

APLICACIÓN DEL MODELADO DE SISTEMAS DE CONTROL AL DIAGNOSTICO DE FALLOS EN EL MANTENIMIENTO DE AEROGENERADORES

Luis Felipe Blázquez Quintana^{1}, Luis Javier Miguel González²*

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática. E.I.I.I. Universidad de León
Campus de Vegazana, s/n, 24071 León, España

²Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. E.I.I. Universidad de Valladolid
Paseo del Cauce, s/n, 47011 Valladolid, España

Resumen

Este artículo plantea la mejora del mantenimiento en aerogeneradores, mediante la implementación de técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos. Por eso se describen las citadas técnicas de diagnóstico, centrándose en aquellas que se basan en el modelo de la planta y que pueden incorporar elementos de inteligencia artificial. A continuación se presentan los métodos actualmente utilizados en el mantenimiento de aerogeneradores, poniéndose de manifiesto que mayoritariamente consisten en acciones de mantenimiento preventivo. Con las técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos expuestas es posible extender e incluso generalizar el mantenimiento predictivo en los aerogeneradores, lo que se traduce en una reducción de los costes de mantenimiento y un aumento de la disponibilidad de las máquinas.

Abstract

This article proposes the improvement of the maintenance methods by including automated fault detection and diagnosis techniques to be applied to wind turbines. For this purpose, these techniques are presented, especially those, which base on the model of the plant and can integrate some element of artificial intelligence. The typical maintenance methods related to the wind power system are also showed, where is observed that they are most of all preventive maintenance. With these model-based fault diagnosis techniques, the application of predictive maintenance to the wind power system can be extended and even generalized. The result would be a reduction of the costs of maintenance and an increase of the availability of the machines.

Palabras clave/Keywords: Detección y diagnóstico de fallos; Mantenimiento; Aerogenerador

*Contacto/Corresponding autor: diefbq@unileon.es

1.Introducción

Aproximadamente el 2% de la energía que llega del sol se transforma en energía cinética de los vientos atmosféricos. El 35% de esta energía se disipa en la capa atmosférica a tan solo un kilómetro por encima del suelo. Del resto se estima que por su aleatoriedad y dispersión solo podría ser utilizada 1/13 parte. Para ello habría que colocar seis aerogeneradores imaginarios de 1,5 MW de potencia y 77 metros de diámetro de rotor en cada kilómetro cuadrado de las áreas terrestres con los mejores vientos del planeta, con lo que se obtendría la potencia eléctrica de 72 TW [1], y podría reemplazar 54.000 Mtep. Es decir, el aprovechamiento del viento cubriría diez veces el consumo de electricidad mundial del año 2002 con 14.700 TWh [2]. Para ello habría que colocar nada menos que 48 millones de turbinas, en un espacio de 8 millones de km², una extensión equivalente a 16 veces España, si bien el terreno realmente afectado por infraestructuras eólicas no superaría los 250.000 km², es decir 0,0005 veces toda la superficie del planeta.

Estas cifras dan una idea de los enormes recursos eólicos disponibles sobre la Tierra, que unido a las ventajas medioambientales que presentan, hace que la presencia de energía eólica en el mundo haya experimentado un gran incremento durante los últimos años. Así, se ha llegado a los 175 GW de potencia instalada a mediados de 2010, de los cuales aproximadamente 16 GW se añadieron ese mismo año [3]. Basado en un acelerado desarrollo tecnológico y en políticas mejoradas, World Wind Energy Association estima que es posible alcanzar los 1.900 GW de potencia eólica instalada para el año 2020. Un estudio publicado por Energy Watch Group revela que para el año 2025 es muy probable que se alcancen los 7.500 GW instalados alrededor del mundo, produciendo un total de 16.400 TWh. Las energías renovables conjuntamente excederían el 50% del suministro global de energía. Como resultado, la energía eólica con la solar conquistarían el 50% del mercado de nuevas instalaciones generadoras de energía alrededor del mundo para el año 2019. La generación mundial de energía no renovable podría llegar a su cima en el año 2018, mientras que para el año 2037 podría dejar completamente de producir. Las industrias fabricantes de turbinas de Dinamarca, Alemania y España dominan los mercados eólicos a nivel mundial y se espera que esta situación se mantenga durante los próximos años.

Los aerogeneradores requieren, un mantenimiento orientado a minimizar el número de horas en que permanecen fuera de servicio a causa de fallos, averías o paradas para su revisión. Como consecuencia del mantenimiento se aumenta la producción y se mejora la calidad, debido al aumento en la fiabilidad, disponibilidad y precisión de los medios, así como en la vida útil de los mismos. En la mayoría de los casos, los parques eólicos precisan de inspecciones de mantenimiento regulares de cada 2 a 4 años. Diferentes estudios muestran que los costes asociados a la operación y el mantenimiento han experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos 10 años, y son los más altos durante la explotación de los parques eólicos; en concreto constituyen el 57% del total de los gastos de explotación. Dicho porcentaje se desglosa en un 87% correspondiente al aerogenerador y el 13% restante a las otras instalaciones del parque [4], [5]. Por eso, el esfuerzo de los propietarios del parque se centra en optimizar la producción reduciendo los tiempos de parada de los aerogeneradores realizando un adecuado mantenimiento de los equipos. En este sentido, en los últimos años existe una tendencia creciente a la realización de inspecciones de aerogeneradores en servicio, con objeto de mejorar la disponibilidad de las máquinas y reducir el lucro cesante de generación.

Esa necesidad de mejorar el mantenimiento en los aerogeneradores, reduciendo en lo posible su coste, constituye la motivación fundamental de este trabajo. Así, este artículo plantea como estrategia de mejora la implementación de las técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos en el mantenimiento de los aerogeneradores. Por eso en la sección 2 se presentan las diferentes técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos existentes, profundizando en aquellas que se basan en el modelo de la planta y a su vez pueden incorporar elementos de inteligencia artificial. Dichas técnicas tienen como objetivo fundamental la detección temprana de fallos incipientes en el proceso productivo, haciendo posible en su caso la subsanación de los mismos sin tener que detener dicho proceso; lo que conlleva generalmente el aumento de las características de fiabilidad, disponibilidad, seguridad y protección medioambiental. La sección 3 expone los métodos actualmente manejados en el mantenimiento de aerogeneradores, incidiendo sobre todo en los que

forman parte del mantenimiento tanto preventivo como predictivo, que es de hecho donde es posible implementar las citadas técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos. Finalmente se presentan las conclusiones del estudio sobre la citada implementación.

2. Detección y diagnóstico de fallos

Un sistema de detección y diagnóstico de fallos implementa las tareas siguientes [6], [7], [8]: Detección del fallo, es la indicación de que algo está yendo mal en el sistema supervisado. Aislamiento del fallo, es la determinación de la localización exacta del fallo (el componente que está defectuoso). Identificación del fallo, se refiere a la determinación de la magnitud del fallo. La importancia de estas tres tareas es siempre relativa, pero en general decreciente según el orden dado, y puesto que el coste tecnológico asociado es creciente, el interés económico determinará hasta donde debe llegar una aplicación real en cada caso. Mientras que la detección de fallos es algo obligado en cualquier sistema práctico y el aislamiento de los mismos es casi de la misma importancia, la identificación de los fallos, aunque indudablemente útil, puede no justificarse debido al esfuerzo extra que requiere especialmente si no implica ninguna acción de reconfiguración.

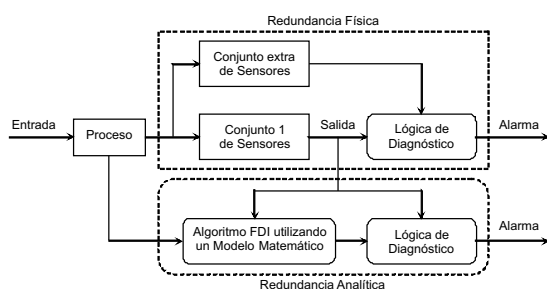


Figura 1. Redundancia física frente a redundancia analítica

Los métodos tradicionales de detección y diagnóstico de fallos se basan en la comparación de variables medidas del proceso con valores límite constantes y preestablecidos (chequeo de umbrales) o la aplicación de sensores redundantes (redundancia física), como se observa en la figura 1. Otros métodos más avanzados se basan en análisis estadísticos de los datos [9], especialmente indicados para grandes sistemas que producen una gran cantidad de datos, ya que reducen esa gran cantidad

de información quedándose con la parte más significativa. El análisis de la componente principal y los mínimos cuadrados parciales son métodos estadísticos multivariantes que generalizan los gráficos de control univariable, los cuales se han venido aplicando durante décadas.

Otros métodos se basan en la redundancia analítica [7], [10], [11], esto es, la comparación del comportamiento real de la planta con el esperado según un modelo matemático, tal y como se presenta también en la figura 1. Algunos de estos métodos tienen un marco determinista, como las ecuaciones de paridad a partir del modelo de espacio de estado, ecuaciones de paridad a partir del modelo entrada-salida y observadores [7], [12]; mientras que otros métodos se formulan en un contexto estocástico, como los filtros de Kalman [13], y la estimación de parámetros [14].

Cuando los modelos analíticos no son lo suficientemente fiables, una red neuronal correctamente entrenada se puede usar como modelo dinámico no lineal de un sistema [11], [15], [16]. Algunas veces se requiere información cualitativa para que el modelo represente adecuadamente al sistema, y es aquí donde la lógica borrosa [17] y las redes neuro-borrosas [18] tienen su papel en aplicaciones de diagnóstico de fallos. También se utilizan herramientas de programación evolutiva para diseñar observadores y redes neuronales [11], [16].

El trabajo sobre diagnóstico de fallos en la comunidad de la Inteligencia Artificial, conocida como comunidad DX, se enfocó inicialmente sobre métodos basados en el conocimiento o sistemas expertos, donde se aplica la heurística para asociar explícitamente los síntomas con las hipótesis de fallos. Las deficiencias de estos métodos basados en sistemas expertos puros, llevaron al desarrollo de técnicas de diagnóstico de fallos basadas en modelos cualitativos en la forma de ecuaciones diferenciales cualitativas, gráficos dirigidos con signo, modelos funcionales cualitativos, modelos estructurales, etc. [9], [11]. La mayoría de los trabajos que utilizan métodos basados en el conocimiento, trabajan con modelos del sistema en presencia de fallos. Esto implica la necesidad de construir un modelo diferente para cada fallo. Muchas veces no es posible obtener un modelo del sistema con un fallo concreto, porque el sistema podría dañarse con el fallo, o porque podría ser peligroso provocar el fallo, o porque ese fallo no se puede provocar.

También existen técnicas de diagnóstico de fallos, conocidas como aislamiento recursivo (recursive isolation), que combinan el diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta con aquél basado en inteligencia artificial. El aislamiento recursivo se basa tanto en representaciones causales cualitativas del proceso como en modelos locales cuantitativos. Se ha inspirado en la inteligencia artificial para el modelado causal de los sistemas físicos y para estudiar la fiabilidad lógica. Pero toma la ventaja de la teoría de control en el nivel de cada modelo elemental para comprobar la consistencia local. La dinámica del proceso se tiene en cuenta utilizando relaciones entre

variables que manejan el tiempo explícitamente [19].

2.1-Detección y diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta

La principal ventaja del diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta [6], [7] es que no es necesario añadir componentes hardware al proceso para implementarlo. Dicho método se puede implementar como un algoritmo en la propia computadora que controla el proceso. Además, las medidas necesarias para el control del proceso son en muchos casos suficientes para estos algoritmos, por lo que no se necesitaría instalar nuevos sensores. Así, sólo sería necesario una computadora más potente y aumentar la capacidad de almacenamiento de información para su implementación. El enorme desarrollo en tecnología de computadores de los últimos años ha hecho factible la aplicación práctica de tales métodos.

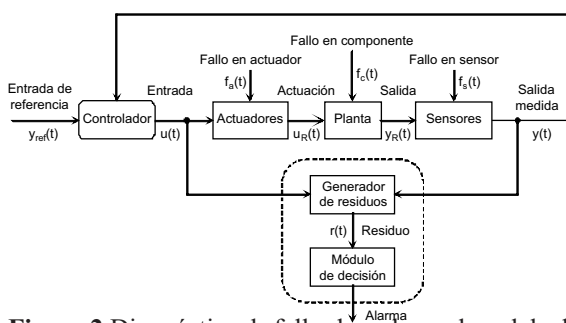


Figura 2. Diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta

Se observa en la figura 2 que el sistema de detección y diagnóstico de fallos utiliza un modelo del proceso monitorizado en lazo abierto, aunque dicho proceso opere globalmente en lazo cerrado [6]. El sistema de detección y diagnóstico de fallos consta principalmente de dos componentes: el generador de residuos y el módulo de decisión.

•El generador de residuos es donde se chequea el comportamiento de la planta. Con la información que le llega del sistema de adquisición de datos del proceso, calcula los correspondientes residuos. Los residuos son cantidades que miden las inconsistencias entre las variables reales de la planta y las correspondientes variables del modelo matemático. Dichos residuos deberían ser cero en ausencia de fallo, aunque realmente no son cero debido a la presencia de ruidos, perturbaciones y errores de modelado. Una característica importante es la sensibilidad del generador de residuos a los fallos [17], es decir, la capacidad del generador de residuos de detectar fallos de tamaño pequeño.

•El módulo de decisión evalúa la fiabilidad de cada residuo. Los fallos que se producen en la planta deben causar ciertos cambios en los residuos, dependiendo del tipo de fallo. Se pueden aplicar una gran variedad de tests estadísticos, en función de las propiedades del residuo, para detectar dichos

cambios [20], [21]. Sin embargo, la presencia de perturbaciones, ruidos y errores de modelado hace que el comportamiento de los residuos sea menos fiable de lo que sería deseable. Para evitar falsas alarmas, a los umbrales de los tests de detección de fallos se les suele asignar valores altos. Esto implica un criterio conservador, y a menudo produce un retraso en el diagnóstico del fallo. La incertidumbre del modelo incrementa el problema de la selección de los umbrales [15].

La generación de residuos es un tema central en la detección y diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta. Los métodos más comunes utilizados en la generación de residuos son los siguientes: observadores, ecuaciones de paridad y estimación de parámetros.

•Observadores. La idea fundamental del método de generación de residuos basado en observadores o filtros consiste en estimar las salidas del sistema a partir de las medidas o un conjunto de medidas, utilizando observadores de Luenberger en un contexto determinista [7], o bien filtros de Kalman en un contexto estocástico [13]. Entonces el error de la salida estimada, o las innovaciones en el caso estocástico, se usan como residuos.

•Ecuaciones de paridad. La idea básica de las ecuaciones de paridad es proporcionar un chequeo de las medidas del proceso monitorizado. El concepto de las ecuaciones de paridad fue generalizado como una extensión del caso de la redundancia paralela o estática, primero utilizando las ecuaciones de redundancia temporal del sistema dinámico según el modelo de espacio de estado. Las ecuaciones de paridad también se pueden construir utilizando un modelo entrada-salida de la transformada Z, o una representación de matriz de transferencia discreta [8].

•Estimación de parámetros. Este método se basa en la suposición de que los fallos se reflejan en los parámetros físicos del sistema tales como fricción, masa, viscosidad, resistencia, inductancia, capacitancia, etc. La idea básica del método de detección es que los parámetros del proceso sean continuamente estimados en línea por métodos bien conocidos de identificación paramétrica [14] y los resultados obtenidos se comparen con los parámetros del modelo de referencia o nominal obtenidos inicialmente en condiciones de ausencia de fallo. Cualquier discrepancia sustancial es indicativa de la existencia de algún fallo.

Existen relaciones entre los métodos de generación de residuos basados en observadores y los basados en ecuaciones de paridad, que llegan al grado de equivalencia cuando ambos métodos utilizan modelos lineales [12], [22]. Tradicionalmente, el problema del diagnóstico de fallos en sistemas dinámicos no lineales se ha manejado en dos etapas. En la primera se linealiza el modelo alrededor de un punto de operación, para en una segunda etapa aplicar técnicas robustas para generar los residuos. Este método solo funciona bien cuando la linealización no causa mucha diferencia entre los

modelos lineal y no lineal y el sistema opera cerca del punto de operación especificado. Al tratar con sistemas con no linealidades altas y amplios rangos de operación, el problema del diagnóstico de fallos debe manejarse utilizando directamente técnicas no lineales. En este sentido se han propuesto esquemas de generación de residuos integrados en ecuaciones de paridad no lineales [23]. La implementación de filtros extendidos de Kalman para procesos no lineales fue presentada por [24]. También se han obtenido resultados con observadores no lineales [25].

3-Mantenimiento de aerogeneradores.

Las labores de mantenimiento de un parque eólico se basan en un seguimiento periódico del funcionamiento de los aerogeneradores y de las causas que provocan sus paradas, al objeto de conseguir la mayor disponibilidad posible de los mismos. Para el caso de mantenimiento correctivo, provocado por averías que requieren una actuación intensiva, es importante realizar un seguimiento lo más completo posible de la incidencia: detección de la avería, análisis, organización de la reparación, documentación, etc. El mantenimiento preventivo incluye las acciones periódicas que recomienda el fabricante para mejorar el funcionamiento de los equipos mecánicos, eléctricos o hidráulicos que componen el aerogenerador. Dentro de las tareas del mantenimiento preventivo se encuentra, detección de fisuras o grietas en el buje o palas, revisión del par de apriete de la tornillería, lubricación de cojinetes, soportes y rodamientos, test de aceite de la caja multiplicadora, revisión de los niveles del sistema hidráulico, etc. El mantenimiento preventivo se divide en dos tipos: mantenimiento planificado (scheduled maintenance) y mantenimiento basado en la condición (condition based maintenance) [26], [27]. El primero se lleva a cabo según establezca un tiempo planificado o un número de unidades en uso; mientras que el segundo se basa en las prestaciones y/o en el muestreo de parámetros y en las acciones subsiguientes. Este segundo tipo está realmente más cerca del mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo consiste en la detección precoz de fallos y averías de los sistemas que componen el aerogenerador mediante su monitorización y diagnóstico continuo. El uso de este tipo de mantenimiento no se usa de forma generalizada en la mayoría de los parques eólicos, sin embargo presenta una serie de ventajas. Así, el mantenimiento predictivo permite una reducción de los costes de reparación o sustitución producidos por una avería; proporciona un aumento de la disponibilidad de las máquinas; permite realizar una planificación más efectiva de las labores de mantenimiento, adaptándose mejor a la vida del equipo que una estrategia de mantenimiento preventivo en el cual se realizan paradas o sustituciones de equipos tanto si son necesarias como si no. La protección de los equipos industriales es más efectiva al tener en cuenta el estado de salud

de los componentes para así poder evitar el fallo de los mismos. Esto permite optimizar la inversión realizada en el mantenimiento. El principal inconveniente del mantenimiento predictivo es que requiere un tratamiento intensivo de la información recibida de cada aerogenerador y un sistema eficaz de detección de anomalías y diagnóstico de componentes. El volumen de información necesario para realizar un mantenimiento predictivo en un parque eólico con 30 o 40 máquinas supone disponer de un sistema de telecontrol muy potente adaptado a las necesidades de este tipo de mantenimiento, lo que puede encarecer sensiblemente el precio de la instalación. Es aquí donde las técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos pueden favorecer la implantación del citado mantenimiento predictivo.

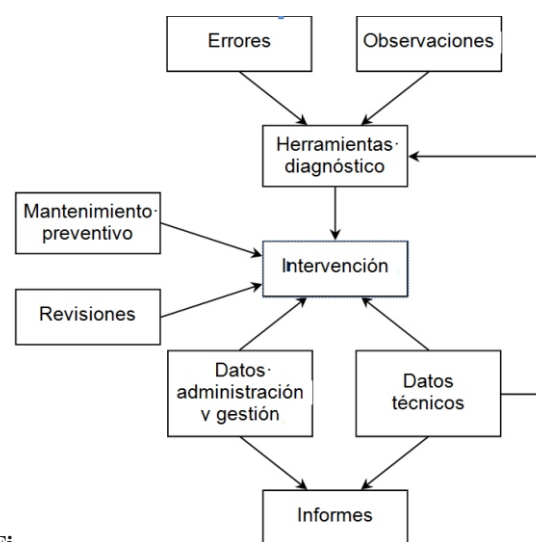


Figura 3. Gestión de la información en los ámbitos de mantenimiento

En la figura 3 se representa un diagrama de gestión de la información generada en el proceso de mantenimiento de un parque eólico [28]. El histórico de alarmas del parque y las observaciones del personal de planta permiten establecer un diagnóstico del estado de los componentes que junto a los planes de mantenimiento preventivo y los resultados de las revisiones anteriores permiten planificar y optimizar el calendario de intervenciones en el parque. El resultado de los trabajos de mantenimiento ejecutados debe ser oportunamente documentado en una serie de informes técnicos y administrativos donde se recoja los valores de ajuste de los componentes revisados, cronograma de averías, materiales utilizados, dedicación, servicios, etc. Toda esta información es importante realimentarla durante la fase de diagnóstico para el correcto funcionamiento del proceso.

En cuanto al cronograma de las averías que mantienen una máquina fuera de servicio, es muy importante analizar los tiempos desde que se produce la avería hasta que se detecta y finalmente se subsana. En la figura 4 se muestra un esquema con los tiempos asociados a la cronología de una avería [28]. Dichos tiempos son: tiempo de detección de avería t_d , tiempo de análisis y preparación t_a , tiempo de espera debido a causas climáticas t_e , tiempo efectivo de reparación t_r , y tiempo de verificación t_v . La incorporación de las técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos en el mantenimiento de aerogeneradores va a permitir reducir t_d y t_a , a la vez que disminuir la aparición

de averías causadas por fallos no detectados a tiempo.

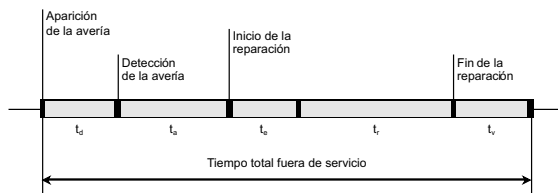


Figura 4. Cronología de Averías

Como ya se ha indicado, actualmente se aplican en la industria eólica técnicas de mantenimiento preventivo y en menor medida predictivo. Las más habituales son las siguientes [29], [30]:

- **Análisis de vibraciones.** Es una de las técnicas de monitorización más utilizadas en máquinas rotativas. En los aerogeneradores se aplica a los rodamientos y las ruedas dentadas de la multiplicadora, y a los rodamientos del generador. Los tipos de sensores que se utilizan dependen, entre otros factores, del rango de frecuencias. Así, están los transductores de posición para el rango de bajas frecuencias, los sensores de velocidad para media frecuencia, los acelerómetros para alta frecuencia, y los sensores de muy alta frecuencia para vibraciones acústicas. Los acelerómetros miden la aceleración en diferentes puntos. Con estas aceleraciones se obtienen además velocidades y desplazamientos aplicando una y dos integraciones respectivamente. Estos datos se suelen procesar mediante algoritmos de análisis espectral, los cuales se basan en la transformada rápida de Fourier, y con los que se pueden diferenciar las vibraciones causadas por la rotación normal de las máquinas, de aquellas causadas por desgaste o daños en la turbina, rodamientos y engranajes; como desequilibrio, desalineación y holguras. Para la adquisición y evaluación de la vibración de máquinas rotativas medida en partes estáticas de éstas se toma como referencia la norma ISO 10816-1.

- **Análisis de aceite de la multiplicadora y ferrogragías.** El análisis de aceite consiste en la realización de tests físico-químicos en el aceite (viscosidad, oxidación, nitración, TAN, contenido en agua) con el fin de determinar si el lubricante se encuentra en condiciones de ser empleado, o si debe ser cambiado. La ferrografía o análisis de partículas de desgaste, ISO 4406:1999(E), sin embargo, utiliza el lubricante como un medio para determinar el estado de la máquina lubricada. Haciendo un análisis ferrográfico, se pueden detectar problemas tales como: desgastes en engranajes, picado y oxidaciones. En la mayoría de las ocasiones, el análisis del aceite de la multiplicadora se realiza fuera de línea mediante la toma de la muestra correspondiente. El citado análisis determinará el estado del propio aceite, contaminación, humedad, los niveles de partículas y de materiales que presenta; y con ello se pueden identificar los componentes que presentan un desgaste excesivo. Actualmente se está incrementando la tendencia a realizar el citado análisis del aceite en línea.

- **Alineación del generador con la multiplicadora.** Se comprueba la correcta alineación de los ejes del generador y la multiplicadora mediante un alineador láser, de manera que las líneas centrales de los ejes sean concéntricas durante el funcionamiento normal del aerogenerador. Con una máquina convenientemente alineada obtendremos varias ventajas: mayor tiempo de producción; menor desgaste de juntas, rodamientos y acoplamientos; menor vibración.

- **Medidas de deformación.** Las medidas de deformación obtenidas con galgas extensiométricas son útiles en aerogeneradores para predecir la esperanza de vida y salvaguardar los niveles de deformación, especialmente en las palas. En este sentido, los sensores de fibra óptica son muy prometedores, aunque actualmente son demasiado caros para que se apliquen de forma masiva.

- **Efectos eléctricos.** Muchos estudios señalan que los fallos en el generador, fundamentalmente la pérdida de aislamiento en el estator y los daños en los rodamientos, constituyen las averías más abundantes en los aerogeneradores [31], [32], [33]. Los generadores se monitorizan utilizando medidas de las corrientes del estator y del rotor, voltajes del estator, velocidad del rotor y temperatura de los devanados. La técnica más habitual es el análisis espectral de las corrientes del estator, mediante la cual se pueden detectar averías mecánicas y eléctricas. Para los acumuladores la impedancia se puede medir para estabilizar la condición y la capacidad.

- **Inspección visual.** Son inspecciones tanto documentales como visuales, en las que se verifican una serie de puntos dando conformidad o no sobre el estado de los mismos. Existen check-list para todas las partes que componen el aerogenerador, así como para los sistemas eléctricos, de emergencia o su plan de mantenimiento. Los métodos utilizados incluyen inspección por líquidos penetrantes e inspección visual con el uso de cámaras en miniatura o endoscopia. Por ejemplo, un endoscopio se utiliza para la inspección visual de las diferentes etapas de la multiplicadora y los rodamientos. Así pueden apreciarse desgastes prematuros o roturas que comprometan el normal funcionamiento de la máquina. Sin embargo, los componentes dañados generalmente se examinan en el laboratorio. Para la inspección de las palas del aerogenerador se utiliza el método de digiscoping, que consiste en unir una cámara digital, réflex o compacta, con un telescopio terrestre, utilizando entre ambos elementos el propio ocular del telescopio. La longitud focal del digiscoping es mucho mayor que la que se consigue con los teleobjetivos tradicionales, permitiendo obtener a distancia imágenes muy aumentadas. Así es posible revisar: fisuras; descascarillados, desprendimientos y desgastes de gel-coat; picaduras en la superficie; daños por impacto de rayos; despegues en bordes de salida; suciedad; estado de elementos accesorios como captador de rayos y cintas de protección de borde.

- **Termografía infrarroja.** El método de imágenes térmicas es un método de detección de defectos o anomalías en superficies sometidas a variaciones de temperatura, mediante la utilización de sensores infrarrojos. La termografía se utiliza a menudo para monitorizar e identificar fallos en componentes eléctricos y electrónicos.

- **Condiciones físicas de los materiales.** Este tipo de monitorización está principalmente enfocado a la detección de grietas y su crecimiento. En general se utiliza fuera de línea y no suele ser adecuado para la monitorización en línea basada en la condición de los aerogeneradores. Una excepción pueden ser los fusibles de fibra óptica en las palas y la monitorización acústica de la estructura.

- **Monitorización acústica.** Tiene una fuerte relación con la monitorización de vibraciones, aunque hay una diferencia fundamental. Mientras que los sensores de vibración se montan rígidamente acoplados al componente en cuestión y registran el movimiento local; los sensores acústicos pueden escuchar al componente. Los sensores acústicos se sujetan al componente mediante un pegamento flexible con baja insonorización, y se pueden aplicar en la monitorización de los rodamientos y la transmisión. Procesos como la aparición de grietas, deformación,

pérdidas de adherencia, exfoliación, impactos, aplastamiento y otros, producen cambios transitorios localizados en la energía elástica almacenada con un contenido espectral amplio. La monitorización de la emisión acústica de las palas del aerogenerador ofrece ventajas para comprender los complejos mecanismos de la formación de esos defectos así como para su evaluación. Existen técnicas de emisión acústica basadas en reconocimiento de patrones y en sensores continuos [34].

·Prueba no destructiva de ultrasonidos. Es un método para investigar la estructura interna de objetos sólidos. También es muy útil para analizar estructuras compuestas. El principio básico de esta técnica consiste en pasar los ultrasonidos por el material, para luego ser reflejados por un defecto. La prueba de ultrasonidos se puede llevar a cabo para revelar si existen daños en las palas del aerogenerador. La ventaja principal de esta prueba es que permite ver el material por debajo de la superficie. Actualmente se usa la técnica eco-pulsado para detectar las zonas de adherencia a través de varios centímetros de fibra de vidrio. Cada vez se utiliza más la técnica de phased array, que puede entenderse como una matriz de transductores compuesta por varios elementos individuales. Con ello se amplía la cobertura y velocidad de inspección, y además permite inspeccionar enfocando las sondas a distintas profundidades en busca de fallas.

·Prueba de percusión (tap test). Consiste en golpear ligeramente una superficie para comprobar si el ruido o las vibraciones indican algo anómalo. Se puede utilizar para verificar algunos de los resultados obtenidos mediante ultrasonidos y también es un buen método para descubrir irregularidades en la estructura. El método se basa en el hecho de que el sonido emitido cuando se golpea la estructura cambia cuando la densidad o el tipo de materia cambian o existe porosidad. También lo podría causar una separación entre la capa laminada y el mineral principal. Hay tres tipos de equipamiento para realizar la prueba de percusión: el martillo manual de percusión, el analizador de adherencia portable y el sistema de prueba de percusión asistido por ordenador. Los métodos automáticos de percusión tienen la ventaja de que pueden producir una impresión del área dañada, la cual constituye un registro permanente del daño encontrado. Los métodos de percusión funcionan bien en láminas delgadas, estructuras de paneles y paneles superpuestos, aunque no es efectivo en partes más gruesas.

A partir de los datos obtenidos por los sistemas de control y adquisición de datos, incluyendo los equipos específicos de monitorización del funcionamiento de algunos componentes, se pueden construir modelos globales del aerogenerador que permiten predecir algunas variables de estado en función de otras, de manera que se pueda comparar la predicción con la medición y, en su caso, elaborar un diagnóstico. También pueden realizarse estudios comparativos entre diferentes poblaciones de aerogeneradores con sus datos históricos mediante modelos estadísticos. Como se ha visto en la sección anterior, estas ideas son algunos de los fundamentos de los métodos de detección y diagnóstico automático de fallos, y por sí mismas justifican la

utilización de dichos métodos para extender la aplicación del mantenimiento predictivo en los parques eólicos, y con ello reducir los costes y aumentar la disponibilidad de las máquinas.

Hasta la fecha existen pocos desarrollos, basados en dichos métodos de detección y diagnóstico automático de fallos, que se estén aplicando en el mantenimiento industrial de aerogeneradores y parques eólicos. Dentro de las técnicas de diagnóstico de fallos basadas en el modelo de la planta, se pueden citar algunos resultados de laboratorio, más cercanos al diagnóstico basado en señales, obtenidos para subsistemas específicos del aerogenerador [29]. Así, en el rotor se aplican funciones de transmitancia, formas de desviación operacional, comparación resonante, propagación de onda, análisis de reconocimiento de patrones mediante wavelet y análisis termoplástico para detectar daños en la estructura; y análisis de varianza para detectar fallos en sensores. Para el tren de potencia se utiliza análisis en el dominio de la frecuencia y vibración torsional. Dentro de los mecanismos de orientación de las palas y de la góndola se usa análisis mediante la transformada rápida de Fourier.

Existen algunos intentos de implementar técnicas de inteligencia artificial en sistemas de detección y diagnóstico de aerogeneradores. Así, en [35] se utilizan redes neuronales para aprendizaje y lógica borrosa para combinar información de diferentes medidas. También en [36] se utilizan redes neuronales, esta vez como predictor para detectar daños en el tren de potencia. Por otra parte en [37] hacen uso de las redundancias funcionales del aerogenerador mediante un razonador basado en modelos y un diseño funcional para aumentar la disponibilidad del sistema.

4.-Conclusiones

En este artículo se pone de manifiesto que las técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos presentadas, constituyen un procedimiento en sí mismas para extender e incluso generalizar el mantenimiento predictivo en los parques eólicos. Esto satisface la necesidad de reducir los costes de mantenimiento de los aerogeneradores y de aumentar la disponibilidad de las máquinas; ya que los costes más altos durante la explotación de los parques eólicos corresponden con mucho al mantenimiento de los aerogeneradores, y dicho coste ha experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos años. Además se espera para los próximos años un incremento mayor de potencia eólica instalada a nivel mundial. Hoy en día en la mayoría de los aerogeneradores se aplica mantenimiento correctivo y preventivo. Sin embargo es poco habitual que los parques eólicos tengan implantado mantenimiento predictivo, basado en la monitorización y diagnóstico continuo de todos los componentes. De la descripción aquí presentada de dichos métodos de mantenimiento, se deduce su potencial de mejora al incorporar las técnicas de

detección y diagnóstico automático de fallos ya citadas. Aunque es cierto que existen algunos resultados puntuales de dicha incorporación, todavía es necesaria más investigación para garantizar que la utilización de estos métodos reduce los tiempos de detección de la avería y de análisis y reparación.

5-Referencias bibliográficas

- 1.- Archer, C.L., Jacobson, M.Z. (2005): "Evaluation of global wind power". Stanford University.
- 2.- Key World Energy Statistics (2004). International Energy Agency.
- 3.- World Wind Energy Association. www.winda.org.
- 4.- IDAE (2006): "Energía Eólica. Manuales de Energías Renovables". Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Madrid. España.
- 5.- Romero, J.J., Olmos, V., González, S. (2003): "Análisis económico de un parque eólico". *Energía* 29 (174), 48-54.
- 6.- Blázquez, L.F., de Miguel, L.J. (2003): "Diagnóstico de fallos basado en el modelo de la planta para sistemas no lineales". Secretariado de Publicaciones y Medios Audiovisuales, University of León, Spain.
- 7.- Chen, J., Patton, R.J. (1999): "Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems". Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- 8.- Gertler, J.J. (1998): "Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems". Marcel Dekker, New York.
- 9.- Chiang, L.H., Russell, E.L., Braatz, R.D. (2001): "Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems". Springer, London.
- 10.- Ding, S.X. (2008): "Model-based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms and Tools". Springer, Berlin, Germany.
- 11.- Korbicz, J., Koscielny, J.M., Kowalczyk, Z., Cholewa, W. (2004): "Fault diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications". Springer, Berlin, Germany.
- 12.- Gertler, J.J. (2000): "All linear methods are equal – and extendible to nonlinearities". In: Preprints of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Budapest, Hungary, Vol.1, 52-63.
- 13.- Mangoubi, R.S. (1998): "Robust Estimation and Failure Detection. A Concise Treatment". Springer, London.
- 14.- Isermann, R. (2006): "Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerant". Springer, Berlin, Germany.
- 15.- Patan, K. (2008): "Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes". Springer, Berlin, Germany.
- 16.- Witczak, M. (2007): "Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-Linear Systems. From Analytical to Soft Computing Approaches". Springer, Berlin, Germany.
- 17.- de Miguel, L.J., Blázquez, L.F. (2005): "Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a DC motor". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 18 (4), 423-450.
- 18.- Blázquez, L.F., Aller, F., de Miguel, L.J., Perán, J.R. (2006): "Fault detection by neuro-fuzzy identification in a nonlinear system". In: Preprints of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Beijing, P.R. China, 259-264.
- 19.- Gentil, S., Montmain, J., Combastel, C. (2004): "Combining FDI and AI approaches within causal-model-based diagnosis". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 34 (5), 2207-2221.
- 20.- Basseville, M., Nikiforov, I. (1993): "Detection of Abrupt Changes: Theory and Application". Prentice-Hall, New York.
- 21.- Gustafsson, F. (2000): "Adaptive Filtering and Change Detection". John Wiley & Sons, Chichester, England.
- 22.- Kinnaert, M. (2003): "Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems. A tutorial". In: Preprints of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Washington, D. C., USA, 37-50.
- 23.- Blázquez, L.F., de Miguel, L.J. (2005): "Additive fault detection in nonlinear dynamic systems with saturation". *ISA Transactions* 44 (4), 515-538.
- 24.- Chang, C.T., Chen, J.W. (1995): "Implementation issues concerning the EKF based fault diagnosis techniques". *Chemical Engineering Science* 50 (18), 2861-2882.
- 25.- Hammouri, H., Kinnaert, M., El Yaagoubi, E.H. (1999): "Observer-Based Approach to Fault Detection and Isolation for Nonlinear Systems". *IEEE Transactions on Automatic Control* 44 (10), 1879-1884.
- 26.- Davies, A. (1998): "Handbook of condition monitoring". Chapman & Hall, London.
- 27.- Hameed, Z., Ahn, S.H., Cho, Y.M. (2010): "Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation". *Renewable Energy* 35, 879-894.
- 28.- Rodríguez, J.L., Arnalte, S., Burgos, J.C. (2003): "Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica". Ed. Rueda. Madrid. España.
- 29.- Hameed, Z., Hong, Y.S., Cho, Y.M., Ahn, S.H., Song, C.K. (2009): "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1-39.
- 30.- Liu, W., Tang, B., Jiang, Y. (2010): "Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China". *Renewable Energy* 35, 1414-1418.
- 31.- Amirat, Y., Benbouzid, M.H.E., Al-Ahmar, E., Bensaker, B., Turri, S. (2009): "A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2629-2636. (2002): "Advanced condition monitoring systems for wind energy converter". In: Proceedings of EWEC'02