



INGENIERÍA EN ENERGÍA Y PETRÓLEO

**“Manual de mantenimiento predictivo para aerogeneradores del  
parque eólico de México”**

INTEGRANTES:

**Enrique Díaz González**  
**Carlos Ruelas Segovia**

Maestra: Dra. Patricia Yolanda Contreras Pool

# Contenido

Introducción.....	3
Capítulo 1. Mantenimiento en la industria .....	4
1.1. Mantenimiento en la industria .....	4
1.2. Mantenimiento predictivo y aplicaciones.....	5
1.3. Mantenimiento predictivo en aerogeneradores.....	7
Capítulo 2. Instrumentación para el mantenimiento predictivo. ....	8
Vibraciones .....	8
Termografía .....	10
Ultrasonido .....	11
<i>Ventajas</i> .....	11
<i>Desventajas</i> .....	11
Tribología .....	12
Mediciones eléctricas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Capítulo 3. Aplicación del mantenimiento predictivo .....	13
Capítulo 4. Reportes .....	26

## Índice de figuras

Figura 1. Medidor vibraciones.....	9
Figura 2. Cámara termográfica.....	10
Figura 3. Medidor de vibraciones.....	15
Figura 4. Cámara termografía.....	17
Figura 5. Medidor de ultrasonido. ....	19
Figura 6. Viscosímetro.....	20
Figura 7. Densímetro. ....	21
Figura 8. Equipo Karl Fischer.....	22
Figura 9. Espectrómetro. ....	22
Figura 10. Cromatografía de gases. ....	23
Figura 11. Microscopio.....	23
Figura 12. Partes de un aerogenerador.....	26

## **Introducción**

El mantenimiento industrial es un componente fundamental en cualquier proceso de producción, ya que garantiza el funcionamiento óptimo de maquinarias, equipos y sistemas en entornos industriales. Consiste en una serie de actividades planificadas y sistemáticas destinadas a prevenir fallos, maximizar la eficiencia operativa y prolongar la vida útil de los activos industriales.

El mantenimiento nace en Gran Bretaña, a mediados del siglo XVIII durante la revolución industrial, el mantenimiento ha evolucionado significativamente, pasando de un enfoque reactivo a uno predictivo y proactivo.

Hoy, las empresas buscan implementar estrategias de mantenimiento predictivo usando tecnologías avanzadas como el monitoreo en tiempo real, el análisis de datos y la inteligencia artificial, para anticiparse a posibles averías y minimizar tiempos de inactividad no planificados.

## Capítulo 1. Mantenimiento en la industria

### 1.1. Mantenimiento en la industria

¿Que es el mantenimiento? El mantenimiento es la actividad que tiene como objetivo principal conservar todas las propiedades físicas de máquinas, equipos e instrumentos para que éstos mantengan un buen rendimiento y alargar el tiempo de vida, también sirve para asegurar la disponibilidad de edificios e instalaciones, El mantenimiento surge de la necesidad humana para preservar la funcionalidad de las máquinas en las industrias y para que éstos tengan un mejor rendimiento y productividad.

*Tabla 1. Historia y evolución del mantenimiento.*

AÑO	DESCRIPCIÓN
1780	Mantenimiento correctivo
1798	Uso de partes intercambiables
1903	Producción industrial masiva
1910	Cuadrillas de mantenimiento correctivo
1914	Mantenimiento preventivo
1931	Control de calidad del producto manufacturado
1950	Control estadístico de calidad
1960	Desarrollo del mantenimiento centrado en la confiabilidad
1971	Desarrollo del mantenimiento productivo total
1995	Desarrollo del proceso de las 5 S
2005	Surgimiento de la filosofía de conversación industrial

Hoy en día, un inconveniente que se ha detectado durante la aplicación del mantenimiento y la implementación ha sido el uso de un lenguaje común no especializado entre los operadores de equipos e instrumentos y lo técnicos en el departamento de mantenimiento, teniendo como consecuencia falsos diagnósticos de los errores o las fallas. Otro problema es la falta de los conocimientos y administración del mantenimiento. El mantenimiento siempre debe considerarse como parte integral y de suma importancia en la organización que maneje una fase de operaciones. El costo del mantenimiento representa una parte importante del costo total de la producción.

En la industria tenemos 3 tipos de mantenimiento que son el **correctivo**, **preventivo** y **predictivo**. Antes de aplicar uno de estos tipos de mantenimiento, debemos tener en cuenta el tipo de falla que hay, de las cuales se dividen en 4 tipos de fallas:

- *Fallas tempranas*: Se presenta al principio de la vida útil del bien y generalmente ocasionado por deficiencias en los materiales, errores de montaje o de diseño.
- *Fallas adultas*: Suelen presentarse al principio de la vida útil del bien debido a las condiciones de operación (pueden ser suciedad, desgaste, falta de lubricación, entre otros tipos). Este tipo de fallas ocurre con mayor lentitud.
- *Fallas tardías*: Generalmente, en este tipo de fallas ocurre fuera de la vida útil del bien, cuando las condiciones de operación han terminado.
- *Fallas excepcionales*: Se originan por sucesos o demandas fuera de las especificaciones técnicas o por condiciones inesperadas como sobrecargas, problemas de alimentación, forzar el equipo, entre otros.

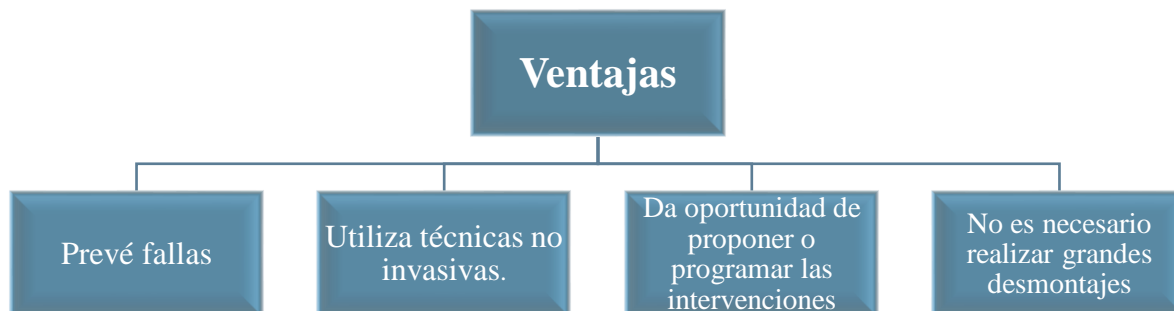
## **1.2. Mantenimiento predictivo y aplicaciones.**

El mantenimiento predictivo, conocido también como mantenimiento basado en la condición, es la actividad que puede predecir y prevenir el desarrollo de fallas en equipo e instalaciones. Es posible detectar, mediante un diagnóstico, posibles fallas o algún deterioro de algún componente que pudiera provocar alguna falla inminente.

La importancia de este mantenimiento es el control total de los costos de mantenimiento y la obtención de mejoras en el proceso productivo de manera sustancial.

## Ventajas

Tabla 2. Ventajas del mantenimiento predictivo.



## Desventajas

Tabla 3. Desventajas del mantenimiento predictivo.



## Pasos que seguir para el mantenimiento predictivo.

1. Monitorización del funcionamiento de la máquina.
2. Modelización del proceso y mantenimiento dirigido.
3. Modelización de escenarios límite.
4. Mantenimiento predictivo.
5. Seguimiento continuo.

### Datos importantes sobre el mantenimiento predictivo.

- Puede reducir las fallas inesperadas hasta en un 90 %.
- Una instalación promedio que aprovecha el mantenimiento predictivo puede reducir el tiempo medio de reparación en un 60 %.
- Aumenta la vida útil de la maquinaria de las instalaciones en un promedio del 30 %.
- Al evitar averías complejas de las máquinas, los equipos de mantenimiento necesitan invertir menos recursos en herramientas y servicios de mantenimiento.

### 1.3. Mantenimiento predictivo en aerogeneradores.

Para realizar el mantenimiento predictivo en aerogeneradores es indispensable conocer las técnicas que existen, como las siguientes:

*Tabla 4. Técnicas de mantenimiento predictivo para aerogeneradores.*

› Análisis y detección de vibraciones.	
• Para máquinas rotativas	
› Termografía infrarroja	
• Inspeccionar aislamientos.	
› Análisis de lubricantes	
• Deterioros y partículas de desgaste.	
› Descargas parciales	
• En máquinas eléctricas rotativas en ciclo de operación.	
› Análisis de ultrasonidos	
• Funcionamiento de válvulas o detección de fugas	

## **Capítulo 2. Instrumentación para el mantenimiento predictivo.**

Para aplicar el mantenimiento predictivo, es necesario la utilización de equipos de medición y recolección de datos, además es de suma importancia que el personal esté calificado para dar la ejecución. Para aplicar el mantenimiento predictivo existen varias técnicas, principalmente son:

- Vibraciones
- Termografía
- Ultrasonido
- Tribología
- Mediciones eléctricas

### **2.1. Vibraciones**

Es uno de los análisis más importantes para las máquinas rotatorias, son una de las causas principales de las averías de las máquinas. Provocan una mayor carga sobre los rodamientos dando como consecuencia menor vida útil.

La aplicación de esta técnica permite el diagnóstico preciso de fallas, como desequilibrio, desalineación, holguras, roces, ejes deformados, excentricidad en poleas y engranajes, falla y ruido de rodamiento, también afectaciones de origen eléctrico. La severidad de la vibración en maquinarias está determinada según la norma en la **ISO 10816**.



Tabla 5. Tabla de severidad de vibraciones (ISO 10816).

								Velocity	
								10-1000 Hz $r > 600$ rpm 2-1000 Hz $r > 120$ rpm	
			D					11	0.43
			C					7.1	0.28
								4.5	0.18
			B					3.5	0.14
								2.8	0.11
								2.3	0.09
								1.4	0.06
			A					0.71	0.03
rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	mm/s rms	inch/s rms
pumps > 15 kW radial, axial, mixed flow				medium sized machines 15 kW < P ≤ 300 kW		large machines 300 kW < P < 50 MW		Foundation	
integrated driver		external driver		motors 160 mm ≤ H < 315 mm		motors 315 mm ≤ H		Machine Type	
Group 4		Group 3		Group 2		Group 1		Group	
A New machine condition				C Short-term operation allowable					
B Unlimited long-term operation allowable				D Vibration causes damage					

Para esta técnica, se utiliza el **sensor**. El sensor es seleccionado dependiendo a ciertos criterios.



Figura 1. Medidor vibraciones.

## 2.2. Termografía

Técnica de mantenimiento predictivo que permite ver los valores de temperatura con imágenes en infrarrojo. Para ello se usan cámaras termográficas. Su aplicación permite determinar dónde y cuándo es necesario el mantenimiento ya que el aumento de la temperatura en las instalaciones eléctricas y mecánicas anticipa la detección de la falla, evitando grandes accidentes o incluso incendios.



Figura 2. Cámara termográfica.

Existe una tabla de clasificación de fallas eléctricas según NETA (International Electric Testing Association), para identificar la relevancia de la falla y la acción que se recomienda seguir.

Tabla 6. Tabla de clasificación según NETA.

**O/A: Temperatura sobre ambiente.**

**O/S: Temperatura sobre similar.**

Nivel	$\Delta$ Temperatura	Clasificación	Acción
1	1°C a 10°C O/A o 1°C a 3°C O/S	Relevancia LEVE	Ver en próximo mantenimiento
2	11°C a 20°C O/A o 4°C a 15°C O/S	Relevancia GRAVE	Darle seguimiento a falla
3	21°C a 40°C O/A o >15°C O/S	Relevancia CRÍTICA	Reparar tan pronto sea posible
4	>40°C O/A o > 15°C O/S	Relevancia MUY CRÍTICA	REPARAR INMEDIATAMENTE

### **2.3. Ultrasonido**

Los ultrasonidos son ondas sonoras cuya frecuencia supera el límite perceptible por el oído humano (es decir, el sonido no puede ser captado por las personas ya que se ubica en torno al espectro de 20.000 Hz). El rango de consideración como ultrasonidos va desde los 20.000 hasta los 100.000 Hz. Esta técnica utiliza las emisiones acústicas por encima de las frecuencias del rango audible que permite la detección de fallas. Permite detectar fisuras o daños en los elementos mecánicos. En la actualidad, esta técnica se emplea para medir el espesor de un material sin la necesidad de desarmar el equipo.

#### *Ventajas*

- Se detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- Solo se requiere acceso por un lado del material que será sujeto a inspección.
- Tiene alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos de manera inmediata.
- Se determina la posición de las discontinuidades internas con mayor exactitud, estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- Tiene alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- Cuenta con una buena resolución, lo que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre sí.
- No requiere de condiciones especiales de seguridad

#### *Desventajas*

- Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales.
- Presenta dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular
- Tiene dificultad para detectar o evaluar discontinuidades cercanas a la superficie sobre la que se introduce el ultrasonido
- Requiere de patrones de calibración y referencia, y en general no proporciona un registro permanente.
- Es afectado por la estructura del material

- Se requiere de agente acoplante
- Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección
- Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido

## **2.4. Tribología**

Esta técnica implica el monitoreo y análisis de las propiedades físicas y químicas de los lubricantes utilizados en los aerogeneradores para evaluar su estado y detectar posibles problemas en los componentes lubricados.

El lubricante desempeña un papel crucial en la tribología al reducir la fricción y el desgaste entre las superficies en contacto. Un análisis detallado del lubricante puede revelar cambios en sus propiedades físicas, como la viscosidad y la densidad, así como la presencia de partículas metálicas, agua u otros contaminantes. Estos cambios pueden indicar problemas potenciales, como desgaste excesivo de los componentes, contaminación del lubricante o problemas de sellado. Al identificar estos problemas de manera temprana, se pueden tomar medidas correctivas para evitar daños mayores y minimizar los tiempos de inactividad no planificados en el aerogenerador.

## **2.5. Mediciones eléctricas**

Las mediciones eléctricas en el mantenimiento predictivo implican monitorear y analizar parámetros eléctricos de equipos para detectar posibles fallas antes de que ocurran. En aerogeneradores, se pueden implementar estas técnicas midiendo variables como corriente, voltaje, frecuencia y armónicos en componentes clave como generadores, convertidores y sistemas de control.

Estas mediciones proporcionan indicadores tempranos de problemas potenciales, como desgaste de componentes, problemas de conexión, o sobrecargas, permitiendo programar intervenciones de mantenimiento antes de que se produzcan fallos costosos. Además, la integración de sensores y sistemas de monitoreo en red permite un seguimiento continuo y

remoto de las condiciones eléctricas, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo el tiempo de inactividad de los aerogeneradores.

### **Capítulo 3. Aplicación e instrumentación del mantenimiento predictivo**

- **Vibraciones**

Un medidor de vibraciones es una herramienta esencial para realizar mantenimiento predictivo en aerogeneradores, ya que permite monitorear y evaluar las vibraciones de los componentes críticos del sistema. A continuación, se presenta paso a paso lo que se debe hacer.

1. Lo primero es seleccionar un medidor de vibraciones adecuado para la aplicación específica. Esto implica considerar factores como el rango de frecuencia de las vibraciones a medir, la precisión requerida, las funciones de análisis disponibles y la robustez del dispositivo para operar en entornos exigentes.
2. Antes de comenzar las mediciones, se debe identificar y seleccionar los puntos críticos del aerogenerador donde se colocarán los sensores del medidor de vibraciones. Estos puntos suelen incluir los rodamientos del generador, la caja de engranajes, las palas del rotor y otros componentes clave que pueden experimentar vibraciones significativas durante el funcionamiento.
3. Una vez seleccionados los puntos de medición, se colocan los sensores del medidor de vibraciones en estas ubicaciones. Los sensores suelen ser acelerómetros que se fijan directamente a la superficie del componente utilizando adhesivos especiales o sistemas de montaje diseñados para este fin.
4. Antes de comenzar las mediciones, se configura el medidor de vibraciones según los parámetros específicos de la aplicación. Esto incluye ajustar la escala de medición, la

sensibilidad del sensor, la frecuencia de muestreo y otras configuraciones relevantes para obtener mediciones precisas y fiables.

5. Cuando el medidor de vibraciones está configurado y los sensores están bien montados, se inicia el proceso de medición. El medidor de vibraciones registra las vibraciones en tiempo real en los puntos de medición seleccionados mientras el aerogenerador está en funcionamiento normal.
6. Después de realizar las mediciones, se analizan los datos de vibración recopilados utilizando el software de análisis proporcionado por el medidor de vibraciones. Esto puede incluir el análisis de frecuencia, el análisis de forma de onda, la evaluación de tendencias y la comparación con valores de referencia para identificar posibles problemas o anomalías.
7. Basándose en los resultados del análisis de datos, se realizan diagnósticos sobre el estado del aerogenerador y se toman medidas correctivas según sea necesario. Esto puede incluir ajustes de alineación, equilibrado de palas, reemplazo de rodamientos u otras intervenciones de mantenimiento para prevenir fallas y optimizar el rendimiento del aerogenerador.

Un medidor de vibraciones se utiliza para realizar mediciones precisas de las vibraciones en puntos críticos del aerogenerador, lo que proporciona información valiosa para el mantenimiento predictivo y la optimización del rendimiento del equipo.



*Figura 3. Medidor de vibraciones.*

- **Termografía**

Una cámara termográfica es una herramienta valiosa en el mantenimiento predictivo de aerogeneradores, ya que permite detectar anomalías térmicas que pueden indicar problemas en los componentes eléctricos y mecánicos. A continuación, se muestra paso a paso la utilización de esta herramienta:

1. Seleccionar una cámara termográfica adecuada para la tarea es crucial. Se deben considerar factores como la resolución térmica, la sensibilidad, la distancia focal, la capacidad de grabación de imágenes y la facilidad de uso. Se prefieren cámaras con una resolución suficiente para detectar pequeñas variaciones de temperatura y una sensibilidad térmica alta para capturar detalles finos.
2. Antes de utilizar la cámara termográfica, es importante calibrarla según las condiciones ambientales y las especificaciones del fabricante. Esto garantiza mediciones precisas y confiables. Además, se debe configurar la cámara para ajustar parámetros como la escala de temperatura, el rango de medición y la paleta de colores.
3. Durante la inspección, el técnico utiliza la cámara termográfica para realizar una exploración visual de los componentes del aerogenerador desde una distancia segura. Esto puede incluir la nacelle, las palas del rotor, la caja de engranajes, los rodamientos y los sistemas eléctricos.
4. La cámara termográfica detecta diferencias de temperatura en los componentes del aerogenerador. Las anomalías térmicas, como puntos calientes o fríos inusuales,

pueden indicar problemas como conexiones sueltas, componentes sobrecalentados, desgaste de rodamientos, desequilibrios en las palas o problemas en los sistemas eléctricos.

5. Después de capturar las imágenes térmicas, el técnico analiza las imágenes para identificar y evaluar las anomalías térmicas detectadas. Esto puede implicar comparar las temperaturas medidas con los valores de referencia, evaluar la distribución y la magnitud de las anomalías, y determinar la posible causa subyacente de las variaciones de temperatura.
6. Se documentan todas las anomalías detectadas junto con su ubicación y características relevantes. Esto permite realizar un seguimiento de la evolución de las anomalías a lo largo del tiempo y planificar intervenciones de mantenimiento adecuadas.

En cuanto a la ubicación de la cámara termográfica, se pueden considerar las siguientes ubicaciones:

- Componentes eléctricos: Se pueden inspeccionar los componentes eléctricos como los transformadores, los interruptores, los convertidores y los cables, en busca de conexiones sueltas, sobrecalentamiento o puntos calientes.
- Componentes mecánicos: Se pueden inspeccionar los rodamientos, los engranajes y otras partes mecánicas de la caja de engranajes para detectar problemas de lubricación, desgaste o desalineación.
- Palas del rotor: Se pueden inspeccionar las palas del rotor para detectar problemas como acumulación de hielo, desgaste desigual, daños estructurales o desequilibrio.



Una cámara termográfica se usa para realizar inspecciones termográficas de los componentes del aerogenerador, permitiendo detectar anomalías térmicas que pueden indicar problemas potenciales y facilitar la planificación de intervenciones de mantenimiento predictivo.



*Figura 4. Cámara termografía.*

- **Ultrasonido**

El mantenimiento predictivo de un aerogenerador utilizando ultrasonido implica la detección de anomalías en los componentes mecánicos y eléctricos mediante la evaluación de las emisiones ultrasónicas generadas por dichos componentes. A continuación, se muestra paso a paso el procedimiento a realizar:

1. La herramienta principal utilizada en el mantenimiento predictivo con ultrasonido es el detector de ultrasonido, también conocido como sonda o medidor ultrasónicos. Este dispositivo puede captar las emisiones ultrasónicas y convertirlas en señales audibles o visuales para analizarlas.

2. Antes de realizar las mediciones, se debe asegurar que el equipo de ultrasonido esté correctamente configurado y calibrado según las especificaciones del fabricante. Esto garantiza mediciones precisas y confiables.
3. La herramienta de ultrasonido se utiliza para inspeccionar los componentes mecánicos del aerogenerador, como los rodamientos, los engranajes y las conexiones mecánicas. La sonda ultrasónica se coloca en puntos específicos de los componentes para detectar emisiones ultrasónicas anómalas que podrían indicar desgaste, fricción o defectos.
4. Además de los componentes mecánicos, la herramienta de ultrasonido también se puede utilizar para inspeccionar los componentes eléctricos del aerogenerador, como los paneles eléctricos, los cables y los terminales. Se colocan sondas ultrasónicas en puntos críticos para detectar descargas eléctricas, arcos eléctricos o fallos de aislamiento que puedan causar problemas.
5. Durante la inspección, las emisiones ultrasónicas detectadas se analizan para identificar patrones anómalos que puedan indicar problemas potenciales. Esto puede implicar la comparación de las mediciones con valores de referencia o criterios de aceptación predefinidos, así como el seguimiento de la evolución de las emisiones a lo largo del tiempo.
6. Se documentan todas las anomalías detectadas junto con su ubicación y características relevantes. Esto permite realizar un seguimiento de la evolución de los problemas a lo largo del tiempo y planificar intervenciones de mantenimiento adecuadas.

En cuanto a dónde se pondría la herramienta de ultrasonido, se pueden considerar las siguientes ubicaciones:

- Rodamientos y caja de engranajes: Se pueden inspeccionar los rodamientos y los engranajes en la nacelle y en la caja de engranajes para detectar problemas de lubricación, desgaste o defectos.

- Conexiones eléctricas: Se pueden inspeccionar los paneles eléctricos, los cables y los terminales para detectar descargas eléctricas, arcos eléctricos o problemas de aislamiento.

El mantenimiento predictivo con ultrasonido implica la detección de anomalías en los componentes mecánicos y eléctricos del aerogenerador mediante la evaluación de las emisiones ultrasónicas. Esto se logra utilizando un detector de ultrasonido, que se coloca en puntos críticos para inspeccionar los componentes y detectar posibles problemas.



*Figura 5. Medidor de ultrasonido.*

- **Tribología**

Esta técnica implica el monitoreo y análisis de las propiedades físicas y químicas de los lubricantes utilizados en los aerogeneradores para evaluar su estado y detectar posibles problemas en los componentes lubricados. A continuación, se detalla esta técnica y las herramientas asociadas:

#### **Análisis de lubricantes**

- Se toman muestras periódicas de los lubricantes utilizados en los sistemas de lubricación de los aerogeneradores.

- Se evalúan propiedades físicas como la viscosidad, la densidad y el punto de fluidez del lubricante para garantizar que esté dentro de los rangos óptimos de funcionamiento:
- Viscosidad: Se utiliza un viscosímetro para medir la viscosidad del lubricante, que es una medida de su resistencia al flujo. Esta prueba puede realizarse a diferentes temperaturas para evaluar la viscosidad en condiciones de operación típicas.



*Figura 6. Viscosímetro.*

- Densidad: Se utiliza un densímetro o un picnómetro para medir la densidad del lubricante, que es la masa por unidad de volumen. La densidad puede proporcionar información sobre la pureza y la composición del lubricante.



*Figura 7. Densímetro.*

- Punto de fluidez: Se determina el punto de fluidez del lubricante, que es la temperatura más baja a la cual sigue fluyendo. Esto es importante para garantizar que el lubricante pueda operar correctamente en condiciones de baja temperatura. Para determinar el punto de fluidez de un lubricante, se utiliza un instrumento llamado baño de punto de fluidez. Este instrumento proporciona una manera estándar de medir la temperatura más baja a la que el lubricante sigue fluyendo bajo condiciones específicas.



*Figura 8. Baño de punto de fluidez.*

- Se realizan pruebas químicas para detectar la presencia de contaminantes como agua, partículas metálicas o productos de degradación que podrían indicar desgaste o problemas en los componentes.
- Contenido de agua: Se utiliza un método como la titulación Karl Fischer para determinar la cantidad de agua presente en el lubricante. El agua puede ser perjudicial ya que puede causar corrosión y degradación del lubricante.



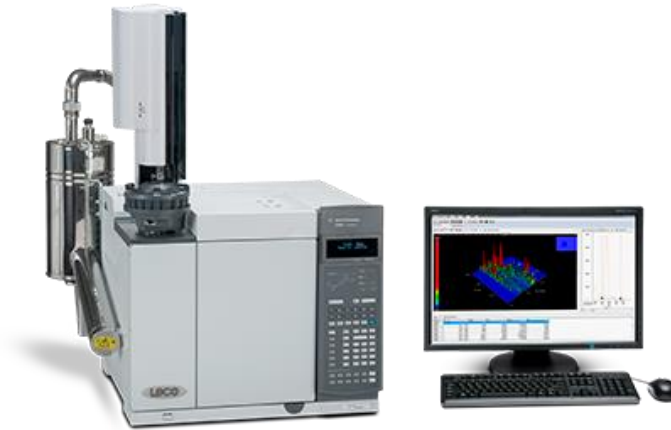
*Figura 9. Equipo Karl Fischer.*

- Contaminantes metálicos: Se utiliza un espectrómetro de emisión óptica o de absorción atómica para analizar la presencia y concentración de contaminantes metálicos, como hierro, cobre u otros elementos, que pueden indicar desgaste de los componentes.



*Figura 10. Espectrómetro.*

- Productos de degradación: Se utilizan técnicas como la cromatografía de gases o la espectroscopia infrarroja para identificar y cuantificar productos de degradación, como ácidos, resinas o productos de oxidación, que pueden afectar la calidad del lubricante.



*Figura 11. Cromatografía de gases.*

- Análisis de desgaste: Se utiliza microscopía u otras técnicas para examinar las partículas suspendidas en el lubricante y determinar su origen, lo que puede proporcionar información sobre el tipo y la gravedad del desgaste en los componentes.



*Figura 12. Microscopio.*

- Se comparan los resultados de los análisis de lubricantes a lo largo del tiempo para detectar cambios significativos en las propiedades del lubricante y prever posibles problemas antes de que ocurran fallas.

- **Mediciones eléctricas**

El mantenimiento predictivo de las mediciones eléctricas en un aerogenerador implica monitorear y analizar continuamente diversas variables eléctricas para detectar posibles problemas antes de que ocurran fallas significativas. Aquí se presentan algunas técnicas comunes de mantenimiento predictivo para las mediciones eléctricas en aerogeneradores, junto con las herramientas utilizadas y dónde se aplican:

- Los armónicos pueden causar problemas en el sistema eléctrico de un aerogenerador, como sobrecalentamiento de equipos y degradación del rendimiento. Se utilizan analizadores de armónicos para medir y analizar la presencia de armónicos en la red eléctrica del aerogenerador. Estos analizadores se conectan típicamente en diferentes puntos del sistema eléctrico, como en la subestación del parque eólico.
- Termografía infrarroja: Se utiliza para inspeccionar visualmente los componentes eléctricos en busca de puntos calientes que puedan indicar problemas de conexión suelta, resistencia eléctrica elevada o desgaste. Las cámaras termográficas se utilizan para escanear paneles eléctricos, interruptores, conexiones y otros componentes eléctricos críticos en el aerogenerador.
- Se monitorean y registran parámetros como la tensión, la corriente, la frecuencia y la distorsión armónica total (THD) para evaluar la calidad de la energía suministrada por el aerogenerador. Se utilizan registradores de calidad de la energía para recopilar datos en diferentes puntos del sistema eléctrico y detectar anomalías que puedan afectar el rendimiento o la vida útil de los equipos.



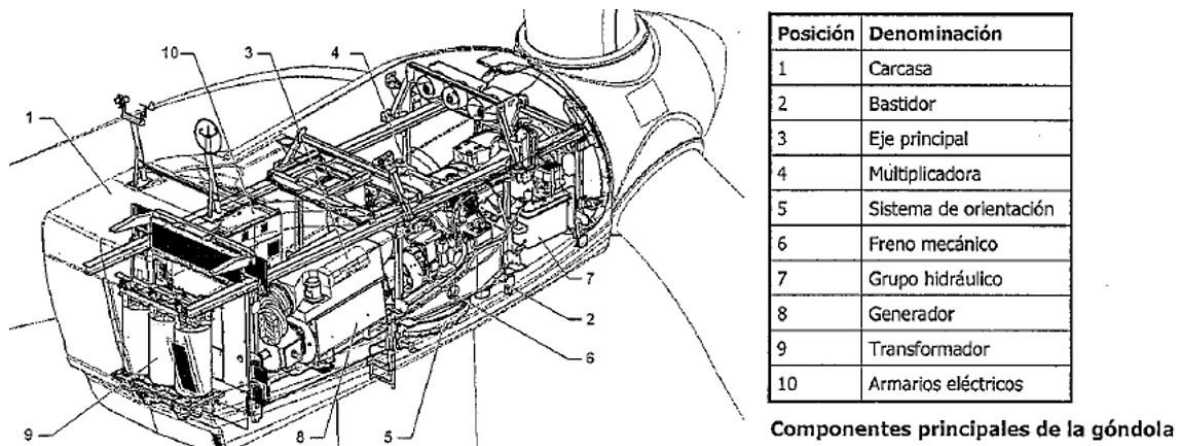
(analizador de calidad de energía)

- Se lleva a cabo una inspección visual regular de los componentes eléctricos, como cables, conexiones, bornes y aisladores, para detectar signos de desgaste, corrosión o daños físicos. Esta inspección se realiza manualmente en el sitio del aerogenerador.
- Se implementan sistemas de monitoreo remoto que recopilan datos en tiempo real de las mediciones eléctricas y envían alertas automáticas si se detectan anomalías. Estos sistemas pueden incluir dispositivos de telemetría y comunicación instalados en el aerogenerador, así como software de gestión de activos que procesa y analiza los datos.

Las herramientas utilizadas en estas técnicas de mantenimiento predictivo incluyen:

- Analizadores de armónicos.
- Cámaras termográficas.
- Registradores de calidad de la energía.
- Herramientas de inspección visual (linternas, cámaras).
- Dispositivos de telemetría y comunicación.
- Software de gestión de activos y monitorización remota.

Estas herramientas se aplican en diferentes partes del sistema eléctrico del aerogenerador, incluyendo la subestación, los paneles eléctricos, los interruptores, las conexiones de cableado y otros componentes críticos.



*Figura 13. Partes de un aerogenerador.*

#### **Capítulo 4. Propuesta de formato para mantenimiento predictivo.**

Los reportes pueden ser cualitativos, o cualitativos/cuantitativos. En la mayoría de las inspecciones en plantas industriales, un reporte cualitativo es suficiente. El reporte debe presentarse en un lapso no mayor a cinco días. La información que se debe incluir en cada reporte es:

1. Sumario ejecutivo (listado de máquinas que se inspeccionaron).
2. Sumario de excepciones. Una excepción, se conoce como un elemento operando fuera de su condición normal.
3. Ubicación de lugar de inspección, fecha y hora.
4. Responsable. Indicando los niveles de certificación que tenga el individuo.
5. Equipo usado y fecha de calibración, incluyendo accesorios usados, como lentes adicionales, filtros, grabadoras de video, cámaras fotográficas, etc.
6. Procedimiento de prueba
7. Las técnicas de análisis. Cualitativas o cuantitativas.
8. Datos. Toda la información en termogramas y valores medidos, registros de emisividad. En algunos casos; la temperatura ambiente, humedad, velocidad de viento, entre otros.
9. Resultados y recomendaciones.

A continuación, se mostrará una propuesta del formato a llenar después de realizar dicho mantenimiento:

(empresa)(dirección) (teléfono)(logo)		N°OT		CLASE DE OT		
				Mantenimiento Predictivo		
		Firma técnicos				
		Conforme responsable cliente		Conforme responsable empresa		
Cliente					Fecha	
Parque					Máquina/ Nª de torre	
Aerogenerador						
Motivo de mantenimiento						
TRABAJO REALIZADO						
OTROS DATOS						
HORAS LINEA		HORAS TURBINA			KWh	
MANO DE OBRA						
Matricula	Técnico	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	Tp. hora
HERRAMIENTAS						
Herramienta		No. De identificación		Fecha próx. De calibración		

PROCEDIMIENTO TRABAJO		
DESCRIPCIÓN		REVISIÓN
TRABAJOS PENDIENTES		
Fecha detección	prioridad	Fecha realización

--	--	--	--

## Referencias:

- Olarte, W., Botero, M., & Zabaleta, B. C. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et technica*, 2(48), 253-256.
- Olarte, W., Botero, M., & Cañón, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, 2(45), 223-226.
- Sánchez-Gómez, A. M. (2017). Técnicas de mantenimiento predictivo: metodología de aplicación en las organizaciones.
- Prieto, M. I. A. (2016). Mantenimiento Predictivo.
- Rosich Balcells, J. (2013). *Sistema de gestión del mantenimiento predictivo en parques eólicos* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Anguela Galisteo, A. (2014). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo para generadores de inducción en un parque eólico* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

# **Manual de mantenimiento predictivo para aerogeneradores en parques eólicos de México.**

Ing. Energía y Petróleo

ENRIQUE DÍAZ  
CARLOS RUELAS



**UNIVERSIDAD  
MODELO**



# Introducción

- Para el año 2021 en México, la capacidad instalada fue de 8.3 GW, el 9% de la electricidad del país provino de la energía eólica y contaba con 3,175 turbinas. En 2022 las centrales eólicas en operación evitaron la emisión de aproximadamente 8.8 millones de toneladas de  $CO^2$ . En el 2023 se generaban 7,137 MW por 70 parques eólicos en operación. Cada aerogenerador necesita tener un mantenimiento como el correctivo, el preventivo y el predictivo.





# Planteamiento del problema

- La falta de un manual de mantenimiento y el conocimiento del mantenimiento predictivo en los parques eólicos ha tenido como consecuencia grandes pérdidas energéticas, de tiempo y monetarias.



# Idea del proyecto



- Establecer un manual de mantenimiento predictivo para parques eólicos en México, para evitar posibles problemas a futuros acerca de los aerogeneradores ubicados en los parques del país.

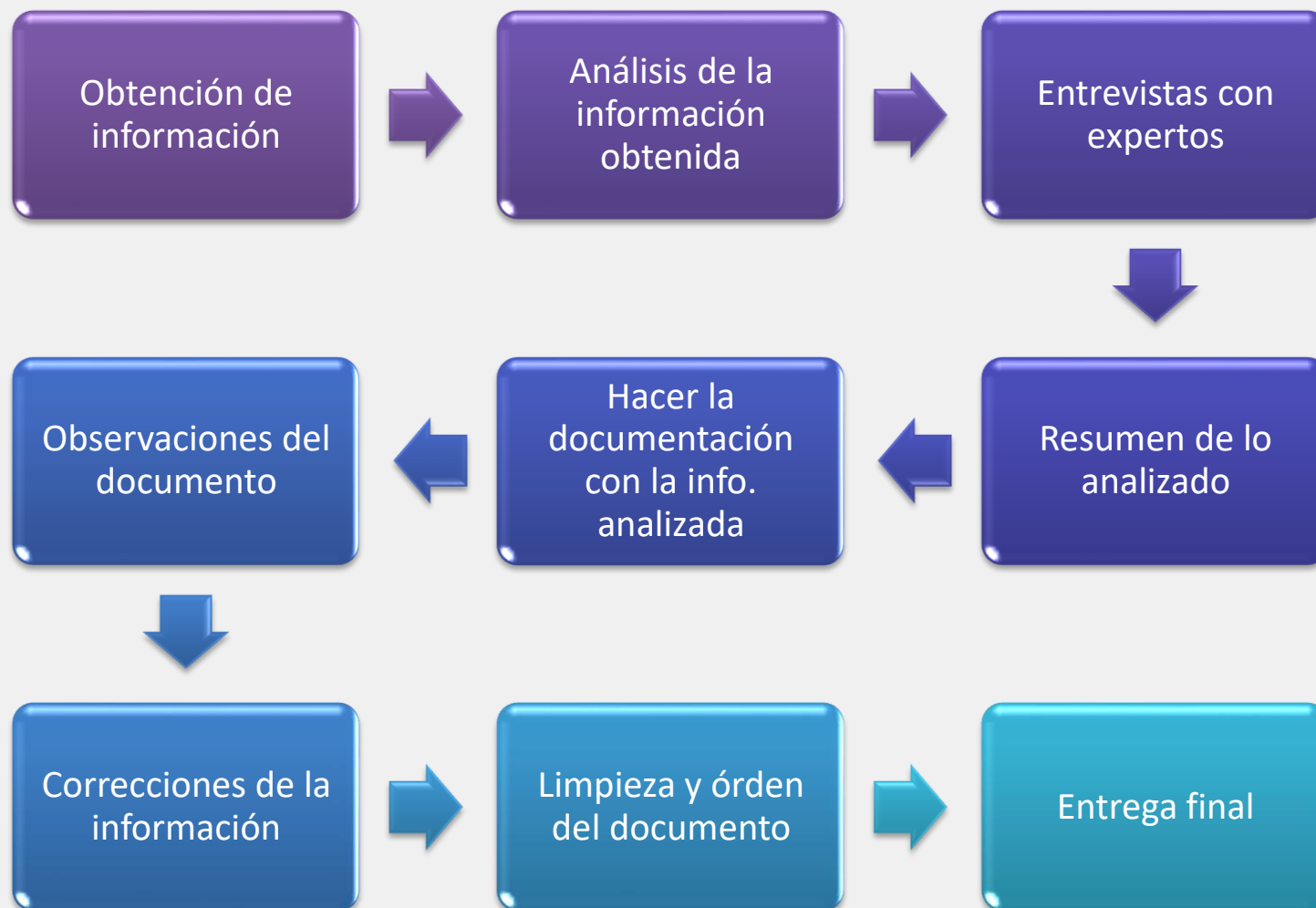
# Objetivos

**General:** Elaborar un Manual de Mantenimiento Predictivo específico para aerogeneradores en los parques eólicos en México.

## Específicos:

- Seleccionar información sobre parques eólicos en México.
- Emplear la información sobre los mantenimientos dados, fallas y tipos de mantenimiento.
- Obtener información acerca del mantenimiento predictivo.
- Desarrollar procedimientos para monitorización continua de parámetros operativos
- Elaborar un manual que resuma los datos obtenidos del mantenimiento predictivo y las aplicaciones que se pueden llevar a cabo para aerogeneradores de los parques eólicos.

# Desarrollo



# Diseño del proyecto

El manual se comprenderá por 4 capítulos:

- Capítulo 1: Mantenimiento en la industria.
  - 1.1. Mantenimientos en la industria.
  - 1.2. Mantenimiento predictivo y aplicaciones.
  - 1.3. Mantenimiento predictivo en aerogeneradores.
- Capítulo 2: Procesos de mantenimiento predictivo en aerogeneradores.
  - 2.1. Vibraciones
  - 2.2. Termografía
  - 2.3. Ultrasonido
  - 2.4. Tribología
  - 2.5. Mediciones eléctricas
- Capítulo 3: Aplicación e instrumentación del mantenimiento predictivo.
  - 3.2. Manejo de los equipos e instrumentos para los aerogeneradores.
    - 3.2.1. Vibraciones
    - 3.2.2. Termografía
    - 3.2.3. Ultrasonido
    - 3.2.4. Tribología
    - 3.2.5. Mediciones eléctricas
- Capítulo 4: Propuesta de formatos para mantenimiento predictivo.

# Redacción del proyecto

## Capítulo 1. Mantenimiento en la industria

### 1. Mantenimiento en la industria

¿Qué es el mantenimiento? El mantenimiento es la actividad que tiene como objetivo principal conservar todas las propiedades físicas de máquinas, equipos e instrumentos para que éstos mantengan un buen rendimiento y alargar el tiempo de vida, también sirve para asegurar la disponibilidad de edificios e instalaciones. El mantenimiento surge de la necesidad humana para preservar la funcionalidad de las máquinas en las industrias y para que éstos tengan un mejor rendimiento y productividad.

Año	Descripción
1780	Mantenimiento correctivo
1798	Uso de partes intercambiables
1903	Producción industrial masiva
1910	Cuadras de mantenimiento correctivo
1914	Mantenimiento preventivo
1931	Control de calidad del producto manufacturado
1950	Control estadístico de calidad
1960	Desarrollo del mantenimiento centrado en la confiabilidad
1971	Desarrollo del mantenimiento productivo total
1995	Desarrollo del proceso de las 5 S
2005	Surgimiento de la filosofía de conservación industrial

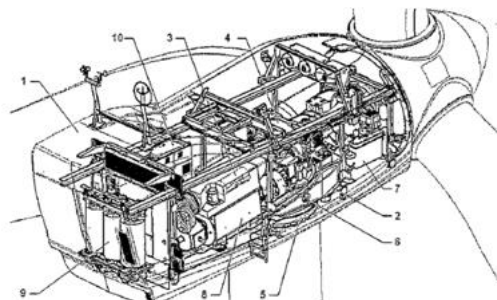
Tabla 1. Historia y evolución del mantenimiento industrial.

## Capítulo 2. Procesos de mantenimiento predictivo

Para aplicar el mantenimiento predictivo, es necesario la utilización de equipos de medición y recolección de datos, además es de suma importancia que el personal esté calificado para dar la ejecución. Para aplicar el mantenimiento predictivo existen varias técnicas, principalmente son:

- Vibraciones
- Termografía
- Ultrasonido
- Tribología
- Mediciones eléctricas

## Capítulo 3. Aplicación del mantenimiento predictivo



Posición	Denominación
1	Carcasa
2	Bastidor
3	Eje principal
4	Multiplicadora
5	Sistema de orientación
6	Freno mecánico
7	Grupo hidráulico
8	Generador
9	Transformador
10	Armarios eléctricos

Componentes principales de la góndola

## Capítulo 4. Reportes

Los reportes pueden ser cualitativos, o cualitativos/cuantitativos. En la mayoría de las inspecciones en plantas industriales, un reporte cualitativo es suficiente. El reporte debe presentarse en un lapso no mayor a cinco días. La información que se debe incluir en cada reporte es:



# Plan de proyecto



# Resultados y conclusiones

- Se espera que el Manual de Mantenimiento sea de mucha utilidad para los parques eólicos en México y éste ayude a mejorar la eficiencia operativa y reduzca los costos de mantenimiento, también, que se conozca el mantenimiento necesario para el tipo de aerogenerador que tienen.

