de la energía renovable.

La elección de la mejor alternativa depende de factores económicos, técnicos y ambientales. Cada opción presenta ventajas y desafíos únicos. La disposición, extensión de vida, reúso y reciclaje ofrecen enfoques diferentes para abordar este desafío creciente, y la elección debe basarse en un análisis integral que considere todas las dimensiones relevantes.

Executive Resume:

The project addresses the sustainable management of wind turbine blades at the end of their lifespan for ENEL. With the projected increase in the retirement of these blades, it is crucial to develop strategies for their handling, considering economic and environmental impacts.

The project aims to develop and implement a comprehensive circular economy approach for the treatment of wind turbine blades, evaluating options such as life extension, reuse, and recycling in various forms.

As it involves a circular economy, the implementation of a comprehensive approach is proposed. Each alternative is carefully evaluated, providing a solid framework for informed decision-making.

The adoption of this approach effectively addresses the issue of waste and offers economic and environmental opportunities. From generating revenue through life extension to waste treatment through recycling, the proposed solution demonstrates multifaceted value.

This work addresses a key challenge in the management of waste from unconventional energy generation, emphasizing the importance of sustainable practices in the renewable energy industry.

The choice of the best alternative depends on economic, technical, and environmental factors. Each option presents unique advantages and challenges. Disposal, life extension, reuse, and recycling offer different approaches to address this growing challenge, and the choice should be based on a comprehensive analysis considering all relevant dimensions.

2. Introducción

Uno de los problemas que ha tomado fuerza y que posee relevancia en la visión a futuro de la empresa es el ciclo de vida de las palas de los aerogeneradores, qué hacer con ellas y cuánto material/volumen significa en generación de residuos. En el ámbito mundial, existen varias proyecciones respecto a la cantidad de palas de aerogeneradores que terminan su ciclo de vida y el monto de palas a ser dispuestas. Según Aubryn Cooperman¹, el ratio de salida alcanzará las 3000 a 9000 palas al año a 2025, número que alcanza valores entre las 10000 y 20000 palas al año en 2050, todo esto en EEUU.

En ENEL, el área de generación eólica posee 12 parques, y algunos con fecha cercana a su fin de ciclo, según su RCA, como se puede apreciar en la tabla 1².

Central	Cantidad de aerogeneradores	Fin de ciclo
Canela I	11	2027
Canela II	40	2029
Talinay Oriente	45	2035
Taltal	33	2039
Valle de los vientos	45	2039
Talinay Poniente	32	2039
Sierra Gorda	56	2041
Los Buenos Aires	12	2041
Renaico	44	2041
La Cabaña	22	—
Renaico II	32	—
Rihue	42	—

Tabla 1: Centrales eólicas ENEL y su fin de ciclo programado

En cuanto a los aerogeneradores, su descomposición se muestra en las tablas 2 y 3³.

Material	Torre [ton]	Góndola [ton]	Rotor [ton]	Base [ton]
Steel	126,1	6,3	4,2	27
Aluminium	2,6	-	-	-
Electronic	2,2	0,3	-	-
Plastic	2	1	-	-
Copper	1,3	1,6	-	-
Oil	1	0,3	-	-
Cast iron	-	18	11,3	-
Steel Engineering	-	13	1,5	-
Stainless steel	-	7,8	-	-
Fibreglass	-	1,8	-	-
Blades	-	-	25,2	-
Concrete	-	-	-	805
Total	135,2	50,1	42,2	832

Tabla 2: Material por aerogenerador Vestas V82

y para las palas⁴

Material por pala	%	Vestas V82 [ton]
Fibra de vidrio	70,28	5,90352
Resina Epoxi	25,55	2,1462
Espuma de PVC	2,73	0,22932
Aluminio	0,53	0,04452
Acero Baja Aleación	0,1	0,0084
Hierro	0,53	0,04452
Cobre	0,03	0,00252
Caucho Sintético	0,01	0,00084
Nylon 66	0,01	0,00084
Pintura	0,24	0,02016

Tabla 3: Composición de palas en base a detalle Gamesa G80

Con la información presentada se puede entender cuál es la importancia de un plan de acción con los residuos, para cuando llegue la fecha estimada, ya que cuando suceda, requiere de un gran proceso logístico para el retiro de estos y costos asociados, no solo a la logística, sino también a la posible disposición del material en rellenos sanitarios incurriendo en costos.

3. Objetivos

Como se mencionó, no existe ningún plan para realizar con los residuos que esto genera, por lo que en conversaciones con la empresa y con base en un estudio similar realizado para los paneles solares, se decidió realizar un plan de decomisionamiento para dichas palas, integrando modelos circulares para generar valor económico, social y ambiental.

3.1. Objetivo General

Objetivo general SMART: Elaborar plan para la salida de palas de aerogenerador en su fin de ciclo de vida, empleando principios de economía circular, aplicable de forma sostenible en el tiempo, con el fin de reducir su disposición en rellenos sanitarios.

3.2. Objetivos específicos

1. Evaluar costos presentes y futuros de disposición (caso base).
2. Evaluar potencial y factibilidad técnico-económica de extensión de vida de palas de aerogenerador.
3. Evaluar potencial y factibilidad técnico-económica de reúso de palas de aerogenerador.
4. Evaluar potencial y factibilidad técnico-económica de reciclaje de palas de aerogenerador.
5. Evaluar potencial y factibilidad técnico-económica de recuperación de palas de aerogenerador.

4. Metodologías

Para la metodología se aplicará el proceso de formulación y evaluación de proyecto estándar, con el fin de analizar lo dicho en los objetivos específicos; además, se revisará el marco legal y técnico de cada una de las opciones, todo con el fin de obtener de forma más exacta cómo se debe elegir el método de fin de ciclo vida más adecuado.

4.1. Metodología para disposición

1. Analizar costos de disposición
 - a) Revisión de contratos y costos.
 - b) Cuantificar costos asociados (desmantelamiento, transporte y disposición).
 - c) Separar costos totales y solo por material de palas.

4.2. Metodología para extensión de vida

1. Revisión de requisitos técnicos
 - a) Lectura de normas para la extensión de vida
 - b) Análisis del procedimiento estándar de ENEL
2. Cuantificar costos e ingresos por planta
 - a) Calcular generación/ingreso anual.
 - 1) Tomar datos históricos de las centrales.
 - 2) Realizar proyección de datos.
 - b) Calcular costos anuales (mantención, operación, otros).
 - c) Interceptar valores obtenidos y verificar viabilidad económica.

4.3. Metodología para reúso

1. Calcular costos de trozado.
 - a) Cotizar maquinaria necesaria.
2. Establecer valor mínimo de venta para netear costos previos.

4.4. Metodología para reciclaje

1. Filtrado de metodologías de reciclaje más viables.
2. Costos asociados a trituración.
 - a) Precio maquinaria.

- b) Logística de reciclaje.
- c) Valor de venta por cada materia obtenida.
- d) Costos de operación y mantenimiento.

5. Medidas de desempeño

Respecto a las medidas de desempeño sobre las distintas metodologías utilizadas, se tomó la decisión de que se compararán:

1. Costos de disposición
Costos descuelgue + Costos trozado + Costos tratamiento + Costos transporte + Costos relleno sanitario
2. Utilidades anuales por extensión de vida de palas
Energía inyectada * Precio estimado + Ingresos por potencia estimados - Costos de mantenimiento - Costos fijos
3. Utilidades/ahorros por reúso de palas
Ingresos por venta - Costos descuelgue + Costos trozado + Costos transporte
4. Utilidades/ahorros por reciclaje de palas
Ingresos por venta de material triturado - Costos descuelgue - Costos trozado - Costos triturado - Costos transporte

6. Estado del Arte

Hoy en día, el procedimiento de decomisionamiento de palas de aerogenerador es bastante simple. Estas se trozan en secciones de 1-30 metros de largo, se transportan vía terrestre y se disponen en rellenos sanitarios. Esta opción es la más simple y económica, con valores de 25-30 dólares por tonelada según la literatura. También existe la opción de cortar entre 1-3 cm de largo (tritución), lo cual alcanza valores de 90 dólares por tonelada⁵.

Si bien como principio de economía circular se entiende que la mejor forma de evitar estos problemas es extendiendo la vida útil de las palas o cambiando sus composiciones para que sean más ecológicas, sin embargo, se está analizando qué hacer con aquellas palas que ya están en operación y que terminarán su ciclo de vida, por lo que deberán ser tratadas de alguna forma.

Hoy existen 4 formas de darles nueva vida a las palas⁶.

6.1. Extensión de vida

La extensión de vida se refiere a la utilización en su función original y para esto existen 2 formas.

La primera es ocupar las palas de forma directa en el mismo parque de generación. Esta es la mejor opción tanto económica, como ambiental, ya que alargar la vida útil de los elementos disminuye su contaminación en un análisis de ciclo de vida (ACV) y evita tener que hacer nuevas inversiones mientras aún genera ingresos.

La segunda es su reinstalación en otro parque, posiblemente de menor capacidad. Esta opción puede no ser la mejor debido a la logística y los costos que significa el traslado. Sin embargo, puede que estos gastos sean cubiertos, ya sea por la venta de las palas/aerogenerador, o por los ingresos por generación que se produzcan, quedando cuanto menos similares a los valores de instalación de las mismas palas. En cuanto a sus niveles de contaminación, también es una gran opción, ya que, igual que en la opción anterior, aumenta su duración en producción, lo que haría que sea menor su contaminación en el ACV.

La certificación de extensión de vida es un proceso no regularizado, sin embargo, existen algunas instituciones que realizan certificaciones para España. UL posee un estándar de extensión de vida útil (ANSI UL 4143-2018) que se basa en las normas, DNV (DNVGL-ST-0262 y DNVGL-ST-0263) estandariza las medidas de seguridad para la operación. Respecto a lo técnico, SGS (SGS ECPE-2056) posee el procedimiento de análisis de fatiga para calcular la vida remanente de los componentes del aerogenerador⁷. Respecto a los criterios utilizados por ENEL se maneja la IEC61400, la cual especifica los requisitos estructurales, aerodinámicos, de materiales y de manufactura.

6.2. Reúso

El reúso se refiere a “Volver a usar algo, generalmente con una función distinta a la que tenía originariamente” para este trabajo se entenderá cómo la utilización para funciones distintas a la original y existen varias formas de reusar palas de aerogenerador, sin embargo, son bastante limitadas en cantidad de palas que pueden obtener una nueva forma de vida.

Los casos más conocidos de reúso son parques infantiles, esculturas y mobiliario urbano como bancas, estacionamientos para bicicletas, paraderos de autobús. En cuanto a otras posibilidades más estructurales, lo que dependería del estado de salida de las palas, existe la posibilidad de realizar puentes, torres para líneas eléctricas, e incluso funciones de insonorización al interior de muros. Sin embargo, para la realización de esto, habría que tener acuerdos previos para realizarlos, debido a los cortes necesarios para la construcción de estos, proceso que se realiza al momento de salida de operación y antes del transporte. Para encontrar más opciones de esto es importante encontrar alianzas y planificar con anticipación este tipo de proyectos, solo así podría funcionar.⁸⁹¹⁰



Figura 1: Usos estructurales aspas en reúso, Puente: Irlanda del norte, Parque: Rotterdam, Paradero: Dinamarca

6.3. Reciclaje

6.3.1. Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico, el cual se trata de cambiar la forma de las palas sin procedimientos químicos, principalmente haciendo de estos resina y fibra. Dichas fibras y resinas pueden tener distintas aplicaciones. Ej.

La Global Fiberglass Solutions desarrolló la tecnología para procesar los compuestos de una pala en pellets, que se utilizan para aislamiento térmico en paredes y suelos. A continuación, se deja una lista de dichos productos realizados¹¹.

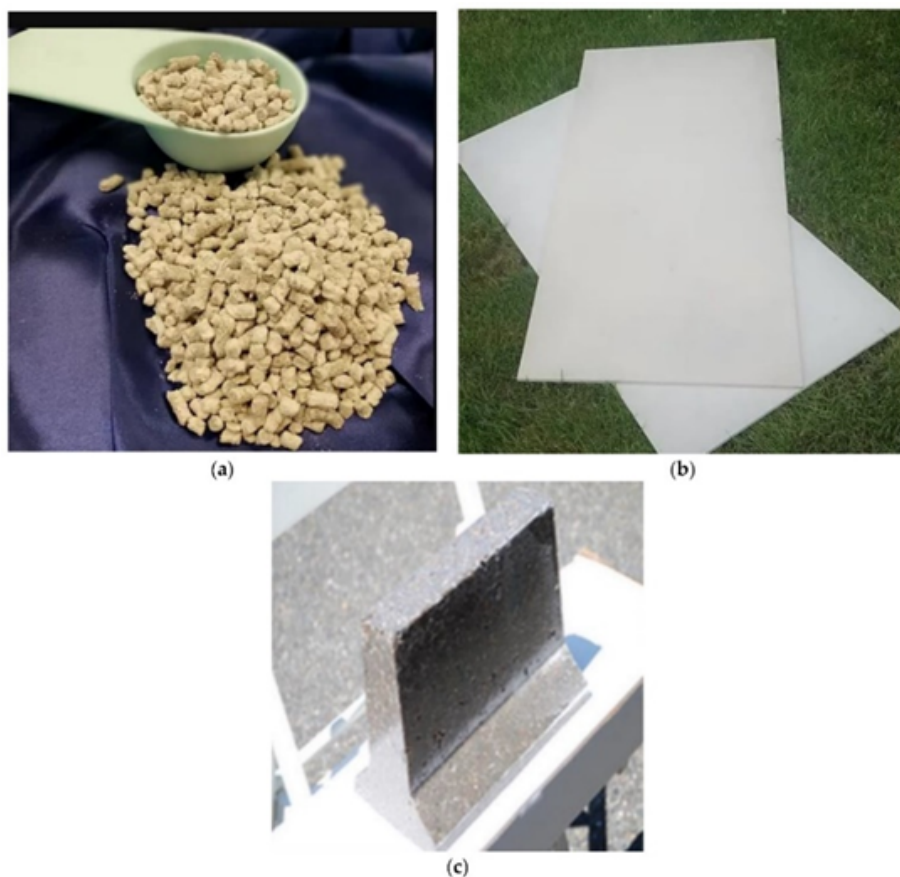


Figura 2: Productos Global Fiberglass Solutions hechos de fibra de vidrio reciclado: EcoPoly Pellets (a), EcoPoly Panels (b), aplicaciones viales (c).

También, LafargeHolcim, una empresa de cemento, encontró la forma de fabricar cemento en base a polvo de las palas trituradas, pudiéndose usar una buena cantidad de material en ello. Este cemento mantiene las propiedades mecánicas del cemento común¹².

6.3.2. Pirolisis

Consiste en realizar una descomposición térmica de materiales a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este es un proceso utilizado en otros materiales y se obtiene, en el caso de las palas, lo que sucede es una degradación de la matriz polimérica, obteniendo una mezcla de hidrocarburos y así recibir como producto fibra de vidrio, un poco más desgastada y con menores propiedades mecánicas que la original de las palas, pero aún pueden ser utilizadas para funciones no estructurales.

De todas formas, este procedimiento posee un alto costo de inversión y operación, por lo que tiende a ser poco viable económicamente.

También existe el proceso de pirolisis de microondas, donde el material es precalentado por microondas antes de ser incinerado¹³.

6.3.3. Lecho fluidizado

En este procedimiento, se reduce la pala a pellets de 20-30 milímetros, para luego entrar a un horno que alcanza los 550°C, dependiendo del compuesto que se quiera reciclar. Este método permite que la fibra obtenida no se degrade tanto en cuanto a sus propiedades mecánicas. De todas formas, el desgaste sigue siendo considerable, por lo que no se permitiría su uso como material estructural¹⁴.

6.3.4. Disolución química

Este proceso consiste en la despolimerización del material en base a soluciones químicas. La gran ventaja es que se puede recuperar una mayor cantidad de fibras dependiendo del solvente que se ocupe y estas no pierden en general sus propiedades mecánicas.

Vestas ha desarrollado un proyecto que utiliza la disolución química y que puede descomponer la resina epoxi en materiales vírgenes. El método se ha desarrollado en colaboración con la Universidad de Aarhus, el Instituto Tecnológico Danés y Olin, socios de Vestas en el proyecto CETEC. Esta iniciativa consiste en una alianza entre la industria y la academia, centrada en investigar tecnologías circulares para palas eólicas¹⁵.

6.3.5. Recuperación energética

Otra opción es la recuperación energética, que trata de utilizar los materiales de la pala como combustible para generación energética y componente de cemento. Esta es una opción sencilla, sin embargo, posee muchas desventajas. Las palas, al ser en un 70 % de fibra de carbono aproximadamente, no son buen combustible, por lo que el potencial energético que posee es bastante bajo. Además, la

generación de cenizas en este proceso es bastante grande, por lo que la disminución de residuos es baja¹⁶. De todas formas, a las empresas cementeras les es favorable el uso del compuesto en sus mezclas, ya que le agregan propiedades a su producto que mejoran parte de su rendimiento diario. Sin embargo, debido a los avances tecnológicos, las composiciones de las palas han ido cambiando a través del tiempo y seguirán haciéndolo, por lo que saber a ciencia cierta si servirá para una recuperación energética es complicado, debiéndose testear cada vez que se quiera utilizar¹⁷.

6.4. Contexto global

En Europa, las palas de aerogenerador son consideradas como residuo no peligroso, por lo cual, la legislación actual indica que debe ser dispuesto en rellenos sanitarios, sin embargo, en países como Alemania, Austria, Bélgica, y Dinamarca ya no está permitido enviar a rellenos sanitarios los residuos de composite. En Francia, los residuos a ser dispuestos con más de un 30 % de su composición plástica no pueden ser enviados a rellenos sanitarios, está prohibido¹⁸.

En Estados Unidos el valor de disponer las palas en rellenos sanitarios es muy bajo, poseen un plan de acción para reciclaje, que actualmente se encuentra en procesos de construcción de las plantas. Con esto, lo que se busca es disminuir la tasa de disposición con el paso del tiempo¹⁹.

En Chile actualmente no se está realizando ningún plan al respecto.

Actualmente, ENEL Chile está tomando cartas en el asunto debido a su poder de mercado, buscando cuál es la mejor opción, ya que este procedimiento debe estar planificado y aprobado con bastante anticipación debido a la logística que requiere el retiro de las palas que terminan su ciclo de vida.

Los principales avances al respecto los están ejecutando a nivel mundial los productores de palas, haciendo cambios en sus composiciones y diseños, para que estas sean recicladas con mayor facilidad, aplicando el proceso de rediseño.

Vestas es una de las empresas impulsoras de esto, ya que se encuentra desarrollando estudios para realizar cambios en los materiales de las palas de aerogenerador.

LM wind power también se encuentra realizando un proceso similar, donde lanzó un prototipo de palas 100 % reciclables en base a resina de arkema, en el contexto del proyecto Zero waste Blade ReseArch (ZEBRA)²⁰.

Sin embargo, en cuanto a reciclaje, Vatenfall (Suecia) es la única empresa que prometió hacerse cargo del reciclaje de todas las palas que produjeran²¹.

7. Solución propuesta

La solución a proponer es la aplicación de economía circular en el ciclo de vida de las palas, es decir, tomar todas las opciones vistas en el estado del arte e implementar una parte de cada una en el ciclo de las palas, como se puede apreciar en la figura 3. Este plan se puede separar en 3 etapas, la de extensión de vida, una etapa media, obligatoria, de tratamiento del material y una etapa final de decisión según se estime conveniente²².

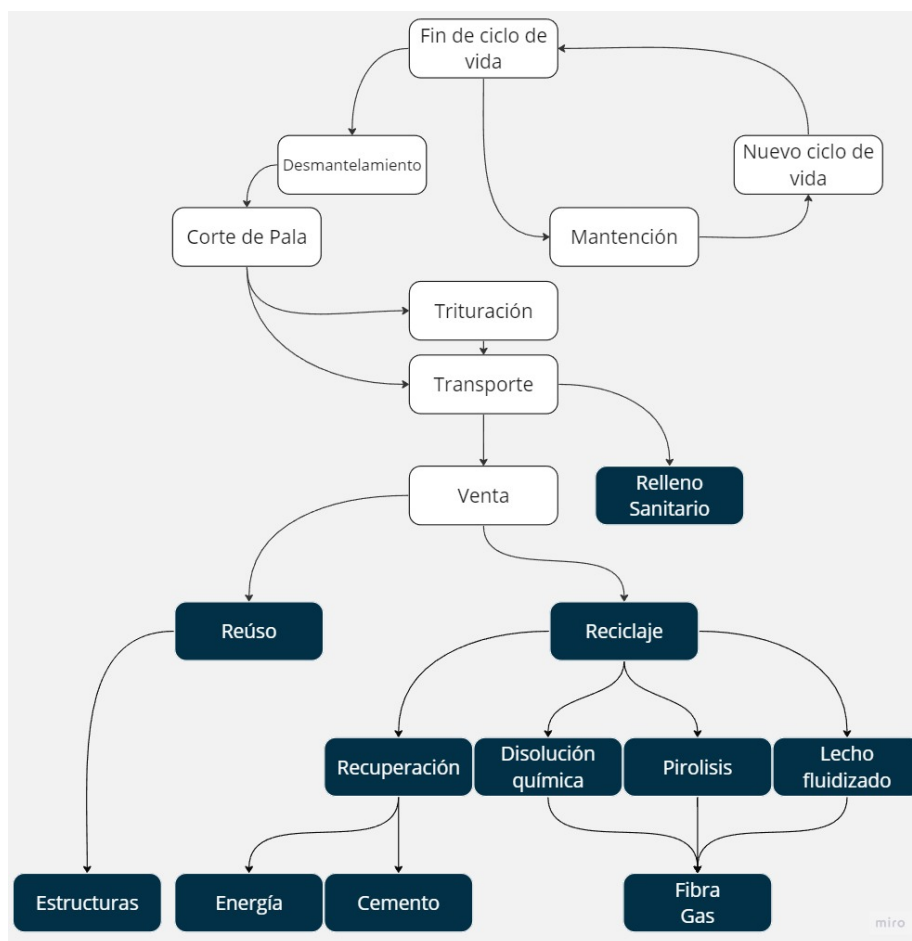


Figura 3: Plan economía circular aplicada a palas de aerogenerador

7.1. Etapa extensión de vida

En esta etapa se refiere a la mantención del funcionamiento activo o extensión de vida útil del parque, aumentando su duración en el ciclo productivo, por ende

disminuyendo su impacto en un ACV.

El procedimiento es bastante simple en principio y se muestra en la Figura 4. Respecto a la extensión de vida, se revisarán los valores de mantenimiento y estándares que deben cumplir las palas para mantener su uso después de terminada su vida útil legal, principalmente su tasa de falla, ya que a día de hoy no se existe ningún proceso para evaluar las propiedades mecánicas de la pala.

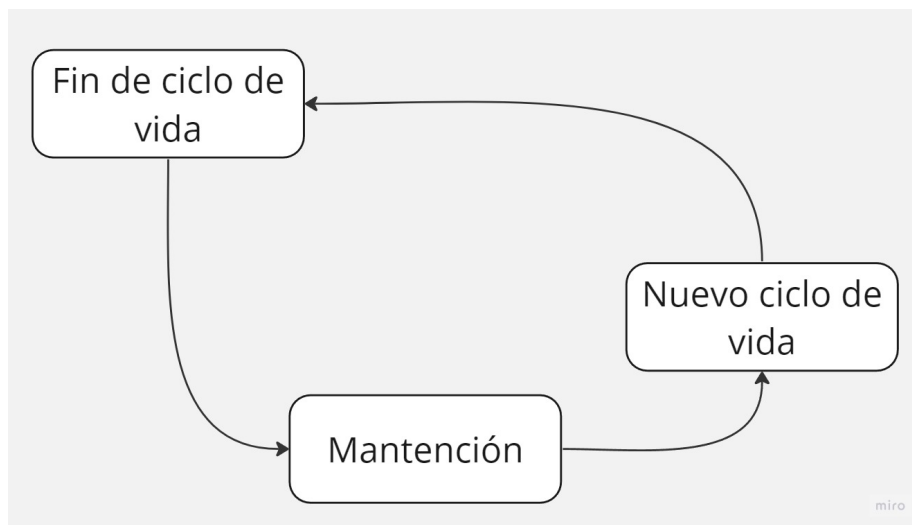


Figura 4: Etapa extensión de vida

7.2. Etapa tratamiento

Esta etapa considera el tratamiento obligatorio del material según las consideraciones conversadas con ENEL, donde se tomó en cuenta la facilidad de transporte y mejora en posible disposición a la hora de la toma de decisión, por lo que se consideró obligatorio un proceso de corte y en caso de no pasar a un nuevo uso, trituración para luego parar a ser transportado, como se muestra en la Figura 5, por lo que deberán analizarse todos los pasos intermedios e incluir dichos costos en el procedimiento.

También aclarar que en esta etapa culminan los trabajos y actividades a desarrollar por ENEL, ya que al ser una empresa relacionada con generación y distribución energética, no está en su línea de negocio la valorización de residuos.

7.3. Etapa decisión

En esta etapa existe una variedad de opciones para elegir qué hacer con el material como se vio en el estado del arte y como se puede apreciar en la Figura

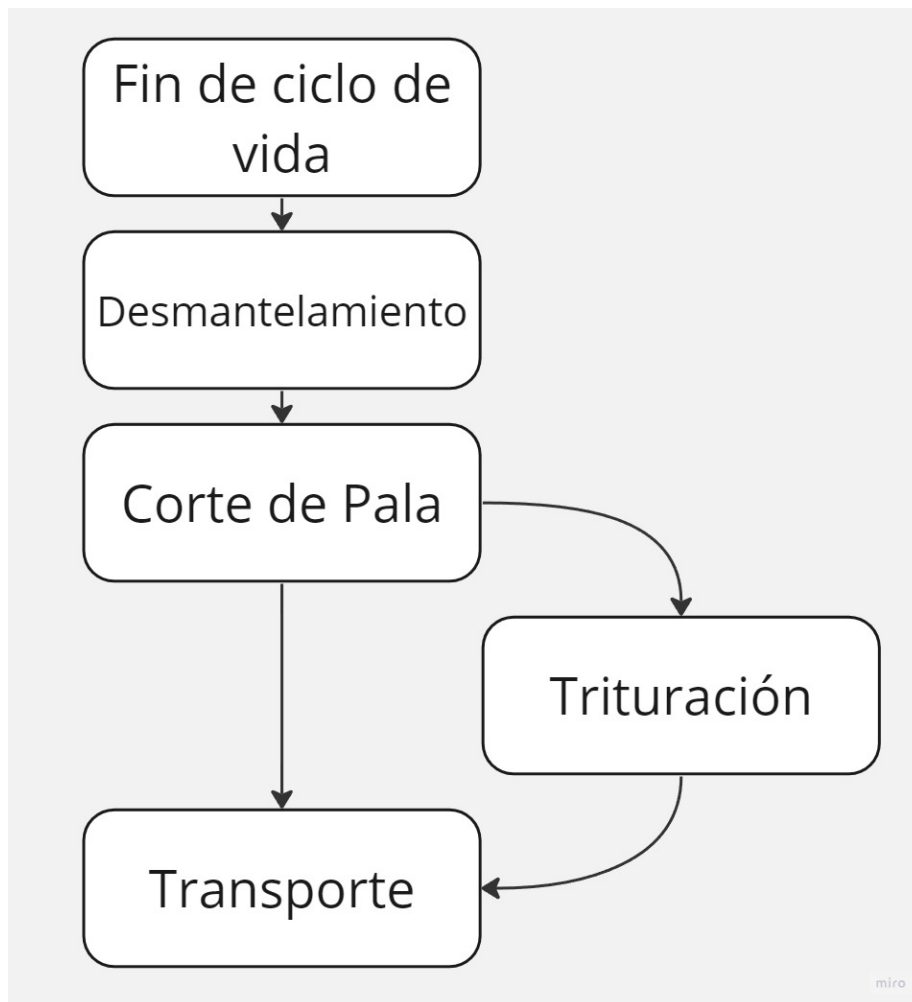


Figura 5: Etapa tratamiento

6, donde se puede apreciar en otro color las acciones que ENEL delegaría a otros actores.

7.3.1. Disposición

La primera opción a analizar es el caso base, la disposición en relleno sanitario, para esto se deberán contemplar los costos igualmente de desmantelamiento, trituración y transporte cómo se acordó.

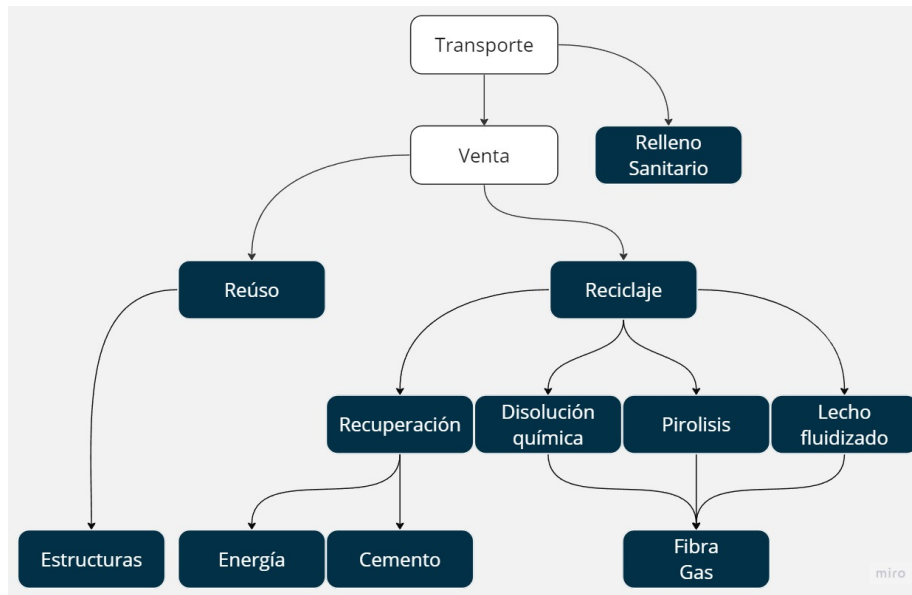


Figura 6: Etapa decisión

7.3.2. Reúso

Respecto al reúso, se analizarán los costos asociados al trozado de palas y transporte de los mismos, para alcanzar un valor por trozo para cubrir los costos previos.

7.3.3. Reciclaje

En cuanto al reciclaje, se hará una comparación entre los distintos métodos de reciclaje, mostrando sus ventajas y desventajas.

Respecto al reciclaje mecánico, hay que resaltar su simplicidad y velocidad. Sin embargo, esa velocidad se traduce en que el producto obtenido pierde muchas propiedades mecánicas y que dicho producto es pequeño y no consistente, además de estar mezclado con el resto de los productos presentes en la pala, ya sea resina, pintura, entre otros. Al poseer costos de inversión y operación no muy altos y un valor de venta medio, sería factible en principio realizar este tipo de planta. Además, es parte de la línea de proceso, tanto para otros tipos de reciclaje que requieren que el material sea triturado previamente, como para la recuperación energética y mezcla en horno cementero.

Sobre la pirolisis hay que saber que sus puntos fuertes son la calidad de producto obtenido, que cómo parte del proceso se puede recuperar energía utilizada en el proceso para continuarlo y que es muy escalable, ya que funciona de forma modular. Sin embargo, actualmente este proceso no es viable en ningún caso, ya que sus requerimientos son muy altos para producir fibra de vidrio.

El lecho fluidizado posee la gran ventaja de ser muy flexible en cuanto a las cantidades de material a reciclar y que es un proceso muy simple. Además, es un proceso muy cíclico, ya que se puede recapturar calor para disminuir su demanda energética y sus químicos, generando menos residuos y costos dentro del mismo proceso. Sin embargo, la fibra producida pierde significativamente su resistencia a la tensión y según estudios, solo se vuelve económicamente viable cuando se superan las 10000 toneladas por año²³, valor que no se alcanza en ningún año de momento según la proyección presentada al inicio.

En el caso de la disolución química, hay que resaltar el nivel de pureza de las fibras y la recuperación de la resina. De todas formas, el proceso es altamente ineficiente y requiere de altas temperaturas y presiones. Además, el uso de químicos solventes produce gases tóxicos y luego se convierten en residuo peligroso.

Donde se puede ver que la recuperación energética, el reciclaje mecánico pueden obtener valores positivos sin necesidad de grandes pagos por procesamiento, mientras que el resto poseen mayor costo para producir el producto, mientras que el material puede o no venderse a valores mayores.

Debido a lo anterior, se realizará solo la evaluación de reciclaje mecánico y de pirólisis, para analizar cuáles son los márgenes y posibilidad de negocio al respecto del mercado de reciclaje.

8. Desarrollo del proyecto

8.1. Disposición

Con lo presentado en las tablas 2 y 3 se obtiene la cantidad de material a retirar por aerogenerador y por palas que se puede apreciar en la tabla 4²⁴:

Central	Aerogeneradores	Masa total del parque en aerogeneradores	Masa aspas por aerogenerador	Masa aspas por parque	Precio retiro total por palas (USD)
Canela I	11	2502,5	25	277	\$49.896
Canela II	40	9100,0	25	1008	\$181.440
Talinay Oriente	45	10237,5	25	1134	\$204.120
Taltal	33	7507,5	25	832	\$149.688
Valle de los vientos	45	10237,5	25	1134	\$204.120
Talinay Poniente	32	7280,0	25	806	\$145.152
Sierra Gorda	56	12740,0	25	1411	\$254.016
Los Buenos Aires	12	2730,0	25	302	\$54.432
Renaico	44	10010,0	25	1109	\$199.584
La cabaña	22	5005,0	25	554	\$99.792
Renaico II	32	7280,0	25	806	\$145.152
Rihue	42	9555,0	25	1058	\$190.512

Tabla 4: Masa y precio de retiro de residuos por planta

Al ser grandes masas y volúmenes, pueden alcanzar valores en transporte de hasta los 4,5 UF (180 USD)²⁵ por tonelada, sumado al costo de disposición del relleno que puede alcanzar las 1,1 UF por tonelada²⁶, lo que en casos como el más cercano en tiempo, Canela I significaría 14.047,75 UF (561.910 USD) por las 2502,5 toneladas de residuo que posee solo en el retiro de este y 62.596 USD solo en el retiro de palas. como se puede apreciar en la tabla 5.

Costo contrato (UF/viaje)	45	UF/viaje
Costo disposición en relleno	1,1	UF/ton
Capacidad camión amplirol (ton)	10	ton
Residuos canela 1 (ton)	2.502,5	ton
Viajes	251	
Costo por tonelada (UF/ton)	5,6	UF/ton
Costo por tonelada (USD/ton)	224,5	USD/ton
Toneladas palas	277,2	ton
Viajes por palas	28	
Gasto en palas	5,6	UF/ton
Gasto en palas	225,8	USD/ton
Gasto disposición Canela 1	561.910	USD
Gasto en palas Canela 1	62.596,8	USD

Tabla 5: Costos y masas por retirar y disponer parque Canela 1

8.2. Extensión de vida

Para analizar la opción de la extensión de vida, se realizan pruebas de resistencia y desgaste de las palas, este proceso entra en vigor 4 años antes del final del ciclo de vida del proyecto, y de este se obtienen los datos para analizar una posible extensión del funcionamiento. En caso de que se decida que el proyecto puede continuar, estaríamos hablando de una extensión de vida estándar, es decir, realizar mantenciones y continuar el funcionamiento. En caso de que se decida que el proyecto puede continuar, pero por otros temas no tecnológicos (arriendos de terreno, decisiones políticas, etc..) se estaría efectuando, en el mejor de los casos, el segundo método de extensión de vida, que sería la reubicación del proyecto, o parte de éste. Para analizar esos casos, es necesario realizar la evaluación de proyecto al nuevo plazo de fin de vida, o en caso de ser externo, evaluar la posibilidad económica de ingreso por la venta de dichas palas, en vez de usarlas en crear un parque propio.

En caso de que las palas mantengan su funcionalidad y se piensen en reubicar, se debe tomar en cuenta el beneficio tributario a importaciones, que equivale a un 25 %, en caso de ser vendida, este 25 % debe ser pagado, ya que fue extenso de impuestos en la inversión inicial.

Luego de los 20 años de operación, se realiza un procedimiento de evaluación técnico, económico, de permisos y de posibles fallas por parte del área de operación y mantenimiento, para definir la continuidad. Sin embargo, el seguimiento no termina ahí, se fijan KPIs de rendimiento anualmente, para evaluar la continuidad, en caso de desviaciones serias en los rendimientos de la planta, el estudio pasa a manos del área de soporte técnico, para evaluar los posibles —fallos que generan las bajas de rendimiento, además de un seguimiento trimestral, todo incluido como parte de los costos de mantenimiento y cuando se detectan fallas incorregibles, se pasa a desmantelamiento.

Para la evaluación de la extensión de ciclo de vida se tomaron en cuenta los valores anuales de energía inyectada, el valor de la energía y los ingresos por potencia entre los años 2015 a 2022 entregados por ENEL (Anexo "Datos históricos Parque Canela I).

También se tomaron los datos anuales proyectados por ENEL para los años 2023 a 2035 de ingresos por potencia y precios de la energía(Anexo "Datos proyectados por ENEL").

Luego de eso, se calculó un promedio de los precios proyectados, para calcular un precio de la energía para proyectar del año 2035 a 2050(Anexo "Proyección realizada al año 2045").

Para la proyección de la energía inyectada, se tomó la pérdida de eficiencia de la planta de 2 %²⁷ anual, comparándolos con una proyección realizada con la función "pronóstico lineal" de Excel, donde los valores obtenidos por la pérdida de rendimiento fueron siempre menores a partir del año 2035, por lo que se tomó ese valor. En cuanto a los ingresos por potencia, se calcularon en base a la energía inyectada como si la generación fuese lineal por un precio por MW calculado en base al promedio de los ingresos por potencia del año 2015 a 2035. Respecto a los costos, se tomó el cálculo realizado para las mantenciones, toman-

do en cuenta 3 mantenimientos correctivos con un valor aproximado de 10.700 USD cada uno, 2 mantenimientos preventivos rutinarios al año con un valor de 133 USD por pala (caso canela 1, 33 palas) y 2 limpiezas al año, con un valor de 1980 USD por pala ²⁸(Anexo "Datos mantención centrales eólicas"). Agregar también que existe un costo fijo de 40,7 USD/kW²⁹. Todos los costos son para el año 0 de la planta (2006) por lo que fue necesario llevarlos al valor presente del año a analizar, con una tasa de inflación del dólar de un 3,7 % anual. Para llegar al cálculo final de las utilidades se multiplica el precio de la energía proyectado para el año por la energía inyectada, a eso se le suma el ingreso por potencia y se le restan los costos de mantención y fijos.

8.3. Reúso

Respecto a esta alternativa, se realizó una cotización de la hoja de corte necesaria para esto, la cual posee un valor de, aproximadamente, 40,000 USD con los costos de internación e IVA incluidos, que cuenta con una vida útil de 10,000 horas de uso.

Al ser cortes específicos, se estimó un tiempo de 88 horas de trabajo (una pala al día).

Se especificó que los cortes a realizar serán de 5 metros de largo, dando un total de 8 trozos por pala que tendrían 1,03 toneladas de masa cada uno.

Los cálculos de volumen y peso entregaron que el camión sería capaz de transportar 6,3 trozos por viaje, lo que para transportar los 264 trozos significarían un total de 44 viajes, cada uno con un valor de 1,800 USD por viaje³⁰. Los costos de trozado y transporte se pueden apreciar en las tablas 6 y 7³¹:

Trozado				Costo HH trozado	422,8	USD
Costo hoja	40,000	USD		HH máquina	40	USD/hr
Vida útil	10,000	hr		Transporte ida	50	USD/km
Distancia	1,000	km		Transporte vuelta	50	USD/km
Tiempo	264	hr	33 días			

Tabla 6: Tiempos y costos por trozado para reúso

Transporte trozados			Costo transporte	79,200	USD
Cantidad	277	ton	Contrato transporte	1,800	USD/viaje
Capacidad	6,3	ton/camión	Viajes	44	

Tabla 7: Costos por transporte de trozado para reúso

8.4. Reciclaje

8.4.1. Reciclaje mecánico

Hay que recordar que, para la trituración se realiza un proceso de corte previo, al igual que en el reúso, pero sin tanta precisión, por lo que el trabajo se realiza con mayor rapidez.

Para dicho corte se realizó la cotización previamente mencionada de la hoja de corte necesaria para esto, la cual posee un valor de, aproximadamente, 40,000 USD con los costos de internación e IVA incluidos, que cuenta con una vida útil de 10,000 hrs de uso.

El tiempo de corte para trituración varía principalmente en tiempo, ya que el tiempo estimado fue de 88 horas de trabajo (3 palas al día) y en el transporte, ya que se puede ocupar la capacidad máxima de transporte en el camión, que es de 10 toneladas por viaje. Esto nos da un total de 28 viajes por las 277 toneladas de material del parque, al valor de 1,800 USD por viaje³².

Respecto a los costos del reciclaje mecánico, se realizaron diferentes cotizaciones y se llegó a que la máquina a utilizar para la trituración sería un triturador Stokermill D110 debido a que el tamaño de apertura es el adecuado y el tamaño posibilita el transporte a terreno, donde sería utilizado. Este equipo ronda los 342,000 USD con una vida útil de 43,800 hrs según la cotización con ReValue SPA³³. Esta máquina posee especificaciones técnicas de producción de 1 tonelada por hora con una potencia requerida de 150 kW³⁴ y se consideró un equipo de trabajo de 4 personas³⁵.

Los detalles sobre el análisis se pueden apreciar en las tablas 8, 9, y 10:

Costo hoja	40,000	USD		HH máquina	40	USD/hr
Vida útil	10,000	hr		Transporte ida	50	USD/km
Distancia	1,000	km		Transporte vuelta	50	USD/km
Tiempo	88	hr	11 días			

Tabla 8: Tiempos y costos por corte para reciclaje mecánico

Trituración			Costo HH Trituración	167,6	USD
Costo máquina	7,8	USD/hr	Consumo energético	112,266	USD/hr
Producción	1	ton/hr	Ingeniero	4800	USD/mes
Tiempo	277,2	hr	Técnico	1600	USD/mes
Potencia requerida	150	kW	Ayudante	700	USD/mes
Cantidad	277	ton	Operario	500	USD/mes

Tabla 9: Tiempos y costos por trituración para reciclaje mecánico

Transporte triturado			Costo transporte	50,400	USD
Cantidad	277	ton	Contrato transporte	1,800	USD/viaje
Capacidad	10	ton/camión	Viajes	28	

Tabla 10: Tiempos y costos por transporte para reciclaje mecánico

8.4.2. Pirolisis

El proceso de pirolisis, lo que hace es purificar el material obtenido en el reciclaje mecánico, por lo que se deben tomar en consideración los valores del tratamiento previo.

Para evaluar esta opción se tomaron en consideración los niveles de producción recibidos de la cotización de la planta en China³⁶, los cuales son de 10 toneladas por día, 240 litros de Diesel, 234 kWh, 1 m³ de agua y costos variados de 50 USD, todo por día. Además, se requiere de un equipo de trabajo de 4 personas, lo que significaría alrededor de 225 USD al día para un ingeniero, un técnico, un operario y un ayudante³⁷.

Luego del tratamiento se obtiene que el costo de producción por tonelada de material es de 1195 USD como se puede apreciar en la tabla 11.

Para este mercado ya existen valores para los productos obtenidos, estos son 0,2 toneladas de aceite de pirolisis, 0,04 toneladas de carbón, 0,2 toneladas (90 m²) de biogás y 0,56 toneladas de fibra de vidrio, todo por tonelada de material tratado. Cada producto con un valor de mercado aproximado de 650 USD para el aceite, 50 USD para el carbón y de 650 USD para la fibra, todo por tonelada de material producido³⁸, dando un aproximado de ingresos por tonelada de 500,5 USD como se ve en la tabla 12.

Ítem	Valor	Unidad
Precio del material	724,1	USD/ton
Producción	10	ton/día
Ingeniero	4900	USD/mes
Técnico	800	USD/mes
Ayudante	550	USD/mes
Operario	500	USD/mes
Consumo de combustible	240	L diesel/día
Precio diesel	1,4	USD/L
Consumo eléctrico	234	kWh/día
Precio energía	0,0027	USD/kWh
Consumo de agua	1	m ³ /día
Precio del agua	1,6	USD/m ³
Otros	50	USD/día
Costo	1195,0	USD/ton

Tabla 11: Costo por tonelada de material pirolisado

Producto	Cantidad		Precio	
Crudo de pirólisis	0,2	ton aceite/ton	670	USD/ton aceite
Carbón	0,05	ton carbón/ton	50	USD/ton carbón
Biogás	90,72	m ³ gas/ton	-	reciclado
Fibra de vidrio	0,56	ton fibra/ton	650	USD/ton fibra
Total			500,5	USD/ton

Tabla 12: Ingresos por tonelada de material obtenido por pirolisis

8.4.3. Recuperación energética

La recuperación energética es una fase postproceso del reciclaje mecánico, en cuanto a la viabilidad del proceso, se realizaron las pruebas con un trozo de pala, donde se obtuvo como resultado que es viable técnicamente combinar en un horno cementero el triturado de pala con cemento, y que el producto obtenido posee las propiedades necesarias para utilizarse como cemento.

El laboratorio consistió en la trituración y fundición del trozo de pala entregado por ENEL en el horno de la cementera Polpaico, realizando la medición del poder calorífico de la pala y del análisis del cemento obtenido.

El trozo testeado es el mostrado en la Figura 7.

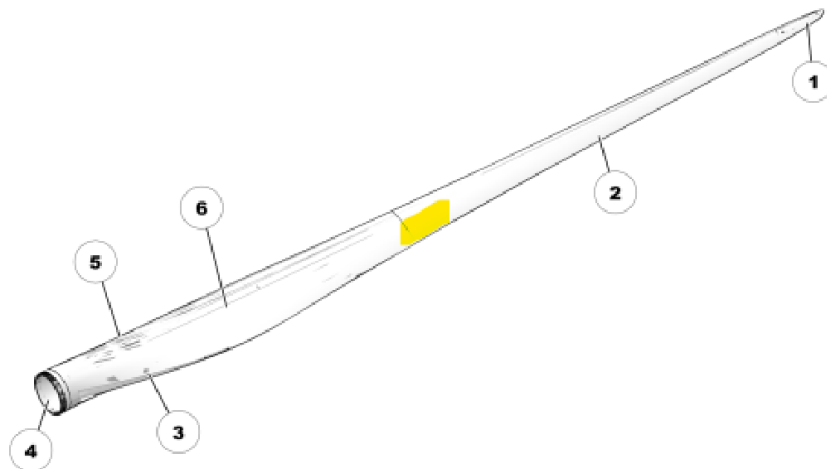


Figura 7: Esta muestra corresponde a la parte de la pala designada como Shell, la cual se ubica en la superficie exterior de la pala.

Matriz de riesgos

Respecto a los riesgos asociados a cada solución evaluada, se realizó la siguiente matriz:

1. Poca capacidad de plantas de reciclaje en Chile
2. Baja demanda de producto triturado
3. Análisis mecánico para la extensión de vida erróneo
4. Pérdida de calidad en la energía producida
5. Baja demanda de los productos obtenidos

Probabilidad/ Impacto	Insignificante	Menor	Significativo	Mayor	Severo
Casi seguro					
Probable		1		5	
Moderado			2	3	
Poco probable					
Raro					4

Tabla 13: Matriz de riesgos

Con los riesgos, su probabilidad y su impacto mostrados en la Tabla 13, hay que pasar a buscar sus formas de mitigación.

Respecto a los riesgos 1 y 2, estos existen principalmente debido a la falta de niveles de producción en el país, ya que somos un país exportador de materia prima y no producimos productos a gran escala. Una forma de resolver esta problemática sería incentivar, tanto a productores como a consumidores, a utilizar productos fabricados con materiales reciclados. Esto podría lograrse mediante acuerdos con productores y mediante incentivos gubernamentales para la utilización de materiales secundarios.

Respecto al riesgo número 3, al no haberse realizado previamente en Chile y rara vez en el extranjero, no será fácil identificar las capacidades mecánicas de la pala. Una vez desmontada, es mejor retirarla del parque junto con el resto del aerogenerador. Para esto, es necesario preparar cuidadosamente los análisis mecánicos a realizar y crear una estandarización completa para la extensión del funcionamiento de parques eólicos, similar a lo que está realizando la SGS con su normativa SGS ECPE-2056.

Respecto al riesgo número 4, es necesario realizar un estudio directo de la calidad de la energía.

Finalmente, es necesario estimar una posible demanda de todos los productos. En caso de una buena planificación, se pueden complementar las distintas opciones revisadas. Para esto, es necesario acompañar los resultados del proceso del primer riesgo mencionado con el mayor detalle posible y así estimar correctamente los ahorros o beneficios de la aplicación del modelo en comparación con la disposición final.

9. Resultados

9.1. Disposición

Los costos de disposición se le deben incluir los valores de desmontaje, corte y trituración como parte del proceso base, por lo que se obtienen los valores de la Tabla 5 dando un valor de 62.596 USD solo por transporte y disposición, de los cuales 12.196,8 USD son el costo de disposición del material triturado, que puede ser directamente vendido.

Estos valores fueron calculados de la siguiente forma:

9.2. Extensión de vida

Como se puede apreciar en el Anexo 4, la vida útil del parque canela 1 se podría ampliar, únicamente por los factores técnicos y económicos, hasta el año 2042 aproximadamente. Siempre y cuando los factores legales, de uso de terreno y que no existan fallas mecánicas irreparables.

Respecto a la extensión de vida, debido a que económicamente es viable, se espera que los parques puedan extender su funcionamiento, dependiendo del estado de desgaste, en al menos 10 años, lo que significaría una disminución de 4,4 kg de CO_2 equivalente por MWh a 2,8 kg de CO_2 equivalente por MWh³⁹. Además de los ingresos previamente mencionados que a valor actual neto al año 2042 alcanzaría la suma de 3.143.744 USD, lo que supliría los costos de desmantelamiento, transporte y disposición del parque.

9.3. Reúso

Del trozado se obtienen 264 trozos de pala de 5 metros cada uno. Para netear los gastos, el valor de cada uno de ellos debiese ser superior a los 722,8 USD, valor muy similar al valor del triturado como se verá a continuación.

9.4. Reciclaje

9.4.1. Reciclaje mecánico

Lo mostrado en el análisis del reciclaje mecánico da un valor mínimo de venta de aproximadamente 724,1 USD por tonelada, incluyendo este el transporte final hasta el destino, esto para netear los costos previos.

9.4.2. Pirolisis

Por lo mostrado en el análisis de la planta de pirolisis, se puede apreciar que esta no es una opción viable económicamente.

9.4.3. Recuperación energética

Los resultados arrojaron que el poder calorífico de la pala es de alrededor de 3500 Kcal/Kg⁴⁰, similar al valor de algunos tipos de madera, por lo que es posible incinerarlas y complementarse en el proceso de producción de cemento. Sin embargo, el nivel de emisiones en el proceso no fue medido, por lo que se deberá realizar el estudio de estas para contemplarla como opción sostenible.

Además, el valor de venta de las palas no está fijado, por lo que en caso de estar bajo el precio del postproceso de reciclaje mecánico (724 USD/ton) esta opción no posee ningún tipo de acuerdo previo, por lo que habría que negociar con las empresas cementeras y saber cuánto están dispuestas a pagar por el material y así poder evaluar el potencial de negocio y viabilidad de esta opción.

9.5. Diagrama final

Con los resultados previamente mostrados, se agrega el diagrama final con costos por tonelada en la Figura 8, donde los valores en rojo se muestran los costos por tonelada del procedimiento previo, mientras que los valores en verde los ingresos totales de la extensión de vida útil llevados a valor presente que podría significar una extensión de 15 años, mientras que en la parte posventa del material los ingresos necesarios para suplir el proceso previo.

Aclarar que estos costos son para cada parte del flujo, por lo que los costos finales son la suma de todos los costos previos al pasar por el flujo.

Además, cómo se especificó en la explicación de las etapas, Los recuadros en blanco son las actividades desarrolladas por ENEL. Luego de eso el proceso derivaría en empresas/actores externos. Sin embargo, en el caso de la disposición en relleno sanitario, es ENEL quien debe hacerse cargo de los costos.

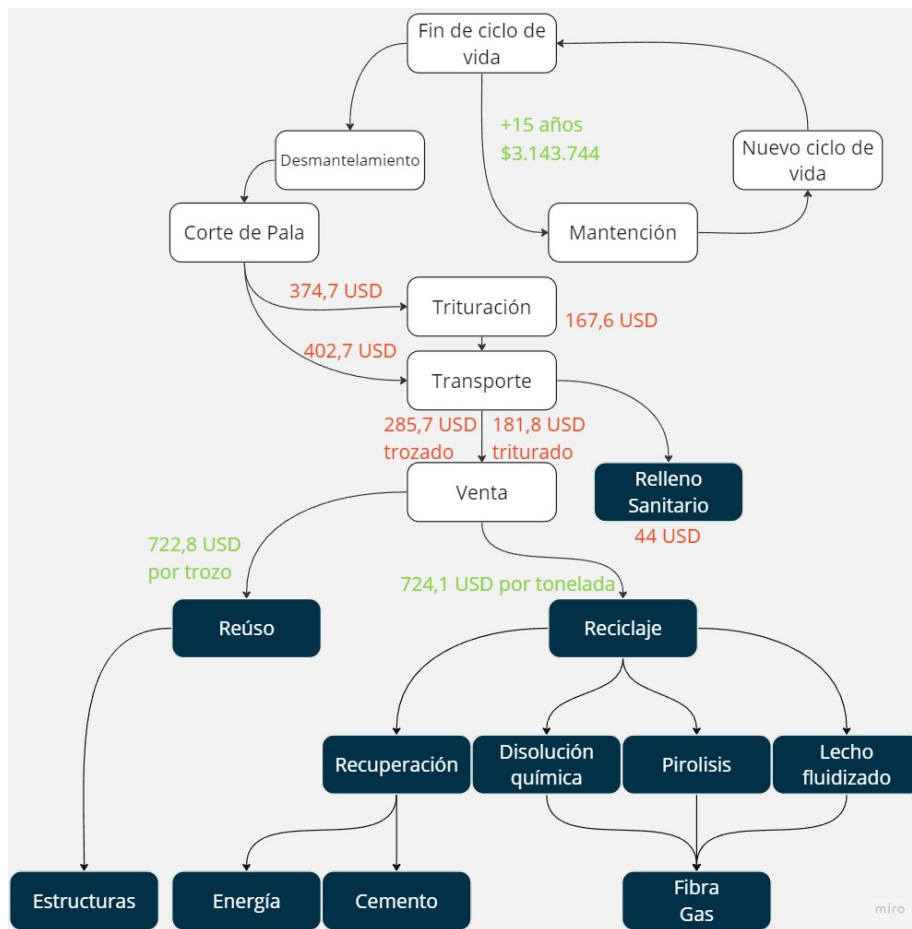


Figura 8: Diagrama con costos e ingresos asociados al proceso

10. Conclusiones y discusión

El proyecto resalta la importancia de la aplicación coordinada de las distintas soluciones, ya que al plantearse y cuantificar los valores de las distintas alternativas, se debe pasar al proceso de implementación de estas para aplicar de forma efectiva el modelo de economía circular en el negocio.

Sobre los resultados obtenidos, enfatizar que las opciones actuales y aplicables que existen, las cuales son la disposición, el reciclaje mecánico y la recuperación energética con procesamiento con el cemento.

Es importante, al momento de tomar en consideración las distintas alternativas, crear los vínculos necesarios para llevarlos a cabo. Si bien, se estableció como proceso base el desmontaje, corte, trituración y transporte del material, para evitar que estos sean dispuestos es necesario vincularse con actores que utilicen

el material y venderlo a un precio que mantenga esta actividad de forma sostenible.

También es relevante saber que si se encuentra un comprador del material por cualquier valor ya significaría una disminución en los costos finales, ya que se evitaría el pago de la disposición en relleno sanitario (44 USD/ton), y disminuyendo los costos medioambientales que vienen con la disposición. Agregar también que al momento de evaluar este tipo de proyectos, generalmente no se toma en consideración los costos asociados a las comunidades, algo de lo que se encarga el área de sostenibilidad de ENEL. Por lo que la extensión de vida útil puede incurrir en gastos aun mayores o simplemente no ser aceptada por parte de las comunidades.

Como continuación del proyecto, es importante que se realice un trabajo de optimización en la etapa de tratamiento, que es donde se concentran los mayores costos estudiados, para poder alcanzar un valor competitivo en comparación con otras opciones.

Para terminar, rescatar los intentos de los privados por tomar cartas en el asunto sobre un tema el cual no se ha tomado suficiente en consideración. Sin embargo, es necesario que esto se regule para que sea una obligación el correcto manejo de estos volúmenes de residuo y no una buena acción, ya que solo así se podrá generar un mercado sobre el correcto manejo y tratamiento de estos y que los costos entren a ser competitivos contra la opción base de la disposición.

11. Anexos

1. Datos mantención centrales eólicas

Mantenimiento	Cantidad(año-1)	Costo (USD/pala)	Palas	Costo anual (USD/año)
Tipo				
Correctivo	3	10.692	1	32.076
Preventivo	2	133	33	8.800
Limpieza	2	1.980	33	130.680
Total				171.556

2. Datos históricos Parque Canela I

Canela 1		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Producción	MWh	23.269	19.525	27.726	39.095	26.707	25.367	22.671	25.998
Ingresos Producción	USD	1.564.244	772.052	2.064.608	1.229.342	1.036.570	763.003	1.247.921	1.794.687
Precio Inyección	USD/MWh	67,2	39,5	74,5	31,4	38,8	30,1	55,0	69,0
Ingresos Potencia	USD	\$138.676	\$70.867	\$109.366	\$156.725	\$151.119	\$140.022	\$129.438	\$85.746
Ingresos central	USD	\$1.702.920	\$842.919	\$2.173.974	\$1.386.067	\$1.187.689	\$903.025	\$1.377.359	\$1.880.432

3. Datos proyectados por ENEL

Canela 1		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Producción	MWh	25.478	24.958	24.438	23.918	23.398	22.878	22.358	21.838	21.318	20.798	20.278	19.758	19.239
Ingresos Producción	USD	1.633.812	1.472.938	1.190.736	1.084.692	1.206.112	1.281.426	1.302.078	1.346.929	1.420.135	1.430.770	1.438.123	1.404.854	1.412.732
Precio Inyección	USD/MWh	64,0	59,02	48,72	45,35	51,55	56,01	58,24	61,68	66,62	68,79	70,92	71,10	73,43
Ingresos Potencia	USD	\$118.933	\$116.505	\$114.078	\$111.651	\$109.224	\$106.797	\$104.369	\$101.942	\$99.515	\$97.088	\$94.661	\$92.233	\$89.806
Ingresos central	USD	\$1.752.745	\$1.589.444	\$1.304.815	\$1.196.343	\$1.315.335	\$1.388.222	\$1.406.448	\$1.448.871	\$1.519.650	\$1.527.858	\$1.532.784	\$1.497.087	\$1.502.539
Costo de mantención	USD		\$171.556	\$172.191	\$172.828	\$173.467	\$174.109	\$174.753	\$175.400	\$176.049	\$176.700	\$177.354	\$178.010	\$178.669
Costos Fijos	USD		\$753.690	\$756.479	\$759.278	\$762.087	\$764.907	\$767.737	\$770.577	\$773.429	\$776.290	\$779.163	\$782.045	\$784.939
Costos central	USD		\$925.246	\$928.669	\$932.105	\$935.554	\$939.016	\$942.490	\$945.977	\$949.478	\$952.991	\$956.517	\$960.056	\$963.608
Se mantiene?	Si/No		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

4. Proyección realizada al año 2045

Canela 1		2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
Producción	MWh	18.719	18.199	17.679	17.159	16.639	16.119	15.599	15.079	14.559	14.039
Ingresos Producción	USD	1.144.227	1.112.443	1.080.659	1.048.875	1.017.091	985.307	953.523	921.738	889.954	858.170
Precio Inyección	USD/MWh	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1	61,1
Ingresos Potencia	USD	\$87.379	\$84.952	\$82.525	\$80.097	\$77.670	\$75.243	\$72.816	\$70.389	\$67.961	\$65.534
Ingresos central	USD	\$1.231.606	\$1.197.395	\$1.163.184	\$1.128.972	\$1.094.761	\$1.060.550	\$1.026.338	\$992.127	\$957.916	\$923.705
Costo de mantención	USD	\$179.330	\$179.994	\$180.660	\$181.328	\$181.999	\$182.672	\$183.348	\$184.027	\$184.707	\$185.391
Costos Fijos	USD	\$787.843	\$790.758	\$793.684	\$796.621	\$799.568	\$802.527	\$805.496	\$808.476	\$811.468	\$814.470
Costos central	USD	\$967.173	\$970.752	\$974.344	\$977.949	\$981.567	\$985.199	\$988.844	\$992.503	\$996.175	\$999.861
Se mantiene?	Si/No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No

12. Referencias

1. Cooperman, A., Eberle, A., & Lantz, E. (2021). Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105439.
2. Información entregada por la ENEL, corroborada con www.generadoras.cl y www.thewindpower.net
3. Life cycle assessment of electricity delivered from an onshore power plant based on Vestas V82-1.65 MW turbines, 2006.
4. Elaboración propia en base a: Rivarola, A., Torres, L., Rivarola, A. M., Berrios, G., Gardey Merino, M. C., Gatica, P., & Arena, A. P. (2011). Estudio y comparación de alternativas de fin de vida aplicadas a palas de aerogeneradores, empleando metodología de análisis de ciclo de vida. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.
5. Cooperman, A., Eberle, A., & Lantz, E. (2021). Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105439.
6. Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, 14(5), 1124.
7. DE AEROGENERADORES, P. A. L. A. S. (2021). *ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO*.
8. <https://www.diariomotor.com/energia-sostenibilidad/reutilizacion-palas-aerogeneradores-puentes-prefabricados/>
9. <https://www.xataka.com/energia/todos-alucinantes-usos-que-estamos-dando-a-palas-aerogeneradores-usados-puentes-a-torres-electricas>
10. <https://computerhoy.com/noticias/life/aspas-turbinas-eolicas-aparcamiento-bicis-940849>
11. Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, 14(5), 1124.
12. Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, 14(5), 1124.
13. DE AEROGENERADORES, P. A. L. A. S. (2021). *ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR EÓLICO*.

14. Kalkanis, K., Psomopoulos, C. S., Kaminaris, S., Ioannidis, G., & Pachos, P. (2019). Wind turbine blade composite materials-End of life treatment methods. *Energy Procedia*, 157, 1136-1143.
15. <https://www.revistaei.cl/2023/02/14/vestas-propone-una-solucion-circular-para-acabar-con-los-vertederos-de-palas-eolicas/>
16. Beauson, J., & Brøndsted, P. (2016). Wind turbine blades: an end-of-life perspective. *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, 421-432.
17. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>
18. Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Jensen, J. P. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111847.
19. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options
20. <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched>
21. <https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2021/vattenfall-commits-to-landfill-ban-and-to-recycle-all-wind-turbine-blades-by-2030>
22. Elaboración propia en base a planificación y coordinación con supervisor
23. Jiang, G., Wong, K. H., Pickering, S. J., Walker, G. S., & Rudd, C. D. (2006). Alignment of recycled carbon fiber and its application as a reinforcement. In *38th SAMPE Fall Technical Conference: Global Advances in Materials*
24. Elaboración propia en base a: datos de centrales y a “Life cycle assessment of electricity delivered from an onshore power plant based on Vestas V82-1.65 MW turbines”, 2006.
25. Elaboración propia en base a: Contrato retiro de residuos Hidronor Chile S.A., Parque Eólico Canela I y II, camión rampla 28 toneladas, camión amplirol, archivo interno
26. Contrato retiro de residuos Hidronor Chile S.A., Parque Eólico Canela I y II, camión rampla 28 toneladas, camión amplirol, archivo interno
27. Durán Suárez, J. (2021). Modelado en primeros principios y optimización de la producción energética de una planta eólica.
28. Elaboración propia en base a: “Contrato Mantenciones ENEL Green Power”, INTERNO

29. INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN, CNE, Mayo 2023
30. Elaboración propia en base a: Contrato retiro de residuos Hidronor Chile S.A., Parque Eólico Canela I y II, camión rampla 28 toneladas, camión amplirol, archivo interno
31. Elaboración propia en base a: cotización disco de corte con FRAGMENTA Concrete S.L.
32. Elaboración propia en base a: Contrato retiro de residuos Hidronor Chile S.A., Parque Eólico Canela I y II, camión rampla 28 toneladas, camión amplirol, archivo interno
33. Cotización N°624, Triturador Stokkermill D110, REVALUE SPA, septiembre, 2023.
34. Catalogo Stokkermill D110, ReValue
35. Villaseñor Palominos, B. E. (2021). Ingeniería de prefactibilidad para planta de reciclaje de materiales compuestos (FRP).
36. Cotización con Henan Mingjie Environmental Equipment Co., Ltd.
37. Estudio de remuneración Chile 2023, Michael Page.
38. Elaboración propia en base a Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2022). Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106202.
39. Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, 14(5), 1124.
40. Reporte análisis uso de palas de aerogenerador para complementar la producción de cemento, Polpaico & Enel, 29 de agosto 2023