

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA**

**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PARA  
AEROGENERADOR DE PALAS Y EJES HORIZONTALES FLOTANTES EN PROYECTO  
EOLICÓ REGIÓN DEL BIO BÍO**

Trabajo de Titulación para optar al Título de  
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno: Joaquín Alberto Guzmán Navarro

Profesor Guía: Guillermo Felipe Larson Muñoz



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE  
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Propuesta de plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para aerogeneradores de palas y ejes horizontales situados en proyectos de desarrollo del Bio Bio

Nombre del candidato(a): Joaquín Guzmán Navarro

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Concepción Departamento: México

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Guillermo Larson Muñoz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

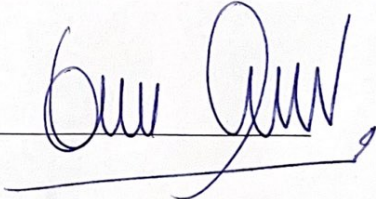
6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 05/03/26 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/03/26 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

*Dedicatoria: Familia, Amigos,  
Profesores y cada persona que me dio  
una palabra de apoyo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que nada, dar agradecimiento a mis padres Jaime Guzman e Ingrid Navarro, por se un apoyo incondicional y siempre brindándome lo mejor para mi durante este proceso en los cuales uno puede llegar a tener altos y bajos, pero siempre estaban ahí sus palabras de apoyo e inspiración.

Palabras de agradecimiento a mi abuela Carolina Fredes que siempre a sido un pilar fundamental, para mi desde mi crianza hasta hoy en día, siempre atenta a cualquier inconveniente que yo pueda tener y si bien no es de muchas palabras uno siente el cariño de la gente que lo quiere y lo aprecia.

No puedo dejar de lado a mis tíos Hugo Lagos e Orfelina Fredes, que fueron los que me acogieron durante estos 4 años de carrera en su casa, siempre me trataron como uno mas de sus hijos y siempre atentos a como me iba en la universidad y dándome todas las facilidades para que yo pudiera rendir bien en mis estudios.

A mi amigo que me brindo la Universidad Nicolas Palavecino, con el cual día a día fuimos creando una muy linda amistad dentro la universidad como fuera de ella, siempre mostrando preocupación, apoyo en los momentos malos y su buena voluntad para cualquier problema. Esperar que la amistad prospere por muchos años más.

Mi novia Katalina Arratia que el tiempo que llevamos juntos me a brindado mucha felicidad y energía para seguir adelante con todo este proceso, su apoyo incondicional y su cariño. Mucha ayuda también en el proceso de mi tesis en cuanto a la materia y siempre dándome una palabra de ánimo para seguir adelante.

Y uno de los agradecimientos más grande para mi profesor guía y jefe de carrera Guillermo Larson, este agradecimiento tremendo se debe a que el fue el cual me hizo tener otra visión de esta carrera o más allá de la carrera de la vida al yo tener pocas intensiones de terminar esta carrera o verme en un futuro trabajando en esto el fue el que aclaro todo mi panorama y siempre me tuvo una fe que ni yo me tenia para terminar este proceso. Así que nada más que palabras de agradecimiento para mi profesor que es una tremenda persona y que me llevo a la instancia donde estoy hoy en día.



## **RESUMEN**

El siguiente proyecto desarrollará una propuesta de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) aplicado a un aerogenerador flotante de palas y ejes horizontales, direccionad a un proyecto eólico marino en las costas de la región del Biobio, este estudio tendrá como objetivo principal optimizar las estrategias de mantenimiento para mejorar la disponibilidad operativa, reducción de costos asociados al mantenimiento y aumentar la confiabilidad de los componentes críticos.

Para llegar a lo anteriormente mencionado se realizó un análisis a los principales componentes del aerogenerador, enfocándonos en generador, convertidor, caja multiplicadora y motor de orientación, al ser componentes muy relevantes en el funcionamiento e impacto costos de operación y mantenimiento.

El estudio incluyo diferentes herramientas de ingeniería de mantenimiento entre ellas Análisis Modos y Efecto falla, El cual permitió tener en cuenta varios parámetros e información y a partir de aquí se evaluó la criticidad de los componentes.

Para finalmente hacer comparaciones del plan de mantenimiento actual con el que se está proponiendo, Analizando horas de mantenimiento anual y los costos asociados para cada componente. Este análisis los llevo a reafirmar que la propuesta hecha, que conlleva mantenimientos como preventivo y correctivo es una muy buena opción comparándolas. Los dará mejor viabilidad económica, reducción de intervenciones y prevención de fallas críticas.

**ÍNDICE****Tabla de contenido**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
Objetivo general:.....	2
Objetivos específicos:.....	2
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO. ....	6
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO. ....	6
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	7
1.4. BENEFICIOS DEL PROYECTO. ....	8
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
Que es un aerogenerador flotante: .....	10
Como funciona la energía eólica: .....	10
Beneficios y desafíos de la energía eólica flotante: .....	11
Historia y evolución de la energía eólica en Chile: .....	11
Potencial eólico flotante en la región del Biobío .....	13
Componentes de un aerogenerador: .....	13
¿Cuánta energía puede llegar a producir? .....	16
Averías comunes y métodos de diagnóstico.....	17
Tareas de mantenimiento más comunes:.....	19
Decreto que rige la energía renovables en Chile: .....	20
Qué es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) .....	21
Cuáles son las ventajas de este enfoque: .....	22
Cómo implementar el RCM.....	23
<b>CAPÍTULO III: SITUACIÓN ACTUAL DE.....</b>	<b>25</b>
Horas de Mantenimiento Anual mantenimiento histórico .....	26
Calculo Mantenibilidad.....	26
Cálculo de disponibilidad.....	27
<b>CAPÍTULO IV: DISEÑO Y SOLUCIÓN .....</b>	<b>28</b>
1.1 COMPONENTES CRITICOS ESCOGIDOS .....	29
5. ¿Por qué? .....	30

Árbol de fallas .....	31
. Cabeza del pescado .....	32
AMEF .....	33
Cálculo de criticidad .....	35
La gravedad.....	35
Probabilidad.....	35
Cálculo de criticidad por pieza .....	36
Razones para cambiar tipos de mantenimiento.....	37
Horas de mantenimiento anual propuesto.....	38
Calculo mantenibilidad con modificaciones propuestas.....	38
Cálculo de disponibilidad con las modificaciones propuestas.....	38
Planes de mantenimiento optimizados.....	39
. Plan utilizado históricamente.....	39
. Plan de mantenimiento optimizado propuesto .....	40
<b>CAPÍTULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>42</b>
1. Tablas de precios de mantenimiento actual .....	43
2.Tablas de precios de mantenimiento propuesto .....	44
Tabla comparativa de precios de los dos mantenimientos .....	46
Ahorro de Costos porcentualmente .....	46
<b>CONCLUSION Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>50</b>

### ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2-1</b>	Aerogenerador flotante a escala en el Abra del Sardinero	27
<b>Figura 2-2</b>	La energía eólica – Cuadernos de derechos para ingenieros	32
<b>Figura 2-3</b>	Que es el RCM y cómo funciona	38
<b>Figura 4-1</b>	Planteamiento de un 5 por que	49
<b>Figura 4-2</b>	Mapa conceptual de fallas	50
<b>Figura 4-3</b>	Diagrama de Ishikawa	52
<b>Figura 4-4</b>	Probabilidad	54
<b>Figura 5-1</b>	Grafico comparación de costos	64

### ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1</b>	Horas de mantenimiento anual histórico	44
<b>Tabla 2</b>	AMEF	52
<b>Tabla 3</b>	Tabla para cálculo criticidad (Gravedad)	54
<b>Tabla 4</b>	Tabla para cálculo de criticidad (probabilidad)	54
<b>Tabla 5</b>	Resultados criticidad	56
<b>Tabla 6</b>	Horas de mantenimiento anual propuesto	57
<b>Tabla 7</b>	Plan Utilizado históricamente	58
<b>Tabla 8</b>	Plan de mantenimiento optimizado propuesto	59
<b>Tabla 9</b>	Costos actuales de mantenimiento caja	61
<b>Tabla 10</b>	Costos actuales de mantenimiento convertidor	61
<b>Tabla 11</b>	Costos actuales de mantenimiento generador	62
<b>Tabla 12</b>	Costos actuales de mantenimiento motor	62
<b>Tabla 13</b>	Resumen costos totales	62
<b>Tabla 14</b>	Costos mantenimiento propuestos caja	62
<b>Tabla 15</b>	Costos mantenimiento propuesto generador	63
<b>Tabla 16</b>	Costos de mantenimiento propuestos convertidor	63
<b>Tabla 17</b>	Costos de mantenimiento propuesto motor de orientación	63
<b>Tabla 18</b>	Precios totales mantenimiento propuesto	63
<b>Tabla 19</b>	Tabla comparativa de los dos mantenimientos	64

**ÍNDICE DE ANEXOS**

**SIGLA Y SIMBOLOGÍA**

RCM	: Mantenimiento centrado en la confiabilidad.
MW	: Megawatt
%	: Porcentaje
rpm	: Revoluciones por minuto
PLC	: Controlador lógico programable
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SEIA	: Sistema de evaluación de impacto ambiental
CMMS	: Software de mantenimiento para el trabajador contemporáneo
D/S	: Decreto supremo
Hz	: Hercio
AMEF	: Análisis modo efecto falla



## **INTRODUCCIÓN**

En este proyecto lo que buscamos es dar a conocer y explicar más a fondo todo lo que conlleva la transición energética a nivel mundial, centrado nuestro proyecto en la región del Biobío, veremos que existen soluciones tecnológicas que nos permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia matrices energéticas más limpias y sostenibles.

En nuestro caso la energía eólica marina flotante se presenta como una gran alternativa estratégica para un país como Chile, debido a que contamos con extensas costas y vientos muy favorables para la instalación de estos aerogeneradores.

El siguiente proyecto abordará una propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), con todos los cálculos y estrategias que este conlleva, para un aerogenerador flotante de palas y ejes horizontales, centrado en 4 componentes críticos escogidos que son: caja multiplicadora, generador, convertidor y motor de orientación.

El objetivo será mejorar la disponibilidad operativa, reducir costos de mantenimiento y aumentar la vida útil del equipo contribuyendo a la viabilidad técnica y económica de proyectos eólicos marinos en el país.



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Implementar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), para mejorar la fiabilidad y disponibilidad del sistema mecánico del aerogenerador de pala y ejes horizontales, reduciendo las paradas imprevistas y los costos asociados.

### **Objetivos específicos:**

- . Analizar las causas principales de los fallos recurrentes del sistema mecánico en el aerogenerador de pala y ejes horizontales, con el fin de identificar los factores de riesgo y los componentes más críticos involucrados.
- . Identificar como podemos plantear nuestro (RCM) en el aerogenerador de pala de eje horizontal, para cada una de sus piezas mecánicas sabiendo que cada pieza puede tener un mantenimiento distinto a la otra.
- . Diseñar un nuevo plan de mantenimiento basado en la confiabilidad adaptado a los componentes del aerogenerador de pala de eje horizontal (palas, generador, sistema de freno, caja de engranajes, etc.), utilizando herramientas de monitoreo y análisis de datos para predecir fallos antes de que ocurran.
- . Evaluar la viabilidad económica de nuestro plan de mejora hacia el aerogenerador, comparándolo con los costos del plan de mantenimiento anterior y ver si es una buena opción nuestra mejora.

**CAPÍTULO I:**  
**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En los últimos años, ha aumentado el desarrollo y ha tomado gran realce todo lo que son las energías a partir de fuentes renovables a nivel mundial y en Chile, más puntualmente para nuestro proyecto en la región del bio bío.

La que se ha destacado para la instalación de parques eólicos por sus condiciones geográficas y climáticas favorables.

Sin embargo, a medida que la tecnología de aerogeneradores va actualizándose y llevando a cabo nuevos desafíos como lo son los aerogeneradores de palas y ejes horizontales flotantes, surgen nuevos desafíos y expectativas operacionales y uno de los principales es un mantenimiento eficiente de estos sistemas ya que operan en condiciones climáticas muy adversas y variables.

Se han visto casos que por la falta de criterios técnicos sólidos como lo es la confiabilidad a llegado a producir fallas no programadas, incremento de costos operativos y reducción de vida útil de los componentes y pérdidas significativas de producción de energía.

Frente a esta situación surge la inquietud y necesidad de diseñar una propuesta de mantenimiento que integre principios de confiabilidad para los aerogeneradores de palas y ejes horizontales flotantes para el proyecto en nuestra región del Biobío, esta propuesta permitirá mejorar toma de decisiones técnicas, reducir tiempo de inactividad y maximizar eficiencia energética del sistema.



### **1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.**

Chile ha avanzado sostenidamente en la incorporación de nuevas energías renovables, no tan convencionales destacando dentro de ellas los parques eólicos terrestres, pero con un gran crecimiento y dándose a conocer la eólica marina en las costas de nuestro país, que presenta grandes condiciones para la instalación de estos, lo que nos permite instalar aerogeneradores en zonas de mayor profundidad donde las estructuras fijas no son viables.

Sin embargo, uno de los mayores desafíos de la energía eólica claramente mayor en nuestro país es que aún no está toda la tecnología tan accesible, son sus altos costos de operación y mantenimiento, ya que al estar instalado en el mar tienen una mayor complejidad de acceso, corrosión, la fatiga estructural y la criticidad de los componentes electromecánicos.

A nivel industrial, el desarrollo de proveedores a nivel nacional de materiales estratégicos (como los utilizados en generadores y sistemas eléctricos de potencia), fortalece la cadena de suministros nacionales, las empresas como Aclara Resources resultara relevante para la disponibilidad futura de insumos tecnológicos claves.

### **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.**

El proyecto consiste en el desarrollo de un plan de mantenimiento optimizado basado en la criticidad (RCM) para los siguientes componentes del aerogenerador flotante:

Caja multiplicadora: Implementación de análisis de vibraciones, análisis de aceites y monitoreo térmico para detección temprana de desgaste de engranajes.

Generador: Monitoreo de temperatura de bobinas, descargas parciales, análisis de aislamiento y sensores de condición de rodamientos.

Convertidor: Inspecciones predictivas, monitoreo calidad de energía, control térmico y análisis de fallas electrónicas incipientes.

Motor de orientación: Control par, vibraciones, desgaste de coronas y lubricación inteligente.

El integra tecnologías como:

Sensores de monitoreo, equipos de análisis de vibraciones, equipos térmicos, equipo de análisis y tareas de lubricación.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.**

La energía eólica es una de las principales fuentes de energías renovables en el mundo y en nuestro país (Chile).

Su eficiencia y funcionamiento depende directamente de todo lo que conlleva su mantenimiento, el más usado en los aerogeneradores de palas y ejes horizontales es el mantenimiento preventivo, ya que tiene algunos componentes críticos que los pueden llevar a fallas inesperadas con pérdidas significativas de energía, altos costos de reparación y riesgos para la seguridad operativa.

El mantenimiento preventivo, como sabemos, muchas veces está sujeto a fechas exactas, sin hacer un análisis previo de la criticidad de los componentes o a la causa de los fallos, teniendo esto en cuenta podemos apreciar que este mantenimiento nos puede llevar a:

- . Intervenciones innecesarias solo porque llego la fecha del mantenimiento.
- . Incremento en los costos de operación y mantenimiento ya que todo está previamente programado.
- . Algunos componentes menores pasan desapercibidos provocando fallas antes o después de las fechas programadas.
- . Aumento de paradas no programadas.

Por estas razones y otras que veremos a lo largo de este proyecto podemos justificar la incorporación de la metodología RCM en este.

Esta metodología nos ayudara a rediseñar y mejorar el plan de mantenimiento de nuestros aerogeneradores tomando en cuenta puntos como:

- . Funciones reales de los componentes.
- . Los impactos que pueden provocar los fallos en la seguridad, disponibilidad y costos.
- . Tener más en cuenta los modos de falla más probables.
- . Tipo de mantenimiento que se le aplicara estratégicamente a cada componente.

La aplicación de nuestro RMC nos llevara:

- . Incrementar la disponibilidad y confiabilidad de nuestros equipos.
- . Optimizar los recursos de mano de obra y materiales.
- . Extender vida útil de componentes claves.
- . Minorizar el riesgo de fallos críticos y sus consecuencias económicas.

. Instaurar un plan de mantenimiento que sea más dinámico, eficiente y adaptándolo a lo que realmente necesita nuestro aerogenerador.

#### **1.4. BENEFICIOS DEL PROYECTO.**

##### Beneficios técnicos

- . Aumento de disponibilidad operativa del aerogenerador.
- . Reducción de fallas catastróficas en componentes críticos.
- . Extensión de la vida útil de nuestros componentes de alto costo.

##### Beneficios económicos

- . Disminución de costos con mantenimientos correctivos y paradas no programadas.
- . Optimización del uso de recursos humanos y logística en operaciones.
- . Mayor viabilidad económica de proyectos eólicos marinos flotantes.

##### Beneficios sociales y ambientales

- . Contribución directa a la descarbonización de la matriz energética de Chile.
- . Generación de empleos especializados en mantenimiento industria y eléctrico.
- . Impulso a la industria nacional asociada a materiales críticos y tecnologías para energías renovables, fortaleciendo la cadena de valor local.
- . Reducción de impacto ambiental al disminuir la frecuencia de intervenciones marinas y el riesgo de derrame o residuos por fallas mayores.

**CAPÍTULO II:**  
**MARCO TEÓRICO**

### **Que es un aerogenerador flotante:**

Son una tecnología en constante desarrollo que tiene como objetivo aprovechar el viento en alta mar para generar energía eléctrica. Esta innovación surge como una alternativa para aprovechar los recursos naturales de manera sostenible y sin afectar al medio ambiente.

Son estructuras que convierten la energía del viento en energía eléctrica. Estos pueden ser instalados en tierra firme o en el mar, pero los aerogeneradores flotantes ofrecen una serie de ventajas que los hacen una opción cada vez más popular en la industria de las energías renovables.

(AEROGENERADORES.NET, s.f.)



Ilustración 2-1 aerogenerador flotante a escala en el Abra del Sardinero

Fuente: [www.europapress.es](http://www.europapress.es)

### **Como funciona la energía eólica:**

La energía eólica es generada por la conversión del viento en electricidad o energía mecánica. Esto se logra a través de grandes turbinas eólicas ubicadas en áreas donde el viento sopla de manera constante y fuerte. Cuando el viento mueve las palas de la turbina, estas giran un rotor que está conectado a un generador principal, el cual a su vez produce electricidad.

## **Beneficios y desafíos de la energía eólica flotante:**

### Beneficios:

. Pueden ser instalados en aguas profundas, donde los molinos de viento tradicionales no pueden llegar. Esto permite aprovechar zonas con altas velocidades de viento que se encuentran lejos de la costa, lo que se traduce en una mayor producción de energía.

. Capacidad de adaptarse a condiciones climáticas extremas, como tormentas o huracanes. Al estar sujetos por cables a una boya anclada en el fondo del mar, pueden moverse con el viento y las olas, lo que reduce el impacto de las condiciones climáticas adversas.

. También tienen un impacto positivo en el medio ambiente. Al ser una fuente de energía renovable, no emiten gases de efecto invernadero ni contaminantes, lo que contribuye a la lucha contra el cambio climático.

### Desafíos:

. Uno de ellos es su costo, ya que aún son más caros que los molinos de viento terrestres. Esto se debe a la complejidad de su diseño y construcción, así como a la necesidad de tecnologías avanzadas para su instalación y mantenimiento

. La instalación de aerogeneradores flotantes requiere de barcos especializados y técnicas de anclaje en el fondo marino, lo que implica un cambio en la forma en que se llevan a cabo los proyectos de energías renovables teniendo personal calificado y especializado en el tema.

. Además, es necesario establecer regulaciones y protocolos de seguridad para garantizar la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente marino. (AEROGENERADORES.NET, s.f.)

## **Historia y evolución de la energía eólica en Chile:**

La energía renovable ha tomado un papel cada vez más importante en Chile en los últimos años. Uno de los principales recursos renovables es la energía eólica, la cual ha experimentado un crecimiento significativo en el país. Pero ¿cuándo llegó la energía eólica a Chile?

La energía eólica llegó a Chile en la década de 1990, cuando se instalaron los primeros aerogeneradores en la Isla de Chiloé. Estos aerogeneradores fueron instalados por la empresa española Enotecnia, y fueron los primeros en su tipo en América Latina.

A partir de la instalación de estos primeros aerogeneradores, la energía eólica comenzó a ganar terreno en Chile. En 2001, la empresa chilena La Geo instaló el primer parque eólico en el país, en la localidad de Canela, en la Región de Coquimbo. Este parque eólico contaba con 10 aerogeneradores y tenía una capacidad instalada de 1,5 MW.

Desde entonces, la energía eólica ha ido creciendo en Chile. En 2014, se inauguró el parque eólico más grande de América Latina, el Parque Eólico El Arrayán, ubicado en la Región de Coquimbo. Este parque eólico cuenta con 50 aerogeneradores y tiene una capacidad instalada de 115 MW.

En la actualidad, la energía eólica es una de las principales fuentes de energía renovable en Chile. Según datos del Ministerio de Energía, en 2020 la capacidad instalada de energía eólica en el país alcanzó los 2.004 MW, lo que representa el 7,3% de la capacidad total instalada en el país. (LaHistoria, 2024)

Hoy en día están llegando nuevas tecnologías como lo son los aerogeneradores flotantes que se ve reflejado en el proyecto Viento Azul Biobío es un proyecto a largo plazo, que tiene como objetivo operar en la década de 2030. Se necesitará un mínimo de 7 años para desarrollar Viento Azul Biobío. El proyecto estará operativo durante 25-30 años con potencial de extensión de vida. (Viento Azul Biobío SpA, 2024)

## **Potencial eólico flotante en la región del Biobío**

Se encuentra en un proyecto de gran escala en nuestra región el cual está avanzando de buena forma hasta el momento, el cual es “Viento Azul Biobío” un proyecto a largo plazo, que tiene como objetivo operar en la década de 2030. Se necesitará un mínimo de 7 años para desarrollar Viento Azul Biobío. El proyecto estará operativo durante 25-30 años con potencial de extensión de vida.

Escala comercial con una capacidad de generación de energía objetivo de entre 500 MW y 1 GW.

Viento Azul Biobío es una oportunidad para el futuro. La construcción y operación del proyecto tiene potencial para crear un número sustancial de empleos en la región del Biobío y Chile. Viento Azul Biobío también es un facilitador de otras tecnologías de descarbonización, como el hidrógeno y los combustibles sostenibles, en Chile. (Viento Azul Biobío SpA, 2024)

### **Componentes de un aerogenerador:**

#### Fundación

En cualquier aerogenerador, los cimientos sirven de apoyo a la torre, ya que el aerogenerador consta de varias piezas que pesan toneladas.

#### Torre

Se utiliza una torre para sostener el cubo del rotor y la góndola en la parte superior de la turbina de ventana. Los materiales utilizados para su construcción son el hormigón, el acero tubular o el enrejado de acero. En el diseño de esta turbina, la altura de la torre es muy importante porque la velocidad del viento aumenta con la altura. Por tanto, las torres más altas permiten a estas turbinas captar una gran cantidad de energía y producir más electricidad.

En general, la potencia de un aerogenerador aumenta al aumentar su altura y disminuir las turbulencias del viento. Existen diferentes torres para los aerogeneradores, como las tubulares, las de celosía, las inclinadas contra el viento y las independientes.

#### Palas para aerogeneradores

Estas palas se utilizan principalmente para extraer la energía cinética (KE) del viento y transformarla en energía mecánica. Este tipo de cuchillas están diseñadas con madera epoxi o poliéster reforzado con fibra de vidrio. Estas turbinas incluyen desde un mínimo de una hasta un máximo de varias palas, según el diseño.

La mayoría de los aerogeneradores de eje horizontal incluyen tres palas conectadas al buje del rotor. En el pasado, las turbinas de palas múltiples se utilizaban como palas simples, de dos o tres palas para moler y bombear agua, etc.

### Góndola

La góndola consta de varios componentes que sirven para hacer funcionar el aerogenerador de forma eficiente, como la caja de engranajes, los frenos, el controlador, los ejes de baja y alta velocidad y el generador. Se coloca en lo alto de una torre y en la góndola se coloca una veleta.

### Buje

El buje del rotor se utiliza para conectar el eje y la pala del rotor del aerogenerador. El cubo incluye cojinetes de pala, pernos, componentes internos y un sistema de paso. Están diseñados en hierro fundido, chapa de acero soldada y acero forjado. Están disponibles en dos tipos: cubo sin bisagra y cubo trapezoidal.

### Eje (o Eje Principal)

Función: El eje transmite la rotación de las palas hacia el generador.

### Sistema de Orientación

Función: El sistema de orientación ajusta la nacela para que las palas siempre estén alineadas con el viento.

### Caja de cambios

En los aerogeneradores, se utiliza una caja de engranajes para cambiar la potencia de alto par y baja velocidad que recibe una pala del rotor en potencia de bajo par y alta velocidad. Esta energía se utiliza para el generador. La caja de cambios está conectada entre el generador y el eje principal para aumentar la velocidad de rotación de 30-60 rpm a 1000-1800 rpm.

Los engranajes están hechos de diferentes materiales, como aleaciones de alta calidad, fundición de aluminio, acero inoxidable, etc. En los aerogeneradores se utilizan tres tipos de cajas de engranajes: planetarias, helicoidales y de tornillo sin fin.

## Generador

La energía mecánica rotativa de la caja de cambios se transmite al generador a través del eje. El generador funciona según la ley de inducción electromagnética de Faraday. De este modo, la energía pasa de ser mecánica a eléctrica. (Electrositio, 2022)

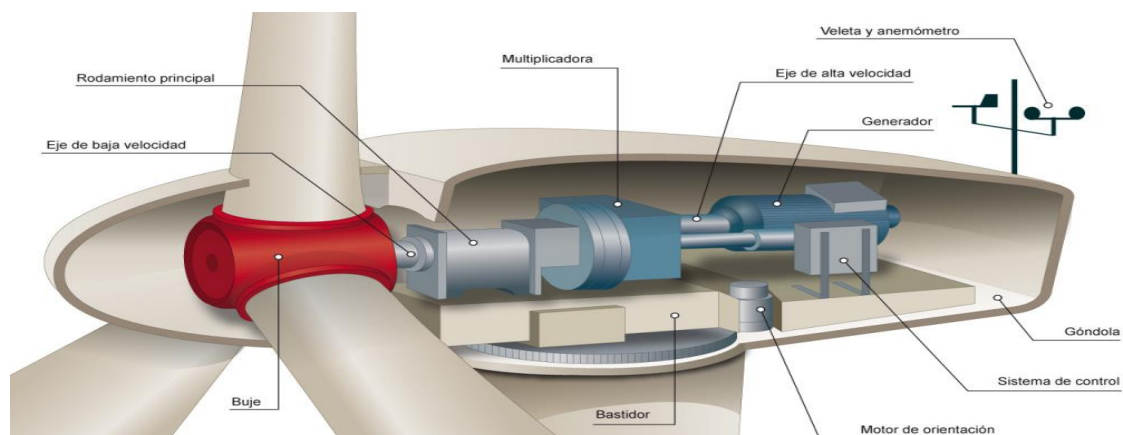


Ilustración 2-2 La energía eólica – Cuadernos de derechos para ingenieros  
Fuente: cuadernosdederechoparaingenieros.com

## **¿Cuánta energía puede llegar a producir?**

Se dice que puede llegar a producir en condiciones operáticas reales entre 20 GWh/año y 80GWh/año todo dependerá de su potencial nominal entre (5-15 MW), y así también La energía que es capaz de producir un aerogenerador varía de diferentes factores influyentes como:

**El diámetro del rotor:** este factor es directamente proporcional a la “área de barrido”, o lo que es lo mismo, la zona virtual que traza el rotor de manera perpendicular a la corriente de viento. Si aumenta el diámetro del rotor, aumenta la zona barrida, y así se optimiza el aprovechamiento de la fuerza del viento.

**La velocidad del viento:** el potencial eólico, es decir, la cantidad de energía que puede generar un aerogenerador se calcula dependiendo de la distribución de la velocidad eólica. Aquellos dispositivos que se colocan en sitios donde la velocidad llega a ser de 8 metros por segundo pueden producir entre el 75 y el 100% más de energía que donde el viento tiene una velocidad de 6 metros por segundos.

**La manera en la que está colocado el aerogenerador:** ningún aerogenerador se coloca de forma que pueda dificultar que el viento llegue a otro de los molinos.

**La disponibilidad del aerogenerador:** es decir, su propia capacidad de producir electricidad, ya que se en algún momento pueden encontrarse parados por algún tipo de mantenimiento o por seguridad ante vientos demasiado fuertes. Lo más común es que los aerogeneradores modernos cuenten con hasta más de un 98% de disponibilidad, puesto que no se suele necesitar más de una semana natural para realizar de mantenimiento y arreglo de posibles averías. (Total Energies, 2022)

## **Averías comunes y métodos de diagnóstico**

### 1.1 Sistema de control principal

Como uno de los componentes centrales de la turbina eólica, el sistema de control principal controla principalmente el funcionamiento normal y estable de la turbina eólica mediante el envío de juicios lógicos y comandos de acción. Después de una investigación y una investigación exhaustivas, se descubrió que el sistema de control de turbinas eólicas más común se basa principalmente en un diseño modular PLC y una conexión de bus de panel posterior. Aunque la aplicación de este método de control proporciona un fuerte soporte técnico para el funcionamiento eficiente de los aerogeneradores. Sin embargo, debido a la aplicación real de este método de control, a menudo ocurren varias fallas en los dispositivos electrónicos debido a la influencia de factores externos. Por ejemplo, la entrada y salida de la señal digital o analógica del propio módulo son anormales y la luz indicadora del módulo está apagada.

Para hacer frente a tales fallas, el personal de mantenimiento adopta principalmente el método de actualizar el programa o reemplazar directamente los componentes. Además, para el diagnóstico y mantenimiento de fallas externas que ocurren durante el funcionamiento de las turbinas eólicas, el personal de mantenimiento utiliza principalmente las indicaciones de alarma emitidas por el sistema SCADA de monitoreo de fondo para determinar rápidamente la ubicación de la falla de los dispositivos externos y luego tomar las medidas correspondientes.

### 1.2 Caja de cambios

La caja de engranajes es uno de los componentes importantes de la cadena de transmisión de turbinas eólicas doblemente alimentadas, y principalmente juega un papel importante en la conexión del eje principal y el generador. Cuando el personal de mantenimiento revisa la caja de cambios diariamente. No solo debemos prestar total atención a la inspección del sellado de varias partes de la tubería de la caja de cambios, la tapa del extremo, el orificio central, el enfriador, etc., sino que también debemos observar cuidadosamente si hay fugas de aceite o daños en la caja de cambios.

Abra regularmente el orificio de observación de la caja de cambios o use herramientas como un endoscopio para verificar el caudal del tubo de inyección de aceite de la caja de cambios y el tamaño del volumen de inyección de combustible, para evitar afectar el funcionamiento normal y estable del viento. turbina debido a una falla en la caja de cambios.

### 1.3 Sistema de lanzamiento

El sistema de paso no solo es el actuador más importante de la turbina eólica, sino también un factor clave que afecta la eficiencia del control de velocidad del sistema de turbina eólica y la tasa de utilización de la energía eólica. Como componente giratorio, el sistema de paso impone requisitos estrictos sobre el par de torsión de los pernos y dispositivos en el cubo y la estanqueidad de las conexiones. TorcStark ha llevado a cabo una investigación meticulosa sobre la solidez de conexión de dichos equipos y ha lanzado un *especial* hidráulica y tensor para la industria de la energía eólica.

De ese modo, se puede reducir la probabilidad de falla del sistema de paso debido a la estanqueidad deficiente de la conexión del perno. Para garantizar el funcionamiento normal y estable de los aerogeneradores, el personal de mantenimiento debe seguir estrictamente los requisitos para comprobar los componentes internos del cubo del sistema de paso durante el proceso de mantenimiento diario.

### 1.4 Generador

Como componente central indispensable de las turbinas eólicas, los generadores desempeñan principalmente un papel importante en la conversión de la energía mecánica rotatoria en energía eléctrica y en el suministro continuo de recursos eléctricos al sistema eléctrico. Con el aumento continuo de la capacidad instalada de turbinas eólicas en todo el mundo, el tamaño de los generadores de turbinas eólicas también está aumentando. Estos problemas han aumentado hasta cierto punto la dificultad de sellar y proteger los generadores. Debido a la operación continua del generador bajo diferentes condiciones de trabajo o condiciones electromagnéticas, habrá problemas tales como vibración excesiva del generador, calentamiento del cojinete, fractura de la varilla del rotor y daños en el aislamiento. Por lo tanto, el fortalecimiento de la inspección, el mantenimiento diario de los generadores, el descubrimiento y solución oportuna de problemas en la operación de los generadores promoverá en gran medida la mejora de la eficiencia operativa de los generadores de energía eólica.

### 1.5 Palas

Las palas son los componentes clave para absorber la energía eólica en los sistemas de generación de energía eólica. Generalmente, las palas están hechas de materiales compuestos reforzados con fibra. La detección de palas por parte de las empresas de energía eólica es principalmente para determinar con precisión si hay un problema con las palas mediante el análisis del modo de falla por cambio de tensión del material en diferentes entornos de tensión y el uso de equipos de detección de imágenes infrarrojas. Debido a problemas como grietas y descamación en la superficie de la pala, la distribución de la energía de radiación térmica se verá afectada.

Por lo tanto, con la ayuda del método de detección de imágenes infrarrojas, el personal puede detectar y analizar con precisión las grietas en la superficie de las piezas y componentes, y puede encontrar oportunamente las fallas de las palas durante la operación de la turbina eólica. Luego, tome medidas activas y efectivas de mantenimiento para garantizar que la operación segura y estable de las turbinas eólicas no se vea afectada. Además, si se descubre que la superficie de la hoja se ha desprendido durante la inspección, el personal primero debe usar pegamento para fijar la parte desprendida y, después de confirmar que la unión es firme, pulir la hoja para que coincida con la hoja original. forma. (STARK, 2023)

### **Tareas de mantenimiento más comunes:**

**Compruebe** regularmente si las cuchillas están agrietadas o dañadas – Las cuchillas pueden agrietarse con el tiempo debido a la exposición a la luz solar, las temperaturas extremas y la corrosión.

**Inspeccione** regularmente la caja de cambios para comprobar el desgaste – Las cajas de cambios pueden fallar tras un uso prolongado.

**Asegúrese** de que el generador funciona correctamente – Los generadores pueden dejar de funcionar por problemas mecánicos o eléctricos.

**Compruebe** regularmente si los rodamientos presentan signos de desgaste – Los rodamientos pueden dañarse si no se lubrican adecuadamente.

**Limpie** la góndola con regularidad – Las góndolas recogen el polvo y los residuos del aire, que pueden provocar graves riesgos para la salud.

**Mantenga** el rotor libre de vegetación – La vegetación puede quedar atrapada en las palas del rotor y provocar su rotura.

**Compruebe** regularmente si el cableado está dañado – El cableado puede provocar un cortocircuito y causar incendios.

**Cambie** el aceite con regularidad: el aceite ayuda a que los engranajes se muevan con suavidad. (Safety Culture, 2024)

### **Decreto que rige la energía renovables en Chile:**

D/S 40/12 Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA)

Para los efectos de este Reglamento se entenderá por:

a) Área de influencia: El área o espacio geográfico, cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el proyecto o actividad genera o presenta alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias.

b) Comisión de Evaluación: Comisión establecida en el artículo 86 de la Ley.

c) Ejecución de proyecto o actividad: Realización de obras o acciones contenidas en un proyecto o actividad tendientes a materializar una o más de sus fases.

d) Emisión: Liberación o transmisión al medio ambiente de cualquier contaminante por parte de un proyecto o actividad.

e) Impacto ambiental: Alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

Los impactos ambientales serán significativos cuando generen o presenten alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, conforme a lo establecido en el Título II de este Reglamento.

f) Ley: Ley N.º 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

g) Modificación de proyecto o actividad: Realización de obras, acciones o medidas tendientes a intervenir o complementar un proyecto o actividad, de modo tal que éste sufra cambios de consideración. (Chile, 2012)

## **Qué es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)**

Como su nombre lo indica, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es una metodología que busca determinar cuáles son las mejores estrategias de mantenimiento que pueden implementarse sobre los activos.

El RCM postula que ningún equipo está libre de experimentar una falla.

¿Cómo lo hace? A través de un abordaje integral y sistemático que analiza datos diversos (averías, costos de reparación, tiempos de inactividad, tasa de fallas) para detectar tendencias y patrones de rendimiento de los equipos.

Al tratarse de un enfoque centrado en datos, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad facilita la toma de decisiones informadas sobre la asignación de recursos, las tareas de mantenimiento y la gestión de activos.



Ilustración 2-3 Que es el RCM y cómo funciona  
Fuente: [www.fractal.com](http://www.fractal.com)

## **Cuáles son las ventajas de este enfoque:**

La puesta en marcha de una estrategia que contemple el método RCM aporta numerosos beneficios para las organizaciones, tanto en términos de productividad y seguridad, como de rentabilidad.

Incremento de la eficiencia.

Al centrarse en la identificación de las posibles fallas que puede tener activo y procurar evitar su aparición o mitigar las consecuencias negativas que pudiera causar, este enfoque impulsa la eficiencia global del sistema.

Además, permite que las organizaciones hagan un uso más efectivo de sus recursos, tanto humanos como económicos.

Impulso de la seguridad.

El Mantenimiento Basado Centrado en la Confiabilidad mejora la seguridad organizacional de dos maneras diferentes. Por un lado, al reducir los fallos, disminuye la probabilidad de que ocurran accidentes que pueden comprometer la integridad de los trabajadores y el funcionamiento de los equipos.

Por el otro, garantiza que todos los componentes que tienen que ver con el desempeño seguro de los activos estén correctamente instalados, supervisados y mantenidos.

Asimismo, promueve el desarrollo de acciones de que permitan la identificación de riesgos potenciales en fases iniciales.

Disminución de los costos asociados al mantenimiento.

Al detectar eventuales averías e identificar oportunidades de mejora, el RCM previene la aparición de fallos que podrían derivar en reparaciones costosas y, en el peor de los casos, en la necesidad de sustituir los equipamientos.

Este abordaje también minimiza los costos asociados a la mano de obra. Gracias a él, los responsables de mantenimiento pueden concentrarse en los componentes más críticos y no invertir tiempo en revisar cada uno de los elementos que conforman un activo.

Aumento de la disponibilidad de los activos.

Gracias al RCM, se reducen las probabilidades de que los equipos atraviesen por fallos y paradas inesperadas.

En consecuencia, este abordaje aumenta la disponibilidad de los equipos y sistemas clave, garantizando la continuidad de las operaciones.

Extensión del ciclo de vida de los equipos.

Finalmente, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad prolonga la vida útil de los equipamientos, ya que minimiza las posibilidades de que se produzcan averías repentinas.

Asimismo, reduce la cantidad de reparaciones que un equipo atraviesa a través del tiempo y, consecuencia, extiende su ciclo de vida. Al no pasar por acciones de reparación continuas, ni atravesar por reparos prematuros o sustituciones tardías de componentes, los activos duran mucho más tiempo.

### **Cómo implementar el RCM**

Para que una estrategia de RCM sea exitosa, es fundamental que esté en consonancia con las necesidades y objetivos específicos de la organización donde será puesta en marcha.

Por eso, una implementación exitosa debe contemplar algunos pasos clave.

#### 1.1 Identificar los activos y categorías de mantenimiento

El primer paso para la creación de un abordaje eficaz tiene que ver con la identificación de los equipos que necesitan mantenimiento y de las acciones que precisan ser ejecutadas sobre ellos.

Esto implica catalogar cada uno de los activos y clasificarlos en relación con su estado, criticidad y rol, analizando si precisan acciones de mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo o mantenimiento correctivo.

Por ejemplo, el mantenimiento correctivo puede ser necesario para pequeñas que no son críticas para el proceso ni registran fallos frecuentes y que presentan un cierto nivel de redundancia, mientras que el mantenimiento preventivo puede accionarse sobre elementos desgastados o con un patrón de fallos conocido.

En cambio, el mantenimiento predictivo puede ser necesario en activos críticos, con componentes complejos o averías aleatorias.

### 1.2 Evaluar el riesgo y priorizar las tareas de mantenimiento

Una vez analizados todos los activos, es preciso examinar el nivel de riesgo que representa cada uno a través de la evaluación de diversos parámetros, como el costo de reparación, las posibles consecuencias de una falla y la vida útil del equipo en función de su estado y antigüedad.

Cuando ya se conocen los riesgos asociados a cada activo, llega el momento de clasificar las tareas que revisten mayor criticidad.

### 1.3 Determinar procedimientos y calendarizar las tareas de mantenimiento

Este paso implica el diseño de instrucciones precisas y detalladas para cada una de las tareas y de una planificación que indique cuándo deben completarse estas actividades. La frecuencia tendrá que ver con la función del activo y su criticidad.

También es fundamental considerar quiénes serán los responsables de ejecutar estas tareas de manera eficiente e integral.

1.4 Supervisar y realizar ajustes: Finalmente, se debe evaluar el rendimiento de la estrategia desplegada a lo largo del tiempo y, de ser necesario, efectuar los ajustes necesarios. (consuman, 2023)

**CAPÍTULO III:**  
**SITUACIÓN ACTUAL DE**



La situación actual de nuestro aerogenerador de palas y ejes horizontales flotante, es la siguiente, se lleva muchos años trabajando con un mantenimiento histórico basado en rutinas preventivas y sin muchos más estudios hacia los componentes de los mantenimientos que pueden llegar a necesitar o en qué momento es lo ideal que se realicen no tomando en cuenta el estado real de las piezas o componentes del aerogenerador, esto nos lleva muchas veces a tener paradas imprevistas, solo por el hecho que todo está ligado a tiempos y fechas exactas del mantenimiento, con esto muchas veces si bien se tiene el componente funcionando correctamente se producen perdidas de dinero por demasiadas paradas anualmente. Muchas veces ni siquiera habiendo componentes con fallas ya que no se hacen estudios de criticidad para ver realmente los tiempos o como fallan los componentes.

En este informe solo los centraremos en 4 componentes de nuestro aerogenerador de palas y ejes horizontales flotante que serán los siguientes y su situación de horas de mantenimiento anualmente y con esto calcularemos su mantenibilidad y su disponibilidad.

### **Horas de Mantenimiento Anual mantenimiento histórico**

Con la siguiente tabla podemos ver las horas de fallas al año para nuestras 4 piezas y al nosotros tener la taza de fallas en nuestro AMEF podemos aproximar que las fallas no son tan recurrentes, pero como los aerogeneradores históricamente están asociados a mantenimientos preventivos tiene evaluaciones periódicas tienen un valor de **12 reparaciones por año.**

<b>Componente</b>	<b>mantenimiento</b>	<b>Horas mes</b>	<b>Reparaciones mes</b>	<b>Horas/año</b>
Generador	Preventivo	5 h	1	60 h
Caja multiplicadora	preventivo	5 h	1	60 h
Convertidor	preventivo	5 h	1	60 h
Motor de orientación	preventivo	3 h	1	36 h
<b>TOTAL</b>				<b>216 h</b>

Tabla 1 Horas de mantenimiento anual histórico  
Fuente: Elaboración propia

Que es la mantenibilidad

La mantenibilidad es el conjunto de características de un sistema que facilitan las tareas de mantenimiento y reparación. Estas características pueden incluir el diseño de componentes desmontables, la accesibilidad a las partes del sistema que se requieren mantener o reparar, la documentación técnica clara y completa, y la facilidad de uso de herramientas y equipo de mantenimiento. Y su fórmula es: (Rodrigues, 2023)

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}}$$

$$MTTR = \frac{216 h}{12 r} = 18 \text{ horas/fallo}$$

### **Cálculo de disponibilidad**

¿Cómo calcular la disponibilidad de mantenimiento?

Para este cálculo utilizaremos la Disponibilidad Operativa. La disponibilidad operativa es importante porque ayuda al gestor a comprender cuánto tiempo ha estado inactiva la máquina por reparaciones, por lo que es posible planificar estratégicamente paradas programadas y no sorprenderse.

Este indicador determinará si el equipo está disponible para órdenes de trabajo o solicitudes de trabajo o si se encuentra en estado operativo, es decir, nos informa sobre tiempos de parada en la línea de producción. (ENGEMAN, 2024)

Para calcular la disponibilidad, observe la siguiente fórmula:


$$\text{DISPONIBILIDAD} = \left( \frac{\text{TIEMPO EN PRODUCCIÓN}}{\text{TIEMPO EN PRODUCCIÓN} + \text{PARADAS NO PLANIFICADAS}} \right) \times 100$$

### **Calculo disponibilidad mantenimiento histórico**

$$D = \frac{8760 h}{8760 h + 216 h} = 0,97\%$$

Aunque la disponibilidad podemos ver que es alta es netamente por que los aerogeneradores tienen una disponibilidad alta pero siempre se puede mejorar tratando de llegar siempre al máximo posible.

**CAPÍTULO III:**  
**DISEÑO Y SOLUCIÓN**



En este capítulo daremos primero que nada a conocer los componentes del aerogenerador que serán utilizados para fines de estudio y cálculos del aerogenerador, herramientas que nos ayudarán a dar otra visión del panorama de mantenimiento de estos equipos, cálculos que darán a conocer los problemas reales de estas piezas y su criticidad verdadera. Con todo esto poder dar una propuesta de mantenimiento basada en datos reales.

## **1.1 COMPONENTES CRITICOS ESCOGIDOS**

### 1. Generador

El generador convierte la energía mecánica del rotor en electricidad. Si el generador falla o no funciona de manera eficiente, la producción de electricidad se detendría. Es uno de los componentes más costosos y con mayor impacto en la operación.

Pueden tener fallas como:

Rodamientos en mal estado, fugaz, amortiguadores de caucho en mal estado y corrosión

### 2. Caja de Engranajes (Multiplicadora)

La caja de engranajes aumenta la velocidad de rotación del eje y es clave para la transmisión de energía hacia el generador. Aunque algunos aerogeneradores modernos usan sistemas sin engranajes, las turbinas con caja de engranajes siguen siendo predominantes. El fallo en esta parte puede detener toda la operación de la turbina.

Lo habitual es que buscar **1500 rpm** para obtener una frecuencia de 50 Hz. Si se optase por velocidades menores habría que aumentar el número de pares de polos del generador, pero esto es más costoso.

Puede tener fallas como:

Rodamientos, acumulación de partículas magnéticas, lubricación, fugaz y aceite en mal estado.

### 3. Sistema de orientación

En este caso particular, el enfoque se encuentra en un sistema de orientación activo formado, como se ha mencionado anteriormente, por un grupo o mecanismo de orientación y un contador de torsión de los cables. • Mecanismo de orientación: formado por un sistema de motores eléctricos, multiplicadores y una corona de giro, el mecanismo se encarga de llevar a cabo el movimiento de

posicionamiento, activado por un controlador electrónico que realiza lecturas de la posición de la veleta múltiples veces por segundo mientras se lleva a cabo el giro.

#### 4. Convertidor

Controlar la potencia eléctrica generada por el aerogenerador y adaptarla a los requisitos de la red eléctrica a la que se ira la energía generada (Artavia, 2022)

### **5. ¿Por qué?**

¿Por qué el mantenimiento actual no es el más eficiente?

1. ¿Por qué el mantenimiento preventivo no es el más indicado para todos los sistemas o piezas que utilizaremos?

Porque no prevé adecuadamente cada una de las fallas que pueda tener las piezas o sistemas.

2. ¿Por qué no se adecua a las fallas reales?

Ya que está sujeto a intervalos fijos de tiempo y no al estado real del componente o su criticidad.

3. ¿Por qué se usa un mantenimiento basado en intervalos fijos y no centrado en su condición?

Porque no se ha realizado un RCM para evaluar su criticidad y su condición para priorizar acciones de mantenimiento según sus fallos.

4. ¿Por qué no se utilizó antes un RCM?

Porque el mantenimiento preventivo que se utiliza se diseñó para minorizar costos inmediatos y no contempla una optimización de los costos a largo plazo.

5. ¿Por qué se priorizo minorizar costos inmediatos y no ver más allá de lo costos q se podían optimizar a largo plazo?

Porque ya que no es una industria tan antigua no se reconocen tantos datos históricos por lo que no se tomó en cuenta una cultura enfocada en la confiabilidad operativa.



Ilustración 4-1 planteamiento de un 5 por que  
Fuente: Elaboración propia

## Árbol de fallas

. Falta de visión RCM para el mantenimiento

A. Falta de conocimiento RCM en la industria

A1. Falta de capacitación del personal en el enfoque RCM y su análisis

A2. Mantenimiento basado en rutinas históricas todavía se sigue trabajando con el mantenimiento preventivo y no se hace un análisis de los sistemas.

B. Falta de recursos técnicos y económicos

B1. No se invierte en personal especializado en RCM

B2. Falta de asignación de presupuestos para invertir en software y especializar al personal en software

C. Resistencia al cambio organizacional

C1. Una cultura de muchos años a llevar un mantenimiento preventivo de tener los mantenimientos ligados a tiempos determinados que en situaciones llevan a tener pérdidas de tiempo que no deberían pasar.

C2. Falta de compromiso de la gerencia para impulsar cambios estructurales en el mantenimiento

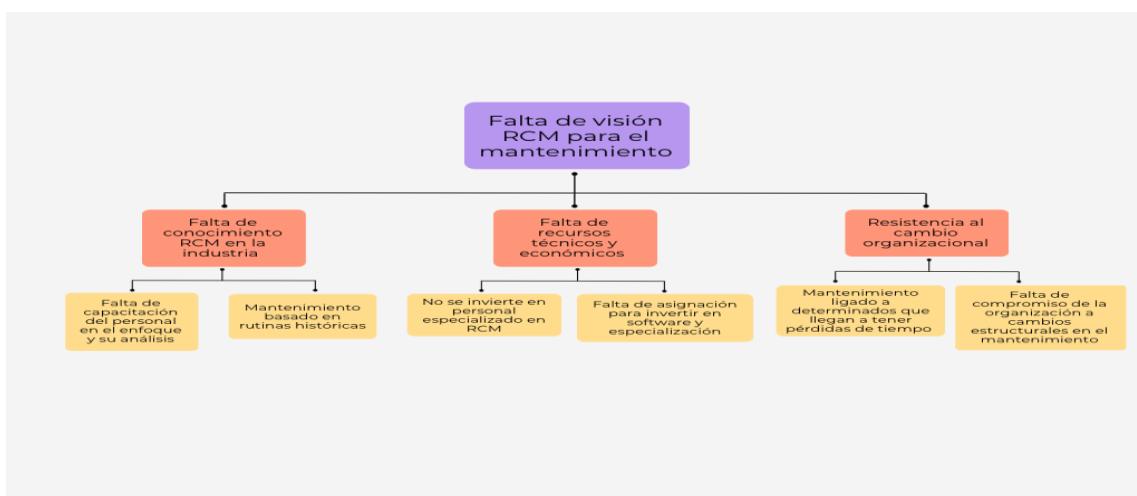


Ilustración 4-2 Mapa conceptual de fallas  
Fuente: Elaboración propia

## **. Cabeza del pescado**

### 1. Mantenimiento histórico

#### 1.1 Maquina:

. Equipos poco actualizados: A la realidad que se vivirá con los aerogeneradores flotantes

. Diseños inadecuados: Piezas o sistemas no adecuados para las condiciones

#### 1.2 Método

. Falta de protocolos estandarizados: procedimientos con falta de claridad o inexistentes

. Intervalos de mantenimientos incorrectos: Ya que está ligado al mantenimiento preventivo

#### 1.3 Mano de obra

. Falta de capacitación técnica: personal poco especializados en energía eólica

. Errores en montajes de piezas:

#### 1.4 Materiales

Repuestos de baja calidad:

Demora de llegada de repuestos: ya que la mayoría se deben mandar a pedir al extranjero

#### 1.5 Medición

Falta de herramientas de medición hechas para aerogeneradores

Falta de monitoreo continuo

#### 1.6 Medio ambiente

Condiciones climáticas extremas

Corrosión por humedad o salinidad

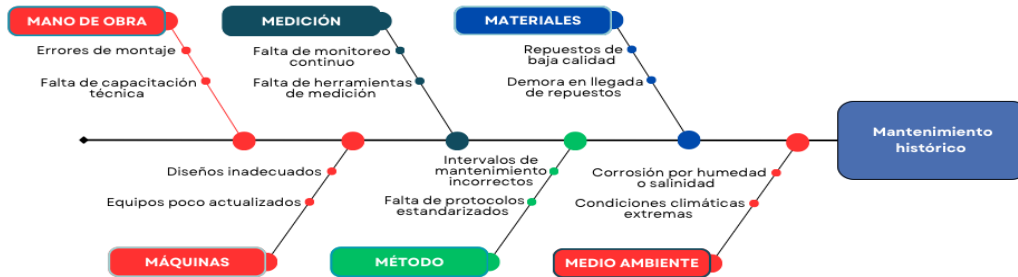


Ilustración 4-3 Diagrama de Ishikawa  
Fuente: Elaboración propia

**AMEF**

Pieza	Función	Falla funcional	Causa falla	Efecto falla	Tiempo en fallar
Caja multiplicadora	Aumentar la velocidad de rotación del eje de baja velocidad (rotor) a una velocidad adecuada para el generador	No logra transmitir o incrementar la velocidad del eje de entrada.	Desgaste de engranajes, rotura de dientes, pérdida de lubricante, contaminación del aceite, desalineación de ejes.	Pérdida total o parcial de transmisión de potencia, vibraciones excesivas, parada del aerogenerador, riesgo de daños secundarios en ejes o generador.	Un estimado entre 8-15 años para su Fallo en condiciones Ideales, pero ya que Nuestro equipo No las tiene Derivaremos a que ronde entre 6-12
Generador	Convertir la energía mecánica del eje de alta velocidad en energía eléctrica.	No genera o genera fuera de los parámetros eléctricos normales.	Cortocircuito en bobinas, falla de aislamiento, sobrecalentamiento, desgaste de rodamientos, desbalance del rotor.	Pérdida de producción eléctrica, daños en el convertidor, disparo del sistema de protección, posible incendio o daño estructural interno.	Un estimado entre 6-8 años para su Fallo en condiciones ideales, pero ya que Nuestro equipo No las tiene Derivaremos a que ronde entre 4-6

Convertidor	Adaptar la corriente generada (variable en frecuencia y voltaje) a la red eléctrica (corriente alterna de frecuencia constante).	No regula o interrumpe la conversión de energía	Falla en módulos IGBT, sobre temperatura, fallo en ventilación o control electrónico, cortocircuito interno.	Desconexión del generador, pérdida de sincronización con la red, interrupción en la generación, daños eléctricos secundarios.	Un estimado de 2-4 años en Condiciones ideales pero ya que no las tiene ronda entre 1-2 años
Motor de orientación	Girar la góndola para mantener el rotor orientado en la dirección óptima del viento.	No ajusta o mantiene la orientación adecuada.	Fallo del motor eléctrico, desgaste de engranajes, fallo del freno de orientación, sensor de dirección del viento defectuoso.	Reducción del rendimiento energético, aumento de esfuerzos mecánicos en palas y torre, riesgo de vibraciones y fatiga estructural.	Un estimado de 3-6 años en Condiciones ideales, pero ya que Nuestro equipo No las tiene Derivaremos a que ronde entre 1-3

Tabla 2 AMEF  
Fuente: Elaboración propia

## Cálculo de criticidad

### La gravedad

Este parámetro se centra en diferentes aspectos relacionados con el impacto que un posible fallo podría tener sobre la salud, la seguridad, el medio ambiente y la operatividad (BibLus, 2024)

	<b>Seguridad</b>	Medio ambiente	Operatividad	Costes
4	Muertes o lesiones graves	Impacto grave en el medio ambiente	Interrupción de la línea de producción	Altos
3	Lesiones o enfermedades graves	Impacto notable en el medio ambiente	Capacidad productiva extremadamente reducida	medios
2	Lesiones o enfermedades leves	Impacto leve en el medio ambiente	Capacidades productivas limitada	Bajos
1	Sin lesiones	Poco impacto en el medio ambiente	interrupción mínima de la producción	Casi inexistentes

Tabla 3 gravedad  
Fuente: Elaboración propia

### Probabilidad

Nuestro segundo parámetro será la probabilidad que se manifieste. Para su determinación podríamos utilizar, la siguiente tabla de valores (BibLus, 2024)

5	Frecuencia (una vez al mes o más)
4	Probable (una vez cada 1-2 años)
3	Ocasional (una vez cada 2 a 5 años)
2	Remoto (una vez cada diez años)
1	Muy improbable (una vez cada 20 años)

Tabla 4 Probabilidad  
Fuente: Elaboración propia

<b>P R O B A B I L I D A D</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>24</b>	<b>30</b>	<b>36</b>
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>24</b>
	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>18</b>
	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	<b>G R A V E D A D</b>					

Ilustración 4-4 Tecnologías de la información y estrategias  
anibalgoicochea.com

## **Cálculo de criticidad por pieza**

### 1.Caja multiplicadora:

Gravedad de 4 ya que, si bien no presenta mayores riesgos seguridad y medio ambiente, tiene gran influencia en lo que es la parada completa del equipo y teniendo riesgos secundarios.

Probabilidad será de 2 ya que en nuestra tasa de fallos podemos ver que puede fallar entre los 6-12 años.

Con los datos ya mostrados llevándolos a la tabla de criticidad podemos decir que la criticidad de la caja multiplicadora es **moderada**.

### 2.Generador:

Gravedad de 4 ya que presenta daños de seguridad al poder provocar corto circuitos durante su mantención, además producirá una parada completa del sistema y daños menores al medio ambiente, pero pueden llegar a pasar.

Probabilidad será de 3 ya que su tasa de fallos ronda entre los 2-5 años que están entre el rango señalado

Con los datos ya mostrados llevándolos a la tabla de criticidad podemos decir que la criticidad de la caja multiplicadora es **moderada**.

### 3.Convertidor:

Gravedad de 4 ya que al estar sin funcionamiento el convertido no podremos tener generación de energía eléctrica para hacerla llegar a nuestras fuentes receptoras de energía eléctrica, Esto conllevara altos costos de pérdidas económicas, en seguridad podemos tener problemas con los cortocircuitos y poder generar accidentes a la hora del mantenimiento.

Probabilidad será de 4 ya que su tasa de fallos ronda entre los 1-2 años que están entre el rango señalado

Con los datos ya mostrados llevándolos a la tabla de criticidad podemos decir que la criticidad de la caja multiplicadora es **alta**.

Motor de orientación:

#### 4. Motor de orientación

Gravedad de 2 ya que con el mal funcionamiento del motor de orientación solo reducción de la capacidad de generar energía, los costes serán relativamente bajos y no se verán daños ni al medio ambiente ni a la seguridad.

Probabilidad será de 3 ya que su tasa de fallos ronda entre los 2-5 años que están entre el rango señalado

Con los datos ya mostrados llevándolos a la tabla de criticidad podemos decir que la criticidad de la caja multiplicadora es **moderada**.

<b>Pieza</b>	<b>gravedad</b>	<b>probabilidad</b>	<b>criticidad</b>
Caja multiplicadora	4	2	Moderada
Generador	4	3	Moderada
Convertidor	4	4	Alta
Motor de orientación	2	3	moderada

Tabla 5 Criticidad  
Fuente: Elaboración propia

#### **Razones para cambiar tipos de mantenimiento**

Por los datos dados y recopilados dentro de lo que llevamos de informe propondremos un cambio al tipo de mantenimiento de las siguientes piezas y daremos un paso por cálculos comparativos con el mantenimiento anterior y los cambios serán los siguientes:

##### 1. Generador:

Mantendrá su enfoque **preventivo** ya que, aunque tenga una criticidad moderada. Tiene puntos a tomar en cuenta como para tener un mantenimiento parámetros de tiempo de forma regular como:

- Sus tiempos de tasa de falla no son tan largos
- No generara la energía recomendada
- Riesgos de incendios ya que puede generar cortos circuitos

-Riesgos para el personal de quemaduras o caídas

## 2.Caja multiplicadora:

La caja multiplicadora pasara de un enfoque de un mantenimiento preventivo a uno **correctivo** ya que con todos los datos vistos en nuestro AMEF y cálculos de criticidad realizados anteriormente podemos decir que es un equipo que tiene una criticidad moderada pero no obstante pudimos ver algunos puntos como:

-Su tasa de fallas es entre 6-12 con lo que podemos decir que realizarle un mantenimiento preventivo no tiene mucha lógica ya que sus fallas casi inexistentes en un corto plazo como para tenerlo sujeto a un mantenimiento tan secuencial como el preventivo.

- Sus fallas serán relativamente fácil de detectar ya que estarán muy a la vista como perdida de la transmisión, vibraciones o paradas o excesivas paradas del aerogenerador.

-Su modo de fallos no comprende tampoco efectos de seguridad graves para el personal.

## 3.Convertidor:

Mantendrá su enfoque **preventivo** ya que, aunque tenga una criticidad moderada. Tiene puntos a tomar en cuenta como para tener un mantenimiento parámetros de tiempo de forma regular como:

-Sus tiempos de tasa de falla no son tan largos.

-No generara la energía recomendada.

-Riesgos de incendios ya que puede generar cortos circuitos.

-Riesgos para el personal de quemaduras o caídas.

## 4.Motor de orientación:

Cambiará su enfoque de un mantenimiento preventivo a uno **correctivo** ya que con los datos recopilados tanto en el AMEF como en el cálculo de la criticidad podemos decir q un equipo que comprenderá una criticidad moderada de tal forma que no requiere de mantenimiento programados ya que:

-Su falla no es tan crucial para el funcionamiento en si del aerogenerador solo reducirá su producción.

-No presentara grandes riesgos para el personal.

-Fallos se pueden dar a conocer según una inspección visual ya que comprenden vibraciones.

## Horas de mantenimiento anual propuesto

Componente	Mantenimiento	Horas mes o año	Reparaciones mes o año	Horas/año
Generador	Preventivo	5 h al mes	1	60 h
Caja multiplicadora	Correctivo	24 horas cada 8 años y esto para llevarlo a meses me daría 15 minutos por mes	Estimación de cada 8 años	3 h
Convertidor	Preventivo	5 h al mes	1	60 h
Motor de orientación	Correctivo	24 horas cada 8 años y esto para llevarlo a meses me daría 15 minutos por mes		
TOTAL				126 h

Tabla 6 Horas de mantenimiento anual  
Fuente: Elaboración propia

## Calculo mantenibilidad con modificaciones propuestas

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}}$$

$$MTTR = \frac{126h}{12r} = 10,5 \text{ horas/fallo}$$

## Cálculo de disponibilidad con las modificaciones propuestas

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \left( \frac{\text{TIEMPO EN PRODUCCIÓN}}{\text{TIEMPO EN PRODUCCIÓN} + \text{PARADAS NO PLANIFICADAS}} \right) \times 100$$

$$D = \frac{8760 \text{ h}}{8760 \text{ h} + 126 \text{ h}} = 0,98\%$$

## Planes de mantenimiento optimizados

**Plan utilizado históricamente**

Componente	criticidad	Tipo de mantenimiento	tareas	Piezas que podrían ser cambiadas	frecuencia
Caja multiplicadora	Moderada	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Análisis de vibraciones</li> <li>. Análisis de aceites</li> <li>. Revisión de sellos</li> <li>. Control de temperatura</li> <li>. inspección visual de engranajes</li> </ul>	Rodamiento, engranajes dañados, sellos, retenes, filtros de aceite, sensores de temperatura	<p>Trimestral (Vibraciones, temperatura)</p> <p>Semestral (Aceite)</p>
Generador	Moderada	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Termografía infrarroja</li> <li>. Medición de resistencia de aislamiento</li> <li>. Limpieza de ventilación</li> <li>. Revisión de rodamientos</li> <li>. Control de ruidos</li> </ul>	Rodamientos, ventiladores, sensores de temperatura, bornes o conectores	Trimestral
Convertidor	Alta	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Termografía de modulo</li> <li>. Inspección de conexiones y bornes</li> <li>. Limpieza de filtros</li> <li>. Monitoreo armónicos y alarmas</li> <li>. Revisión de firmware/diagnostico</li> </ul>	Ventiladores, filtros de aires, fusibles	<p>Mensual (Visual, limpieza)</p> <p>Trimestral (Termografía, Diagnostico)</p>
Motor de orientación	Moderada	Correctivo	Diagnostico funcional ante falla, reparación engranajes y rodamientos, logística	Rodamientos, Ventilador y sensores	

Tabla 7 Plan utilizado históricamente  
Fuente: guidetofloatingoffshorewind.com

**. Plan de mantenimiento optimizado propuesto**

Componente	criticidad	Tipo de mantenimiento	Tareas	Piezas que podrían ser cambiadas	frecuencia
Caja multiplicadora	Moderada	Correctivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Diagnostico en sitio ante falla</li> <li>. Inspección engranajes</li> <li>. Reparación parcial o cambio de la pieza</li> <li>. Revisión de sellos y alineación</li> </ul>	Rodamientos, engranajes dañados, sellos y retenes, filtros de aceite	Solo ante falla Intervención cada 5-7 años esperada
Generador	Moderada	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Termografía infrarroja</li> <li>. Medición de resistencia de aislamiento</li> <li>. Limpieza de ventilación</li> <li>. Revisión de rodamientos</li> <li>. Control de ruidos</li> </ul>	Rodamientos, ventiladores, sensores de temperatura	Trimestral (Termografía, Vibraciones) Semestral (Aislamiento, Limpieza)
Convertidor	Alta	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Termografía de modulo</li> <li>. Inspección de conexiones y bornes</li> <li>. Limpieza de filtros</li> <li>. Monitoreo armónicos y alarmas</li> <li>. Revisión de firmware/diagnostico</li> </ul>	Ventiladores, filtros de aire, fusibles	Mensual (Visual, limpieza)  Trimestral (Termografía, Diagnostico) Anual)

Motor de orientación	Moderada	Correctivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Diagnostico funcional</li> <li>. Reparación de engranajes</li> <li>. Logística</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Motor electrico yaw</li> <li>. Engranajes</li> <li>. Reductores</li> <li>. Frenos del yaw</li> <li>. Sensores</li> </ul>	<p>Solo ante falla</p> <p>Intervención cada 2-3 años</p>
----------------------	----------	------------	--	---	--

Tabla 8 Plan utilizado históricamente  
Fuente: [guidetofloatingoffshorewind.com](http://guidetofloatingoffshorewind.com)

**CAPÍTULO V:**  
**EVALUACIÓN ECONÓMICA**

En este último capítulo y uno de los más importantes ya que tuvimos un recorrido muy extenso de datos, comparaciones y cálculos a lo largo de él.

Llegamos a la evaluación económica donde pondremos a disposición datos numéricos que daremos como comparación del mantenimiento anterior de nuestro equipo con el mantenimiento que estamos proponiendo con las nuevas modificaciones.

Daremos a conocer cuál de los dos mantenimientos tiene mejor viabilidad económica tomando en cuenta nuestros números y datos encontrados a lo largo de nuestro informe.

Ahora daremos a conocer precios aproximados del mantenimiento de un solo aerogenerador de algunos mantenimientos:

Teniendo en cuenta estos precios aproximados de estos tipos de mantenimiento que son el preventivo y el correctivo que serán utilizados en este proyecto y los componentes que tomamos en cuenta nosotros son de los más críticos y son estos 4 caja multiplicadora, generador, convertidor y motor de orientación.

### **1. Tablas de precios de mantenimiento actual**

. Caja multiplicadora (preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Análisis de vibraciones (4)	3.500.000	1.300.000	4.800.000
Análisis de aceites (2)	1.000.000	800.000	1.800.000
Sellos y fugas (4)	1.100.000	600.000	1.700.000
Control de temperatura (4)	900.000	400.000	1.300.000
Inspección de engranajes (1)	1.400.00	600.000	2.000.000
<b>Total, anual caja</b>	<b>8.000.000</b>	<b>3.700.000</b>	<b>11.700.000</b>

Tabla 9 Costos Caja multiplicadora  
Fuente: Elaboración propia

Generador (Preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Termografía (4)	2.100.000	1.200.000	3.300.000
Aislamiento (2)	900.000	500.000	1.400.000
Limpieza ventilación (2)	700.000	400.000	1.100.000
Rodamiento (2)	1.200.000	600.000	1.800.000
Vibraciones (4)	1.200.000	500.000	1.700.000
Total, anual generador	6.100.000	3.200.000	<b>9.300.000</b>

Tabla 10 Costos caja multiplicadora  
Fuente: Elaboración propia

Convertidor (Preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Visual + limpieza (12)	2.500.000	1.600.000	4.100.000
Termografía (4)	2.000.000	1.500.000	3.500.000
Bornes (4)	1.200.000	600.000	1.800.000
Armoniacos/diagnósticos (4)	1.800.000	1.500.000	3.300.000
Firware/pruebas (1)	900.000	600.000	1.500.000
Total, anual convertidor	8.400.000	5.800.000	<b>14.200.000</b>

Tabla 11 Costos convertidor  
Fuente: Elaboración propia

Motor de orientación (Preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Lubricación (4)	1.000.000	500.000	1.500.000
Holguras (4)	900.000	400.000	1.300.000
Pruebas giro (4)	900.000	300.000	1.200.000
Frenos (2)	1.000.000	600.000	1.600.000
Cableado/sensores (2)	700.000	400.000	1.100.000
Total, anual motor	4.500.000	2.200.000	<b>6.700.000</b>

Tabla 12 Costos motor de orientación  
Fuente: Elaboración propia

Resumen de precios totales del mantenimiento

Componente	Personal (CLP)	Repuestos (CLP)	Total (CLP)
Caja multiplicadora	8.000.000	3.700.000	11.700.000
Generador	6.100.000	3.200.000	9.300.000
Convertidor	8.400.000	5.800.000	14.200.000
Motor de orientación	4.500.000	2.200.000	6.700.000
Total, general	27.000.000	14.900.000	<b>41.900.000</b>

Tabla 13 Resumen precios totales  
Fuente: Elaboración propia

**2.Tablas de precios de mantenimiento propuesto**

Caja multiplicadora (Correctivo)

Tarea	Personal (CLP)	Costos repuestos (CLP)	Total (CLP)
Diagnostico ante falla	450.000	150.000	600.000
Reparación mecánica parcial	1.500.000	1.200.000	2.700.000
Cambio de aceite	150.000	300.000	450.000
Total, anual caja	2.100.000	1.650.000	<b>3.750.000</b>

Tabla 14 Costos caja multiplicadora mantenimiento propuesto  
Fuente: Elaboración propia

Generador (Preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Termografía (4)	2.100.000	1.200.000	3.300.000
Aislamiento (2)	900.000	500.000	1.400.000
Limpieza ventilación (2)	700.000	400.000	1.100.000
Rodamiento (2)	1.200.000	600.000	1.800.000
Vibraciones (4)	1.200.000	500.000	1.700.000
Total, anual generador	6.100.000	3.200.000	<b>9.300.000</b>

Tabla 15 Costos generador plan de mantenimiento propuesto  
Fuente: Elaboración propia

### Convertidor (Preventivo)

Tarea	Costo personal	Costos repuestos	Total
Visual + limpieza (12)	2.500.000	1.600.000	4.100.000
Termografía (4)	2.000.000	1.500.000	3.500.000
Bornes (4)	1.200.000	600.000	1.800.000
Armoniacos/diagnósticos (4)	1.800.000	1.500.000	3.300.000
Firware/pruebas (1)	900.000	600.000	1.500.000
<b>Total, anual convertidor</b>	<b>8.400.000</b>	<b>5.800.000</b>	<b>14.200.000</b>

Tabla 16 Costos convertidor plan de mantenimiento propuesto  
Fuente: Elaboración propia

### Motor de orientación (Correctivo)

Tarea	Personal (CLP)	Costes repuestos (CLP)	Total (CLP)
Diagnostico funcional	400.000	150.000	550.000
Reparación engranajes/rodamientos	600.000	400.000	900.000
Logístico	450.000	0	450.000
<b>Total, anual motor</b>	<b>1.450.000</b>	<b>550.000</b>	<b>1.900.000</b>

Tabla 17 Costos motor de orientación plan de mantenimiento propuesto  
Fuente: Elaboración propia

### Precios totales del mantenimiento propuesto

Componente	Personal (CLP)	Repuestos (CLP)	Total (CLP)
Caja multiplicadora	2.100.000	1.650.000	11.700.000
Generador	6.100.000	3.200.000	9.300.000
Convertidor	8.400.000	5.800.000	14.200.000
Motor de orientación	1.450.000	550.000	6.700.000
<b>Total, general</b>	<b>18.050.000</b>	<b>11.200.000</b>	<b>29.250.000</b>

Tabla 18 Precios totales del mantenimiento propuesto  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla comparativa de precios de los dos mantenimientos**

Componente	Opción 1	Opción 2	Diferencia de precios	Mejor opción
Caja multiplicadora	11.700.000	3.750.00	7.950.000	Opción 2
Generador	9.300.000	9.300.000	0	Se mantiene
Convertidor	14.200.000	14.200.000	0	Se mantiene
Motor de orientación	6.700.000	1.900.000	4.800.000	Opción 2
<b>Total, general</b>	<b>41.900.000</b>	<b>29.250.000</b>	<b>12.650.000</b>	<b>Opción 2</b>

Tabla 19 Tabla comparativa de precios de los dos mantenimientos  
Fuente: Elaboración propia

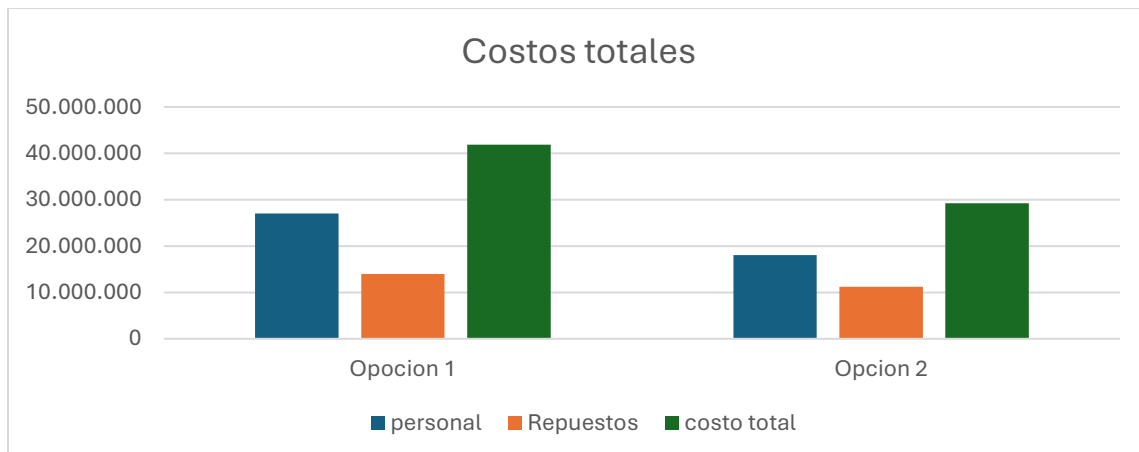


Ilustración 5-1 Grafico comparación de costos  
Fuente: Elaboración propia

**Ahorro de Costos porcentualmente**

Personal:

$$\frac{27.000.000 - 18.050.000}{27.000.000} \times 100$$

Ahorro En personal = 33.15% Podemos ver una buena mejora en lo económico con el mantenimiento propuesto

Repuestos:

$$\frac{14.900.000 - 11.200.000}{14.900.000} \times 100$$

Ahorro en repuestos = 24,8% Se puede ver una buena opción en los económico con el mantenimiento propuesto

Costos totales:

$$\frac{41.900.000 - 29.250.000}{41.900.000} \times 100$$

Ahorro total anual = 30,2%



## **CONCLUSION Y RECOMENDACIONES**

En el transcurso de este informe planteamos el desarrollo de un plan de mantenimiento optimizado para aerogeneradores marinos flotantes representan un aporte clave para la consolidación de la energía eólica en Chile. Al enfocarse en los componentes más críticos y aplicar estrategias como el RCM para basarlos en las condiciones reales de los aerogeneradores y pudimos mejorar la confiabilidad, disponibilidad y rentabilidad de este tipo de instalaciones.

Además, el enfoque integral de este proyecto que considera aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, fortalece la viabilidad de la eólica marina como pilar de la transición energética del país y promueve la articulación entre el sector energético y la industria nacional de materiales estratégicos y servicios especializados.

A través de herramientas para llegar a los componentes que tomamos en cuenta para este informe usamos herramientas como Ishikawa, árbol de fallas, 5 por qué y AMEF para luego ir a los cálculos de criticidad calculando probabilidad y gravedad cálculos de disponibilidad y mantenibilidad. Para luego hacer los planes de mantenimiento optimizado y para terminar haciendo cálculos comparativos de los mantenimientos.

Estos cálculos y estrategias nuevas de mantenimiento nos llevaron a decir muy responsablemente que, si bien los mantenimientos históricos no están mal, siempre ahí que ir evolucionando a través del tiempo y confiar en nuevas prácticas de mantenimiento e ir investigando frecuentemente y actuar bajo los reales problemas de los componentes, mas aplicado a nuestro proyecto siempre actuar tomando en cuenta un mantenimiento basado en la confiabilidad y todas las herramientas que conlleva este.

Por esto y todos los datos dados y toda la investigación hecha al largo de nuestro informe podemos recomendar el mantenimiento propuesto en este informe por los siguientes puntos:

- . Mejora de la vida útil de nuestro aerogenerador
- . Mayor fiabilidad de nuestro equipo
- . Menos intervenciones anuales
- . Mejora de la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad
- . Ahorro en repuestos de
- . Ahorro en personal
- . Ahorro de en total de 12.650.000
- . Reducción de un 30,2% de gastos totales de mantenimiento
- . Reducción de 90 hora en mantenimiento





## **BIBLIOGRAFIA**

- AEROGENERADORES.NET.* (s.f.). Obtenido de <https://aerogeneradores.net/aerogeneradores-flotantes/>
- Artavia, A. A. (2022). *Análisis de modos falla, efectos y criticidad en aerogeneradores doblemente alimentados.* Costa Rica : Universidad de Costa Rica Facultad Ingeniería.
- BibLus.* (4 de Noviembre de 2024). Obtenido de [biblus.accasoftware.com](http://biblus.accasoftware.com)
- Chile, B. d. (12 de Octubre de 2012). *Biblioteca del congreso Nacional de Chile.* Obtenido de Biblioteca del congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563>
- consuman. (19 de Septiembre de 2023). *consuman.* Obtenido de consuman: <https://consuman.com/mantenimiento-centrado-confiabilidad/>
- Electrositio. (2022). *Electrositio.* Obtenido de Electrositio: <https://electrositio.com/que-es-el-aerogenerador-de-eje-horizontal-funcionamiento-y-aplicaciones/>
- ENGEMAN.* (26 de Junio de 2024). Obtenido de [/blog.engeman.com](http://blog.engeman.com)
- Guide to a Floating Offshore Wind Farm.* (s.f.). Obtenido de [guidetofloatingoffshorewind.com](http://guidetofloatingoffshorewind.com)
- LaHistoria. (2024). *LaHistoria.* Obtenido de LaHistoria: [https://lahistoria.info/historia-de-la-energia-eolica-en-chile/#cuantas\\_centrales\\_eolicas\\_hay\\_en\\_chile\\_](https://lahistoria.info/historia-de-la-energia-eolica-en-chile/#cuantas_centrales_eolicas_hay_en_chile_)
- Rodriguez, G. (30 de Noviembre de 2023). *AUVO.* Obtenido de [www.blog.auvo.com](http://www.blog.auvo.com)
- Safety Culture. (15 de Enero de 2024). Obtenido de <https://safetyculture.com/es/temas/mantenimiento-de-aerogeneradores/>
- STARK, T. (12 de Abril de 2023). *TORC STARK.* Obtenido de TORC STARK: <https://torcstark.com/es/mantenimiento-diario-y-resolucion-de-problemas-de-aerogeneradores/>
- Total Energies.* (12 de Agosto de 2022). Obtenido de <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/aerogeneradores-partes-y-funcionamiento>
- Viento Azul Biobío SpA. (2024). *VIENTO AZUL BIOBIO.* Obtenido de <https://www.vientoazulbiobio.cl/project>





