

## Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación

LÓPEZ-MOLINA, Fredy\*†, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín

*Universidad del Istmo, campus Tehuantepec, Av. Universidad s/n Bo. Santa Cruz, C.P. 70760, Oaxaca.*

Recibido 3 de Julio 2017; Aceptado 4 de Septiembre, 2017

### Resumen

Los aerogeneradores (WT, por sus siglas en inglés) son una de las fuentes de producción de energía que más rápido crece en el mundo; por ello existe una necesidad constante de reducir los costos de operación y mantenimiento. El monitoreo de condición (MC) es una herramienta utilizada comúnmente para la detección temprana de fallas minimizando el tiempo de inactividad y maximizando la productividad. Este artículo presenta una revisión del estado del arte de la técnica en el MC de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado, describiendo las diferentes estrategias de mantenimiento, técnicas y métodos de MC y destacando las diversas combinaciones de éstas y que han sido reportadas en la literatura.

**Aerogenerador, operación y mantenimiento, monitoreo de condición, generador de inducción doble alimentado, diagnóstico de fallas**

### Abstract

Wind turbine technology is rapidly growing as one of the world's largest sources of energy production. Hence, there is a great need to reduce operating and maintenance costs. One of the tools with the greatest impact in fault detection is condition monitoring which has the ability to minimize downtime thus increasing productivity. This article details a state-of-the-art review of wind turbine for condition monitoring technology with a doubly fed induction generator analyzing the different maintenance strategies as well as the techniques and methods of condition monitoring. A qualitative fault tree analysis identifies future and promising research opportunities.

**Wind turbine, operation and maintenance, condition monitoring, doubly fed induction generator, fault diagnostics**

**Citación:** LÓPEZ-MOLINA, Fredy, HERNÁNDEZ-MAYORAL, Emmanuel, DUEÑAS-REYES, Efraín y PARRA-VELASCO, Laura Yazmín. Revisión del estado actual para el análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en aerogeneradores basado en el generador de inducción de doble alimentación. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:10-25

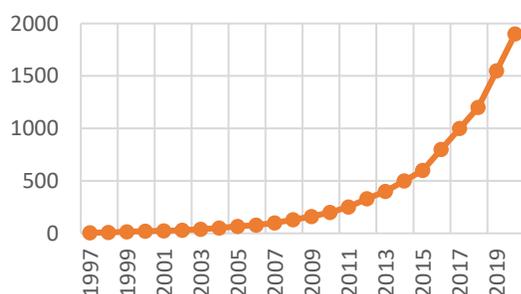
\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: frelo.molin@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

De acuerdo con (WWEA, 2009) se estima que el crecimiento de la capacidad eólica mundial (McGowan & Connors, 2000) se comportará como se muestra en el Gráfico 1. Pero para que la energía eólica sea competitiva con otras fuentes de energía, la disponibilidad, la fiabilidad y la vida de los aerogeneradores deberán ser mejores. A medida que el sector de la energía eólica va en aumento, la economía de los negocios exigirá una gestión cada vez más cuidadosa de los costos. Para una vida útil de 25 años, los costos de explotación y mantenimiento de aerogeneradores de 750 kW podrían representar aprox., el 25%–30% del coste total de generación de energía (Milborrow, 2006) o el 75%–90% de los costes de inversión (Vachon, 2002).

Capacidad Total Instalada (MW)



**Gráfico 1** Capacidad total instalada de los aerogeneradores

Fuente: *Elaboración propia.*

Los nuevos parques eólicos suelen tener una mayor capacidad y comprenden un mayor número de máquinas. Esto sugiere que los aerogeneradores más grandes fallan con mayor frecuencia y, por lo tanto, requieren de mayor mantenimiento. La reducción de los costos de inspección y mantenimiento se ha vuelto cada vez más importante a medida que el tamaño y el número de aerogeneradores han seguido aumentando.

Es sabido que algunos de los componentes del aerogenerador fallan antes de lo esperado y, debido a que el tiempo de inactividad no es programado este puede ser costoso (Anon., 2005). Para tal efecto se emplean sistemas de monitoreo de condición (MC) para mejorar la disponibilidad del aerogenerador y reducir los costos de O&M.

Sin embargo, hay un grado de incertidumbre sobre la conveniencia de aplicar políticas de mantenimiento específicas a los componentes del aerogenerador. Por ello, este artículo discute la aplicabilidad de varias estrategias de mantenimiento al monitoreo de condición del aerogenerador, además de revisar las técnicas y métodos disponibles actualmente y resumir las formas y maneras en que los aerogeneradores pueden fallar. La discusión se centra en el aerogenerador de velocidad variable de tres palas con generador de inducción doblemente alimentado ya que es el aerogenerador dominante en gran parte del mundo (Logan & Kaplan, 2008).

## Configuración de los aerogeneradores

La mayoría de los aerogeneradores son unidades de tres palas. Impulsados por el viento, las palas y el rotor transmiten energía a través del eje principal al generador mediante la caja multiplicadora, siendo la velocidad del generador la más cercana a la velocidad óptima necesaria para la generación de electricidad. La alineación con la dirección del viento es controlada por un sistema “yaw” estando la góndola montada en la parte superior de una torre.

Algunos defectos tales como fugas de aceite y corrosión pueden detectarse mediante inspección visual.

La decoloración de las superficies de los componentes puede indicar ligeras variaciones de temperatura o deterioro de su estado, y el sonido procedente de los rodamientos también puede indicar la condición en que se encuentran (Igarashi & Hamada, 1982; Igarashi & Yabe, 1983).

Sin embargo, típicas fallas, como el agrietamiento y la aspereza en las superficies de las palas, los cortocircuitos eléctricos en el generador y el sobrecalentamiento de la caja multiplicadora, exigen un enfoque más sofisticado para el mantenimiento.

### Teoría del Mantenimiento

Se requiere de mantenimiento para asegurarse de que los componentes continúen realizando las funciones para los cuales fueron diseñados.

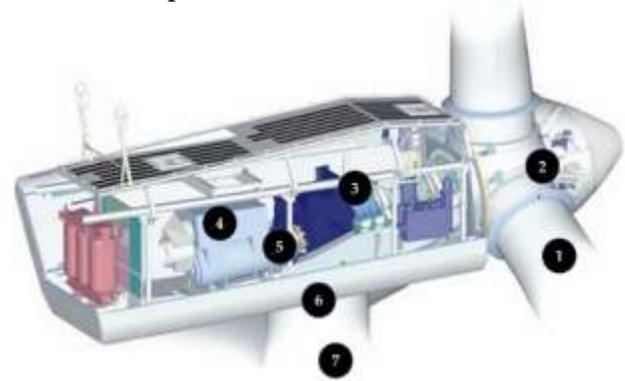
Los objetivos básicos de la actividad de mantenimiento son desplegar los recursos mínimos necesarios para garantizar que los componentes cumplan adecuadamente las funciones previstas, garantizando la fiabilidad del sistema recuperándose de las fallas (Ben-Daya & Duffuaa, 2009).

### Mantenimiento Correctivo, Programado y Basado en Condiciones

La teoría clásica considera el mantenimiento como correctivo o preventivo. El primero (también conocido como mantenimiento no programado o basado en fallas) se lleva a cabo cuando en los aerogeneradores se detectan fallas en cualquiera de los componentes considerados como más importantes tal y como se muestra en la Figura 1.

Es posible que sea necesaria la renovación inmediata o el reemplazo de piezas (Ben-Daya & Duffuaa, 2009) y que se produzca un tiempo de inactividad no programada.

El mantenimiento correctivo es por lo tanto la más cara de las estrategias y los operadores de parques eólicos esperan recurrir a él lo menos posible.



**Figura 1** Principales partes de un aerogenerador: (1) palas, (2) rotor, (3) caja multiplicadora, (4) generador, (5) rodamientos, (6) sistema yaw y (7) torre

Fuente: <http://www.windpowermonthly.com>

Por el contrario, el objetivo principal del mantenimiento preventivo es reparar o reemplazar los componentes antes de que fallen. Esto se logra mediante el mantenimiento programado, conocido como mantenimiento basado en el tiempo (o planificado) y que implica la reparación o el reemplazo, a intervalos de tiempo regulares, según lo recomendado por el proveedor e independientemente de la condición. Las actividades de mantenimiento programadas en aerogeneradores incluyen el cambio de aceite y filtros, y el apriete y torque de los pernos. Pero la reducción de las fallas viene a costa de completar las tareas de mantenimiento de lo absolutamente necesario sin agotar la vida útil de los diversos componentes en servicio. Una alternativa es mitigar la falla de los principales componentes y la interrupción del sistema con el mantenimiento basado en condición en el que se emplean técnicas continuas de monitoreo e inspección para detectar prematuramente las fallas incipientes y determinar las tareas de mantenimiento necesarias antes de la falla (Pedregal et al, 2009).

Esto implica la adquisición, el procesamiento, el análisis y la interpretación de los datos y la selección de las acciones óptimas de mantenimiento (Campbell & Jardine, 2001) lográndose, mediante la utilización de sistemas de control. Además, se ha demostrado que el mantenimiento basado en la condición minimiza los costos de mantenimiento, mejora la seguridad operativa y reduce la cantidad y la gravedad de las fallas del sistema en operación. En (Byon & Ding, 2010; McMillan & Ault, 2008), han demostrado su aplicabilidad utilizando la simulación de Monte Carlo para evaluar su rentabilidad cuando se aplica a aerogeneradores. Actualmente, el mantenimiento basado en la condición es la estrategia más empleada en la industria de los aerogeneradores.

Por otro lado, el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad es la técnica más avanzada para decidir sobre el mantenimiento en la industria y es definido como un proceso para determinar qué debe hacerse para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que el usuario quiere que haga en su contexto operativo actual (Moubray, 1997). Este mantenimiento implica las funciones del sistema, la identificación de los modos de falla, la priorización de las funciones, la identificación de los requisitos y la selección de las tareas de mantenimiento más adecuadas con el objetivo de gestionar el riesgo de falla del sistema.

El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad ha sido reconocido y aceptado en muchos sectores industriales, como las plantas siderúrgicas, las redes ferroviarias y mantenimiento de buques así como en otras industrias.

### Monitoreo de condición en aerogeneradores

En base a que un cambio significativo es indicativo de una falla en desarrollo (Wiggelinkhuizen et al., 2007), los sistemas de monitoreo de condición comprenden combinaciones de sensores y equipos de procesamiento de señal que proporcionan indicaciones continuas del componente utilizando técnicas tales como análisis de vibraciones, acústica, análisis de aceite, medición de deformaciones y termografía. Este método es muy utilizado en los aerogeneradores con la finalidad de supervisar el estado de sus principales componentes operativos como las palas, la caja multiplicadora, el generador, los rodamientos principales y la torre. La supervisión puede ser en línea (proporcionando una retroalimentación instantánea de la condición) o fuera de línea (los datos se recogen a intervalos regulares de tiempo utilizando sistemas de medición que no están integrados con el equipo). Las fallas presentes en los componentes pueden ser detectadas con una buena adquisición de datos y un procesamiento de señales adecuado, siempre que éstos se encuentren operando. Las acciones se pueden planificar a tiempo para evitar daños o fallas de los componentes. Las tareas de mantenimiento pueden programarse de manera eficiente, lo que se traduce en una mayor fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad, mientras que los tiempos de inactividad, los costos de mantenimiento y de explotación se reducen. Por lo tanto, las técnicas de monitoreo de condición se utilizan en toda la industria y los beneficios se muestran especialmente para los parques eólicos marinos, debido no sólo a los altos costos de operación y mantenimiento en el mar sino también a que los aerogeneradores suelen ser de mayor magnitud. Existen varias técnicas disponibles:

### Análisis de vibración

El análisis de vibraciones continúa siendo la tecnología más popular empleada en aerogeneradores, especialmente para equipos rotatorios (Hameed et al., 2009). Para este análisis se requieren diferentes sensores para diferentes frecuencias, es decir, se utilizan transductores de posición para el rango de baja frecuencia, sensores de velocidad en el área de frecuencia media, acelerómetros en el rango de alta frecuencia y sensores de energía de emisión espectral para frecuencias muy altas (Verbruggen, 2003).

En cuanto a las aplicaciones, es apropiado para monitorear la caja multiplicadora, los rodamientos y otros elementos del aerogenerador. Se han presentado también revisiones detalladas de los diferentes métodos de vibración y acústica, tales como mediciones de vibración en los dominios de tiempo y frecuencia, medidas de sonido, el método de choque de pulso y la técnica de emisión acústica (Tandon & Nakra, 1992; Tandon & Choudhury, 1999).

### Emisión acústica

Se produce una liberación rápida de la energía de deformación generando ondas elásticas cuando se altera la estructura de un metal y esto se puede analizar mediante emisiones acústicas. Las fuentes primarias de las emisiones acústicas en aerogeneradores son la generación y propagación de grietas, y se ha encontrado la técnica (Yoshioka, 1992) para detectar algunas fallas como por ejemplo el análisis de vibraciones (Tandon et al., 2007). La medición e interpretación de los parámetros de las emisiones acústicas para la detección de fallas en rodamientos de bolas con carga radial ya se ha demostrado a diferentes rangos de velocidad, así como su aplicación.

Las técnicas de ensayos no destructivos han utilizado ondas acústicas para mejorar la seguridad de las palas del aerogenerador y así permitir la evaluación de la criticidad de los daños en las láminas de pequeños aerogeneradores basado en emisiones acústicas. El uso de esta técnica crece gradualmente para el monitoreo de condición en los componentes del aerogenerador (componentes giratorios y palas).

### Técnicas de pruebas ultrasónicas

Las técnicas de prueba ultrasónica son utilizadas extensivamente por la industria eólica para la evaluación estructural de torres de aerogeneradores y palas. Esta técnica se emplea generalmente para la evaluación cualitativa de la superficie y la detección de los defectos estructurales sub-superficiales (Endrenyi et al., 2001). Las características de propagación de las ondas ultrasónicas permiten estimar la ubicación y el tipo de defecto detectado, proporcionando así un método confiable para determinar las propiedades de los materiales de los principales componentes del aerogenerador. Los algoritmos de procesamiento de señales que incluyen técnicas de tiempo-frecuencia y transformaciones Wavelet pueden ser utilizados para extraer mayor información (Barron, 1996; Leske & Kitaljevich, 2006; Toms & Toms, 1998; Yonghui et al., 2003).

En la literatura se presenta una técnica de ultrasonido para visualizar la estructura interna de las palas de los aerogeneradores, así como para encontrar defectos tales como delaminaciones, falta de pegamento, etc. Además de la técnica ultrasónica de aire acoplado se ha utilizado para investigar los defectos internos en palas de aerogeneradores. Las imágenes obtenidas mediante ultrasonidos permiten reconocer la geometría de los defectos y estimar sus dimensiones aproximadas.

La técnica adaptada de ultrasonido de aire acoplado se emplea para una mejor identificación de la forma y el tamaño de los defectos en una pala del aerogenerador.

### **Análisis de aceite**

Esta técnica tiene el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de las partes móviles por medio de la buena calidad del aceite. Esta técnica se realiza en su mayoría fuera de línea tomando muestras para vigilar la temperatura del aceite, la contaminación y la humedad (Yonghui et al., 2003).

La poca o mínima vibración presentada en los componentes puede ser evidente ante una falla y es el análisis del aceite el que proporciona advertencias tempranas. Un caso de estudio de una caja multiplicadora del aerogenerador se describe en (Leske & Kitaljevich, 2006). En el caso de contaminación excesiva del filtro, aceite contaminado o cambio en las propiedades de los componentes, la caracterización de las partículas puede dar una indicación de desgaste excesivo. Tales enfoques son particularmente eficaces y rentables para evitar fallas catastróficas (Barron, 1996; Toms & Toms, 1998).

### **Medición de deformaciones**

La medición de las deformaciones es bastante útil si se utilizan extensómetros para protección contra altos niveles de estrés, especialmente en las palas del aerogenerador. Se han realizado evaluaciones para la interpretación de la señal del medidor de deformación de los sensores del extensómetro instalados en las palas para el ajuste, la calibración y la selección del sensor (Papadopoulos et al., 2000). Los sensores de fibra óptica siguen siendo muy caros, pero existen sistemas que son rentables basados en fibra óptica (Wernicke, y otros, 2004).

Estos sistemas muestran la manera en cómo se puede realizar la monitorización de la carga utilizando sensores de deformación en las palas del rotor.

### **Efectos eléctricos**

La técnica de monitoreo de condición en equipos eléctricos, tales como motores, generadores y acumuladores se realiza utilizando el análisis de voltaje y corriente. Las mediciones de descarga se utilizan para redes de media y alta tensión. Por ejemplo, un análisis espectral de la corriente del estator (Schoen et al., 1995) del generador se puede utilizar para detectar fallas de aislamiento en el cableado sin influir en la operación del aerogenerador.

La resistencia eléctrica también se puede utilizar para la evaluación estructural de ciertos componentes del aerogenerador. La resistencia eléctrica varía con la rigidez dieléctrica y estos cambios abruptos se pueden utilizar para detectar grietas, delaminaciones, y fatiga. Por lo tanto, la técnica puede aplicarse a aerogeneradores en operación. Las referencias (Seo & Lee, 1999; Matsuzaki & Todoroki, 2006; Todoroki & Tanaka, 2002), demuestran cómo el principio de resistencia es útil para detectar el daño por fatiga. Mucho se ha investigado sobre estas técnicas por lo cual es un campo ya muy explotado pero existe un potencial significativo para llevarlas con éxito a la práctica.

### **Método del pulso de choque**

Este método se ha utilizado como método cuantitativo para el monitoreo de la condición de los rodamientos y funciona detectando los choques mecánicos que se generan cuando una bola o rodillo en un rodamiento entra en contacto con un área de canalización dañada o con escombros (Butler, 1973).

Las señales son almacenadas por transductores usando un valor de choque normalizado (Zhen et al., 2008) obteniéndose una indicación de la condición del sistema (Tandon & Nakra, 1992). Las señales de vibración de baja frecuencia detectada en la góndola y causada por otras fuentes pueden filtrarse fácilmente de forma electrónica.

Un caso de estudio del método del pulso de choque con un transductor piezoeléctrico se describe en (Morando, 1988). El método es usado ocasionalmente por la industria para apoyar las mediciones de vibración.

### Parámetros de proceso

El mantenimiento basado en parámetros de proceso para la detección de señales que superan los límites de control predefinidos es una práctica común en los aerogeneradores ya que los sistemas de control son cada vez más sofisticados y las capacidades de diagnóstico son cada vez mejores. La estabilidad transitoria y oscilatoria se analizan con diferentes escenarios de viento para el proceso de generación de electricidad en (Muller et al., 2006)]. Para una clara explicación del uso de señales y tendencias para la detección de fallas basados en la estimación de parámetros, véase (Zaher & McArthur, 2007).

### Supervisión del rendimiento

La relación entre parámetros tales como la potencia, la velocidad del viento, el ángulo de la pala y la velocidad del rotor también puede utilizarse para la evaluación de la condición del aerogenerador y para la detección temprana de fallas (Sørensen et al., 2002).

Los trabajos previos incluyen análisis de flickers de voltaje con velocidad de viento variable y turbulencia variable. Similar a la técnica de estimación de los parámetros de proceso, los métodos más sofisticados, incluyendo la tendencia, no se utilizan a menudo. El par electromagnético y la potencia generada con series de tiempo del viento tomada en el campo de un anemómetro se consideran en (Dolan, 2005).

### Inspección radiográfica

La detección de los componentes críticos estructurales del aerogenerador mediante la inspección radiográfica (utilizando rayos X) proporcionan información útil sobre la condición estructural del componente que se está inspeccionando. La imagen radiográfica depende del nivel de absorción de los fotones de rayos X a medida que pasan a través de un material. Por tanto, para detectar delaminaciones o grietas estrechas, con espacios de menos de 50 mm, se emplea la técnica de obtención de imágenes por rayos X. La obtención de imágenes por rayos X es útil para localizar los defectos internos del aerogenerador, y la ventaja principal de la inspección por rayos X es la precisión de la técnica (Peters, 1998). Recientemente se ha demostrado que un sistema radiográfico transportable para las palas de un aerogenerador es una solución para encontrar defectos y reducir el costo de la inspección (Fantidis et al., 2011).

### Termografía

La termografía se utiliza a menudo para monitorear componentes electrónicos y eléctricos e identificar fallas por temperatura (Smith, 1978).

La técnica aún se aplica cuando el equipo se encuentra operando y a menudo implica la interpretación visual de los puntos calientes que surgen debido a un mal contacto o a una falla del sistema. En la actualidad, la técnica no está aún bien establecida para el monitoreo de condición, aunque las cámaras y el software de diagnóstico son adecuados para dicho monitoreo. Las cámaras infrarrojas se han utilizado para visualizar variaciones en la temperatura en la superficie de las palas del aerogenerador (Rumsey & Musial, 2001) y pueden indicar con eficacia grietas así como lugares propensos a dañarse (Doliński & Krawczuk, 2009). A más largo plazo, esto podría ser aplicable también a la electrónica de potencia.

La termografía pulsada puede emplearse para la evaluación estructural de las palas, pero debido al voluminoso equipo involucrado, esta no es una metodología estándar entre los operadores de aerogeneradores.

Las primeras investigaciones sobre la realización de mediciones termográficas de las palas en operación utilizando helicópteros para desplegar las cámaras infrarrojas aún no han sido probadas satisfactoriamente y se enfrentan a serias dificultades de implementación.

### **Señales de los sensores y métodos de procesamiento de señal**

Independientemente de la técnica, la capacidad de un sistema de monitoreo de condición se basa en dos elementos básicos: el número, tipo de sensores y los métodos asociados de procesamiento y la simplificación de señales utilizados para extraer información importante de las diversas señales. Un sistema electrónico de medición adquirirá los datos y luego los procesará y distribuirá a un observador u otro sistema de control técnico.

La adquisición de datos implica la medición de las variables requeridas (por ejemplo, corriente, voltaje, temperatura, velocidad) y convertirlas en señales electrónicas para después elegir el tipo y número de sensores adecuados.

Puede ser necesario el acondicionamiento (realización de operaciones básicas incluyendo amplificación, filtrado, linealización y finalmente modulación/demodulación) para reducir la susceptibilidad de las señales de interferencia. Las técnicas de optimización pueden emplearse entonces (Levitin, 2006) en el procesamiento de las señales por un procesador de señales digitales (DSP), implicando no sólo el propio procesamiento sino también la clasificación y manipulación según sea necesario. La distribución subsiguiente será para una pantalla, computadora, dispositivo de almacenamiento u otro sistema. Existen varias opciones, incluyendo redes Ethernet con protocolo TCP/IP junto con WLAN para comunicarse con un sistema de adquisición de datos (SCADA) el cual es un sistema informático que permite el control local y remoto de las funciones de un aerogenerador, recolectando datos del parque eólico y analizándolos para reportar el rendimiento operativo y, por lo tanto, asegurar un funcionamiento eficiente. SCADA utiliza varios métodos de procesamiento de señales, siendo los más relevantes para aerogenerador los que se describen a continuación.

### **Métodos Estadísticos**

Una aplicación común de algoritmos estadísticos para los propósitos de monitoreo de condición es analizar las señales de los datos de los diversos sensores en aerogeneradores.

Las medidas estadísticas más comunes, como la media cuadrática y la amplitud pico se utilizan ampliamente para el diagnóstico de fallas, pero también, actualmente, se desarrollan características más avanzadas (Tan et al., 2007; Thiringer, 1996).

Otros parámetros estadísticos importantes son el valor máximo, el valor mínimo, la media, el pico a pico, la desviación estándar, el factor de forma, el factor de cresta, el factor de impulso, la integral definida, la relación de energía y la curtosis.

### **Análisis de Tendencias**

Aplicar un análisis de tendencias a un aerogenerador se refiere al concepto de reunir datos de los diversos sensores y buscar tendencias. Esto requiere de algoritmos particulares (Márquez, Tercero, & Schmid, 2007; Marquez, Weston, & Roberts, 2007), cuyas aplicaciones incluyen el monitoreo de los mecanismos pitch, aunque lo más común es el uso en los patrones de la potencia de salida de los generadores. Se debe tener en cuenta que el análisis de tendencia es una técnica diferente, específicamente para la previsión.

### **Métodos de Filtrado**

Cuando existen datos redundantes que contienen información que no es útil y que bien se podrían eliminar para evitar comprometer los cálculos entonces se utilizan los métodos de filtrado. Por ejemplo, las vibraciones de una góndola tendrán que ser filtradas mientras se mide la vibración de la caja multiplicadora. En (Llombart-Estopiñan, 2008) se presenta un método que utiliza los mínimos cuadrados para estimación de la curva de potencia. El inconveniente del método de filtrado, mientras se monitorizan las tendencias es que los parámetros tienen que ser ajustados para tener en cuenta las diversas condiciones de operación.

### **Análisis en el dominio del tiempo**

El análisis en el dominio del tiempo es una forma de monitorear las fallas en el aerogenerador tales como desbalances resistivos e inductivos entre las fases del rotor y del estator, además de las fallas de espira a espira en los devanados del rotor del generador. Las variaciones en las señales de corriente y las tendencias se utilizan normalmente para el análisis de vibraciones (Cheng et al., 2010), análisis de aceite y emisiones acústicas (Li & Li, 1995).

### **Análisis de Cepstrum**

El cepstrum de potencia es un enfoque basado en el tiempo definido como la Transformada de Fourier Inversa Logarítmica del espectro de potencia (Wismer, 1994). El cepstrum es muy adecuado para aplicaciones de diagnóstico de equipos en un aerogenerador. Los espectros de vibración de la caja multiplicadora comúnmente muestran bandas laterales de la frecuencia de mallado y las componentes armónicas que surgen de la modulación de la forma de onda del engrane de los dientes de la caja multiplicadora (Caselitz et al., 1997). Para las cajas multiplicadoras en buenas condiciones, el nivel de la banda lateral permanece, generalmente constante con el tiempo. Por lo tanto, los cambios en el número y la amplitud de las bandas laterales normalmente indican deterioro. La presencia de varias familias de bandas laterales y otros componentes puede complicar la distinción y la evaluación de la banda lateral.

### **Tiempo Síncrono Promedio**

También llamado dominio del tiempo promediado, es una técnica de procesamiento de señales que sirve de base para muchos algoritmos de detección de fallas de los engranajes en las cajas multiplicadoras.

Este método se emplea para identificar fallas en los rodamientos midiendo la vibración del mismo y obteniendo la forma de onda de la señal. También puede ayudar a identificar la fuente de vibración en los reductores del aerogenerador (Zheng & Wang, 2001). Por ejemplo, un diente de engranaje agrietado en una caja de engranajes que engrana una vez por revolución produce una vibración en la armadura altamente periódica que a su vez puede ser muy débil.

El tiempo síncrono promediado se puede utilizar para resaltar las características de la señal de vibración que se presentan durante un período de tiempo determinado, y puede trabajar con componentes de señal no periódica, filtrando el ruido de la señal al dominio del tiempo. Una vez que se alcanza la señal de tiempo promedio, es posible calcular la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), como a continuación se describe.

### Transformada Rápida de Fourier

El algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (Burrus et al., 1994) se utiliza para la conversión de una señal digital desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Los rangos de frecuencia corresponden a estados particulares (por ejemplo, rodamiento defectuoso o sin fallas), los rangos que reflejan la velocidad de rotación del eje principal y la forma y tamaño del elemento en cuestión. Todos los elementos del rodamiento generan vibración a frecuencias específicas (conocidas como frecuencias de falla) y por lo tanto la Transformada Rápida de Fourier encuentra mayor uso en el monitoreo de la caja multiplicadora. La Transformada Rápida de Fourier también se utiliza para los rodamientos donde, si el daño comienza a desarrollarse, la forma de la distribución de la vibración se desvía de la curva nominal de Gauss.

La ventaja del análisis del dominio de la frecuencia sobre el análisis del dominio del tiempo es su capacidad de identificar y de aislar ciertos componentes de la frecuencia (Jardine et al., 2006).

### Demodulación de Amplitud

Esta aproximación puede extraer señales periódicas de muy baja amplitud y frecuencia que podrían ser enmascarados por otras vibraciones de mayor energía como en las cajas multiplicadoras del aerogenerador. Mientras el espectro es útil para supervisar las frecuencias de los engranajes, el espectro envolvente proporciona una sensibilidad superior a las frecuencias de falla de los rodamientos en aplicaciones como en los aerogeneradores. Con su alta sensibilidad, se ha demostrado que la demodulación es buena para evaluar defectos que producen impactos, por ejemplo, contactos rodantes en rodamientos y contactos de diente a diente en los engranajes. También ayuda a reducir la complejidad del análisis siendo su principal ventaja la excelente visibilidad de las frecuencias de los defectos en los rodamientos sin la interferencia de otras frecuencias en el mismo espectro.

A pesar de las ventajas que ofrecen las cajas multiplicadoras en los aerogeneradores, todavía quedan barreras para su implementación. La selección de la ubicación del transductor es crucial para garantizar los resultados y, si el proceso de demodulación se basa en el filtrado de pasa-bajas, entonces la amplitud original de las señales defectuosas no se conserva.

### Análisis de Orden

La Transformada Rápida de Fourier es útil para estudiar las oscilaciones en los convertidores de energía de velocidad constante cuando se aplica a señales de series de tiempo.

Sin embargo, este algoritmo no es adecuado para aerogeneradores de velocidad variable ya que se requiere de un algoritmo diferente, basado en ángulos de rotación, es decir, el denominado análisis de orden, que es adecuado para desbalances de rotor y asimetrías aerodinámicas. La oscilación torsional de la góndola genera una señal que está fuera de fase con cualquier oscilación transversal, por lo que pueden ser separados y analizados individualmente (Caselitz & Giehardt, 2005). La interpolación y producción del espectro de órdenes conduce al cálculo de la Transformada Rápida de Fourier. Este análisis se puede usar para monitorear la condición general del rotor incluyendo la rugosidad superficial, desbalanceo de masa y asimetría aerodinámica.

### Transformada de Wavelet

La Transformada de Wavelet es una técnica de tiempo-frecuencia similar a la Transformada de Fourier de Tiempo Corto adecuada para señales no-estacionarias. Esta técnica proporciona un mapa en tiempo-frecuencia de 3D de la señal que se analiza (Abbate et al., 2012; Yang et al., 2008) e implica su descomposición en un conjunto de sub-señales o niveles con diferentes frecuencias (Newland, 1993; Strang, 1996). Es aplicable para monitorear el nivel de vibración causado por desalineación, rodamiento y otros problemas en aerogeneradores, y puede ser usado como una indicación de un aerogenerador defectuoso.

La Transformada de Wavelet se ha aplicado al análisis de datos para la detección de fallas y el diagnóstico de varias partes del aerogenerador incluyendo la caja multiplicadora, rodamientos y otros sistemas mecánicos. Dalpiaz y Rivola (1997) han completado la evaluación de la efectividad y fiabilidad de las Transformadas de Wavelet y la comparación con otras técnicas de análisis de vibraciones.

Baydar y Ball aplican con éxito la Transformada de Wavelet a las señales de vibración y señales acústicas y también se han utilizado para estimar la máxima amplitud de los coeficientes Wavelet (Baydar & Ball, 2003).

### Modelos Ocultos de Markov

Los modelos ocultos de Markov se han aplicado con éxito a la clasificación de los patrones en el análisis de tendencias (Kwon & Kim, 1999) y en el monitoreo de condición. Atlas et al., desarrollaron un método para predecir el desgaste con precisión (Atlas et al., 2000), al aplicar un método para monitorear procesos de fresado con los modelos ocultos de Markov. Yam et al. (2001) presentaron la aplicación de los modelos ocultos de Markov en la detección de fallas en rodamientos, y las características estadísticas dinámicas que existen en las observaciones actuales de las señales de vibración en la máquina han sido modeladas utilizando esta misma técnica.

### Nuevas Técnicas

La detección y diagnóstico de fallas es una sofisticada adaptación del sistema de monitoreo de condición que incorpora algoritmos inteligentes adecuados para la detección temprana de fallas que proporcionan una visión del nivel de criticidad correspondiente. Los métodos de detección y diagnóstico de fallas pueden o no basarse en modelos dependiendo de la forma en que se incorpora el conocimiento del proceso dentro de la unidad de procesamiento de señal.

La inteligencia artificial se emplea esencialmente para reproducir el razonamiento humano lo más exactamente posible, basándose el razonamiento en el comportamiento del sistema y anotándolo en términos de reglas.

La naturaleza dinámica de los entornos en los que operan los aerogeneradores ha llevado a la aparición de planes de mantenimiento predictivo que toman en cuenta cualitativamente el medio ambiente, así como su efecto real sobre la condición de los componentes.

Los sistemas expertos o los denominados sistemas de diagnóstico basados en reglas detectan e identifican fallas incipientes de acuerdo con las reglas que representan la relación de cada falla posible con la condición de equipo monitorizada real (Yam et al., 2001). Tienen que cumplir dos capacidades para ser eficaces: la adquisición e integración de nuevos conocimientos, y también la explicación de su razonamiento (García et al., 2006).

### Conclusión

El enfoque principal de este artículo de revisión en cuanto al monitoreo de condición y de los diversos métodos matemáticos para el procesamiento de señales se basa en las cajas multiplicadoras y en los rodamientos, rotores y palas, generadores y en la electrónica de potencia del aerogenerador de velocidad variable de doble alimentación. Se ha proporcionado también un resumen de las técnicas de monitoreo de condición disponibles a la par de algoritmos de procesamiento de señal y la selección de un conjunto de técnicas factibles y adecuadas para el aerogenerador de doble alimentación.

Para cada componente del aerogenerador existen diferentes técnicas que pueden emplearse, y para todas estas técnicas hay métodos matemáticos disponibles y referenciados en la literatura. Los principales obstáculos que enfrentan los diseñadores de sistemas de control para aerogeneradores siguen siendo:

- Selección del número y tipo de sensores;
- Selección de métodos de procesamiento de señales efectivos asociados con los sensores seleccionados; y
- Diseño de un modelo de fusión eficaz (es decir, la combinación de sensores y métodos de procesamiento de señales que proporcionan un rendimiento mejorado).

### Referencias

- Abbate, A., DeCusatis, C., & Das, P. K. (2012). *Wavelets and subbands: fundamentals and applications*. Boston: Springer Science & Business Media.
- Anon., (2005). Managing the wind: reducing Kilowatt-Hour costs with condition monitoring. *Refocus*, 6(3), 48-51.
- Atlas, L., Ostendorf, M., & Bernard, G. D. (2000). Hidden Markov models for monitoring machining tool-wear. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference*, 6, 3887-3890.
- Barron, D. R. (1996). *Engineering condition monitoring: practice, methods and applications*. Longman.
- Baydar, N., & Ball, A. (2003). Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(4), 787-804.
- Ben-Daya, M. S., & Duffuaa, A. R. (2009). *Handbook of maintenance management and engineering* (Vol. 7). Springer London.

- Burrus, C., McClellan, J., Oppenheim, A., Parks, T., Schafer, R., & Schuessler, H. (1994). Computer-based exercises for signal processing using MATLAB. *In E. Cliffs* (Ed.). (pp. 43-59). NJ: Prentice-Hall.
- Butler, D. E. (1973). The shock-pulse method for the detection of damaged rolling bearings. *Non-Destructive Testing*, 6(2), 92-95.
- Byon, E., & Ding, Y. (2010). Season-dependent condition-based maintenance for a wind turbine using a partially observed Markov decision process. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(4), 1823-1834.
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2001). *Maintenance excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*. New York: CRC Press.
- Caselitz, P., & Giebhardt, J. (2005). Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 127(2), 253-261.
- Caselitz, P., Giebhardt, J., Mevenkamp, M., & Reichardt, M. (1997). Application of condition monitoring systems in wind energy converters. *In EWEC-CONFERENCE*, (pp. 579-582). Dublin.
- Cheng, J., Yang, Y., & Yu, D. (2010). The envelope order spectrum based on generalized demodulation time-frequency analysis and its application to gear fault diagnosis. *Mechanical systems and signal processing*, 24(2), 508-521.
- Dalpiaz, G., & Rivola, A. (1997). Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(1), 53-73.
- Dolan, D. L., & Lehn, P. W. (2005). Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies. University of Toronto. 1-6.
- Doliński, L., & Krawczuk, M. (2009). Damage detection in turbine wind blades by vibration based methods. *In Journal of Physics: Conference Series*, 181(1).
- Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., Anders, G. J., Asgarpoor, S., & Billinton, R. G. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on power systems*, 16(4), 638-646.
- Fantidis, J. G., Potolias, C., & Bandekas, D. V. (2011). Wind turbine blade nondestructive testing with a transportable Radiography system. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1-7.
- Garcia, M. C., Sanz-Bobi, M. A., & del Pico, J. (2006). SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. *Computers in Industry*, 57(6), 552-568.
- Hameed, Z., Hong, Y. S., Cho, Y. M., & Song, C. K. (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(1), 1-39.
- Igarashi, T., & Hamada, H. (1982). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings: First report (Vibration of ball bearings with one defect). *Bulletin of JSME*, 25(204), 994-1001.
- Igarashi, T., & Yabe, S. (1983). Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (First report: sound of ball bearing with one defect). *Bulletin of JSME*, 26(220), 1791-1798.

- Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483-1510.
- Kwon, K. C., & Kim, J. H. (1999). Accident identification in nuclear power plants using hidden Markov models. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(4), 491-501.
- Leske, S., & Kitaljevich, D. (2006). Managing gearbox failure Dewek. *Dewi Magazine*, (29).
- Levitin, G. (2006). Genetic algorithms in reliability engineering. *Reliability Engineering and System Safety*, 975-976.
- Li, C. J., & Li, S. Y. (1995). Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *Wear*, 185(1-2), 67-74.
- Llombart-Estopiñan, A. (2008, March). Improving the operation and maintenance of wind farms: determination of wind turbine performance. In: *Proceedings of ICREPQ.*, 1(6), 8-14.
- Logan, J., & Kaplan, S. (2008). *Wind Power in the United States: Technology, Economic, and Policy Issues*. Retrieved from <http://www.fas.org/-sgp/crs/misc/RL34546.pdf>
- Márquez, F. P., Tercero, D. J., & Schmid, F. (2007). Unobserved component models applied to the assessment of wear in railway points: A case study. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1703-1712.
- Marquez, F. P., Weston, P., & Roberts, C. (2007). Failure analysis and diagnostics for railway trackside equipment. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1411-1426.
- Matsuzaki, R., & Todoroki, A. (2006). Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes. *Composites science and technology*, 66(3), 407-416.
- McGowan, J. G., & Connors, S. R. (2000). Windpower: a turn of the century review. *Annual review of energy and the environment*, 25, 147-197.
- McMillan, D., & Ault, G. W. (2008). Condition monitoring benefit for onshore wind turbines: sensitivity to operational parameters. *IET Renewable Power Generation*, 2(1), 60-72.
- Milborrow, D. (2006). Operation and maintenance costs compared and revealed. *Windstats Newsletter*, 19(3), 1-3.
- Morando, L. E. (1988). Measuring shock pulses is ideal for bearing condition monitoring. *Pulp Paper*, 62, 96-98.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. New York: Industrial Press Inc.
- Muller, H., Poller, M., Basteck, A. T., & Pfister, J. (2006). Grid compatibility of variable speed wind turbines with directly coupled synchronous generator and hydro-dynamically controlled gearbox. In *Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, 307-315.
- Newland, D. E. (1993). *Random vibrations, spectral analysis and wavelet analysis*. Essex, England: Longman.
- Papadopoulos, K., Morfiadakis, E., Philippidis, T. P., & Lekou, D. J. (2000). Assessment of the strain gauge technique for measurement of wind turbine blade loads. *Wind Energy*, 3(1), 35-65.

- Pedregal, D. J., García, F. P., & Roberts, C. (2009). An algorithmic approach for maintenance management based on advanced state space systems and harmonic regressions. *Annals of Operations Research*, 166(1), 109-124.
- Peters, S. (1998). Handbook of composites. London: Chapman & Hall.
- Rumsey, M. A., & Musial, W. (2001). Application of infrared thermography nondestructive testing during wind turbine blade tests. *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Solar Energy Engineering*, 123(4), 271.
- Schoen, R. R., Lin, B. K., Schlag, J. H., & Farag, S. (1995). An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6), 1280-1286.
- Seo, D. C., & Lee, J. J. (1999). Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network. *Composite structures*, 47(1), 525-230.
- Smith, B. (1978). Condition monitoring by thermography. *NDT International*, 11(3), 121-122.
- Sørensen, B. F., Lading, L., Sendrup, P., McGugan, M., Debel, C., Kristensen, O., & Larsen. (2002). Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades - a preproject. *Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark*.
- Strang, G. &. (1996). *Wavelets and filter banks*. SIAM.
- Tan, C., Irving, P., & Mba, D. (2007). A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1), 208-233.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), 469-480.
- Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings. *Tribology International*, 25(3), 205-212.
- Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings—a review. *The shock and vibration digest*, 24(3), 3-11.
- Tandon, N., Yadava, G. S., & Ramakrishna, K. M. (2007). A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. *Mechanical systems and signal processing*, 21(1), 244-256.
- Thiringer, T. (1996). Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(3), 601-606.
- Todoroki, A., & Tanaka, Y. (2002). Delamination identification of crossply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method. *Composites Science and Technology*, 62(5), 629-639.

- Toms, L. A., & Toms, A. M. (1998). *Machinery oil analysis: methods, automation and benefits*. Coastal.
- Vachon, W. (2002, June). Long-term O&M costs of wind turbines based on failure rates and repair costs. In Proceedings WINDPOWER. *American Wind Energy Association annual conference, Portland, OR, 2-5*.
- Verbruggen, T. W. (2003, April). Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring WT-Ω. *Final Report*, 1-39.
- Wernicke, J., Shadden, J., Kuhnt, S., Byars, R., Rhead, P., & Damaschke, M. (2004). Field experience of fibre optical strain sensors for providing real time load information from wind turbine blades during operation. *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, (pp. 22-25). London, UK.
- Wiggelinkhuizen, E. V., Rademakers, L. W., Xiang, J., Watson, S., & Christensen, A. J. (2007). CONMOW: condition monitoring for offshore wind farms. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, 118-122.
- Wisner, N. J. (1994). Gearbox analysis using cepstrum analysis and comb liftering. Denmark.
- WWEA. (2009). World wind energy report 2009: <http://www.wwindea.org>
- Yam, R. C., Tse, P. W., Li, L., & Tu, P. (2001). Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(5), 383-391.
- Yang, W., Tavner, P. J., & Wilkinson, M. (2008). Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine with a synchronous generator using wavelet transforms. In: *The 4th International conference on power electronics, machines and Drives 2008 (PEMD2008), York, UK*, 6-10.
- Yonghui, Y., Weihua, W., Xinpin, Y., Hanliang, X., & Chengtao, W. (2003). An integrated on-line oil analysis method for condition monitoring. *Measurement Science and Technology*, 14(11), 1973-1977.
- Yoshioka, T. (1992). Detection of rolling contact sub-surface fatigue cracks using acoustic emission technique. *Lubrication Engineering*, 49(4), 303-308.
- Zaher, A. S., & McArthur, S. D. (2007). A multi-agent fault detection system for wind turbine defect recognition and diagnosis. In *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne POWERTECH 2007*, 22-27.
- Zhen, L., Zhengjia, H., Yanyang, Z., & Xuefeng, C. (2008). Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme. *Mathematics and computers in simulation*, 79(3), 318-338.
- Zheng, G. T., & Wang, W. J. (2001). A new cepstral analysis procedure of recovering excitations for transient components of vibration signals and applications to rotating machinery condition monitoring. *Journal of vibration and acoustics*, 123(2), 222-229.