

# Detección de fallas en baleros en generadores de baja potencia mediante señales vibroacústicas

**RESUMEN:** En el presente trabajo se realiza la detección de condiciones de rodamientos dañados en aerogeneradores de baja potencia mediante el análisis de señales vibroacústicas. Para ello, se hace uso de un túnel de viento para operar al aerogenerador a diferentes velocidades, junto con un algoritmo propuesto, una tarjeta de adquisición de datos y sensores de velocidad de rotación y vibroacústicos. En uno de los rodamientos se realizó una perforación en la pista exterior de 1.5 mm para la emulación de la falla. Mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT), se analiza la evolución de las componentes armónicas respecto a la velocidad de rotación del sistema, la cual permitió una caracterización de las vibraciones mecánicas en el aerogenerador para diagnosticar la presencia de fallas en rodamientos.

**PALABRAS CLAVE:** Aerogeneradores, Análisis de vibraciones, Calidad de la energía, Fuentes alternas, Túnel de viento.

**ABSTRACT:** In this work, the detection of damaged bearing conditions in low power wind turbines is performed by vibroacoustic analysis. To do this, a wind tunnel is used to operate the wind turbine at different speeds, together with a program carried out in MATLAB, a data acquisition card and rotational speed and vibroacoustic sensors. In said bearing a 1.5 mm outer race was drilled. Through the use of the fast Fourier transform (FFT), the evolution of the harmonic components regarding the speed of rotation of the system is analyzed, which allowed a characterization of the mechanical vibrations in the wind turbine to diagnose the presence of bearing failures

**KEYWORDS:** Wind turbines, Vibration analysis, Fault diagnosis, Alternate sources, Wind tunnel.



## Colaboración

David Granados Lieberman; José Roberto Razo Hernández; José Guadalupe Barrera Valdés; Fernando Jurado Pérez, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

## INTRODUCCIÓN

Actualmente se ha dado un crecimiento en el interés de generar energía por medio de recursos naturales renovables, con el objetivo de reducir el impacto ambiental, dado que la producción de energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas tiene un gran impacto negativo al mismo [1]. Entre las consideradas energías renovables se encuentran la energía solar, eólica, geotérmica, hidráulica, entre otras. De todas ellas, la energía eólica ha tenido un gran impacto en el estudio y desarrollo de tecnologías a nivel mundial. La energía eólica es aquella que utiliza la fuerza del viento para la generación de electricidad, cuyo principal medio de obtención son los aerogeneradores, cuyo desarrollo más reciente ha crecido de la mano de modernos desarrollos en los campos de la electrónica, materiales, diseño mecánico y eléctrico, entre otros.

El desarrollo de los aerogeneradores ha tenido una gran evolución a lo largo de la historia. En este sentido la primer turbina eólica o aerogenerador fue diseñado a principios del siglo XX por el Danés Poul La Cour. El viento es la forma indirecta de la energía solar y el sol siempre la repone. El viento es causado por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre por el sol. Se ha estimado que aproximadamente 10 millones de MW de energía están continuamente disponibles en el viento de la tierra [2]. Las turbinas eólicas se utilizan para aprovechar el potencial de la energía eólica. La confiabilidad de la turbina eólica es crítica para extraer esta cantidad máxima de energía del viento [3]. Para el 2012, ya se desarrollaron métodos no invasivos y de bajo costo para el pre-diagnóstico de fallas en a máquina eléctrica de grandes aerogeneradores [4], ya que Los aerogeneradores modernos generan una parte importante de la energía eléctrica mundial, predominando su uso en Alemania, USA y España. Debido a la importancia que es el contar con un aerogenerador en el mejor estado posible, se han diseña-

do diferentes metodologías para el diagnóstico y detección de fallas en aerogeneradores. De acuerdo con [5], entre las más utilizadas para esta tarea, se tiene el monitoreo de vibraciones, de torque, de temperatura y de corriente/potencia, siendo la última la más utilizada. Dentro de las fallas eléctricas más comunes reportadas en la literatura se encuentra la de cortocircuito en el rotor y en el estator [6] y la de variación de campo magnético [4-5]. Por otro lado, las fallas mecánicas representan un problema de consideración mayor, ya que, si bien no se presentan con la misma reiteración que las fallas eléctricas, estas, causan un impacto notable desde el aspecto de seguridad al existir el riesgo de desprenderse algunas de sus partes móviles poniendo en riesgo áreas cercanas, asimismo pérdidas generadas por falta de dicha energía en procesos que depende directamente de ésta. Las fallas mecánicas más comunes reportadas son las desgaste o rotura de los dientes de la caja de cambios [7-8], desbalance o asimetría de aspas, fracturas o fisuras de aspas y fallas en los rodamientos [5] desbalance o excentricidad de la flecha del generador [9].

El objetivo de este proyecto es crear un sistema de diagnóstico de fallas en rodamientos para aerogeneradores, para ello se desarrolla un sistema de monitoreo que permite la medición y registro de las variables involucradas en la operación de un aerogenerador de pequeña potencia, así como el control de un túnel de viento necesario para la realización de diversas pruebas. A partir de la información de un micrófono de contacto y un encoder se determinan las componentes armónicas de las vibraciones acústicas producidas en función de la velocidad del equipo.

## MÉTODOLOGIA

La metodología propuesta se muestra en la Figura 1 y se describe a continuación:

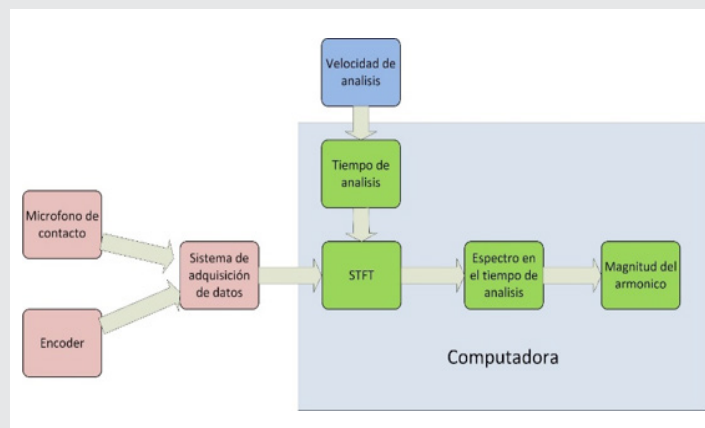


Figura 1. Diagrama de la metodología

Primeramente, la falla de balero dañado es emulada mediante la realización de una perforación en la cara externa, la cual tiene un diámetro de 1 mm. Para la rea-

lización de las pruebas se utiliza un túnel de viento a velocidad constante de 4 m/s en condiciones de aerogenerador en buen estado (sano) como cuando el balero tiene falla. En las pruebas realizadas se adquieren la información del micrófono y encoder mediante un sistema a de adquisición de datos, lo cual tiene una comunicación USB a la computadora o PC; posteriormente se aplica la transformada corta de Fourier (STFT, de sus siglas en ingles *Short Time Fourier Transform*). Así mismo, se realiza un análisis de las pruebas a diferentes velocidades de operación, ubicando el tiempo en el cual el aerogenerador alcanzo la velocidad seleccionada y analizando el contenido armónico en dicho momento. Por último, se determina la magnitud de la componente armónica que indica la falla ( $F_{fpi}$ ) en rodamientos mediante la siguiente ecuación:

$$F_{fpi} = \frac{Nb}{2} * n \frac{\{1 + Db * \cos(\beta)\}}{Dc} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $Nb$  es el número de bolas o rodillos,  $Db$  es el diámetro de bola o rodillo,  $Dc$  es el diámetro entre pistas,  $\beta$  es el ángulo de contacto y  $n$  es la velocidad del aerogenerador

La puesta del experimento se muestra en la Figura 2,

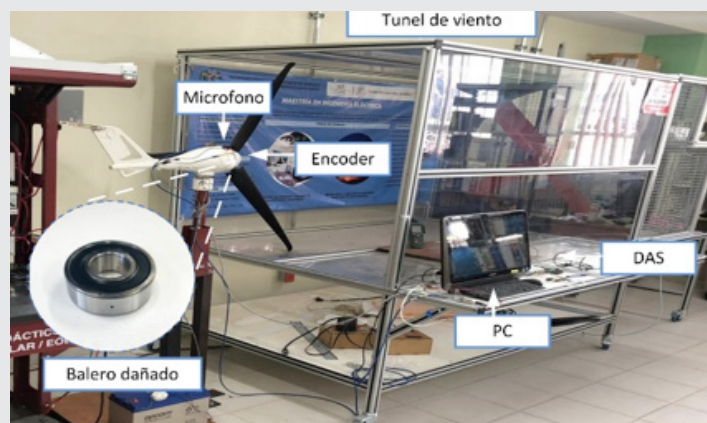


Figura 2. Puesta del experimento

Así mismo, los materiales utilizados para la conformación de la puesta del experimento se enlista a continuación:

- Aerogenerador Sunforce E400W: Generador eólico de 12Vcd, que puede suministrar 400 W. Es el objeto de estudio principal de este trabajo, el cual se estudiará en condición sana, y con fallas inducidas, para su análisis y comparación.
- DAS NI-USB 6211 National Instrument: Modulo de adquisición de datos (DAS) con velocidades de muestro hasta 250KS/s y comunicación USB.
- Convertidor de Frecuencia CFW-08 WEG y motor 3 HP, 220 V: Equipos para controlar el giro de la turbina del túnel de viento.
- Micrófono de Contacto CM01-B TE connectivity: El micrófono está basado en una película piezoeléct-

trica combinada con un preamplificador electrónico para proporcionar un sonido único o captación de vibraciones con salida amortiguada.

- Software MATLAB 2014: Entorno de programación y desarrollo de aplicaciones orientado al cálculo matemático, integrando funciones de análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica.
- Enconder magnético: Para la medición de velocidad del aerogenerador, los sensores son colocados junto con 40 imanes de neodimio, lo cual da como resultado una resolución de 20 pulsos por revolución.

**RESULTADOS**

En la Figura 3a) se observa la señal analógica obtenida por el micrófono de contacto y posteriormente en la Figura 3b) se muestra la velocidad instantánea de rotación de las aspas.

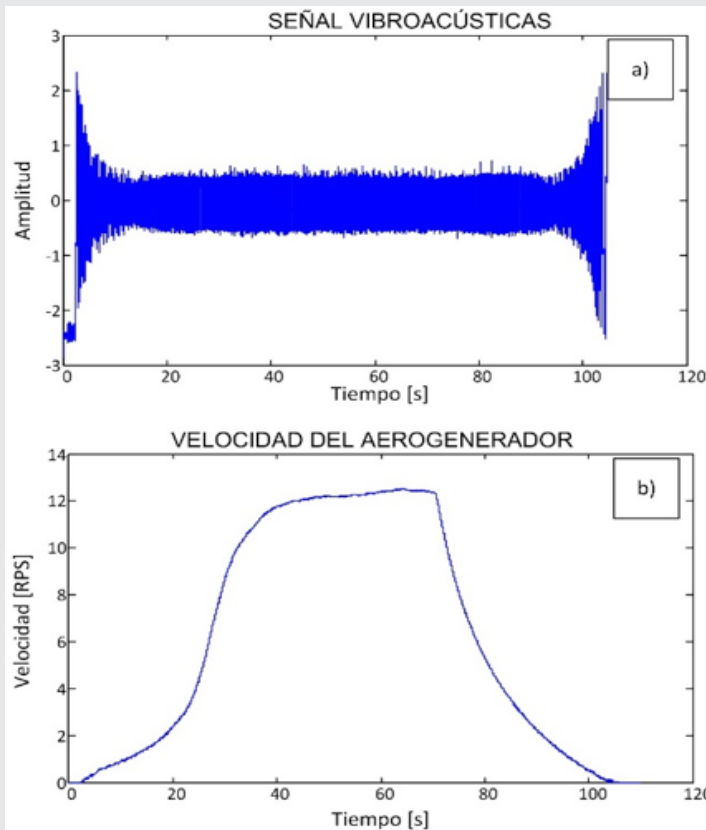


Figura 3. Señales medidas: a) vibroacústicas, b) Velocidad en RPS

A partir de la información de estas señales se realiza un espectrograma implementado en Matlab, el cual se realiza utilizando la transformada corta de Fourier y proporciona un gráfico en 3D (magnitud-tiempo-frecuencia) que permite analizar la señal como se observa en la Figura 4. En el espectrograma se muestra la presencia de curvas similares al comportamiento de la velocidad de rotación del aerogenerador o velocidad instantánea lo cual nos dice que nuestra medición de velocidad es correcta ya que, al aumentar la velocidad de rotación aumenta la frecuencia sonora que emite la

falla. Así mismo, se evalúa la función de la ec (1) ante diferentes velocidades y se grafica en la línea punteada negra. Además se marca mediante un rectángulo la ventana de análisis a una velocidad específica de 3 rps.

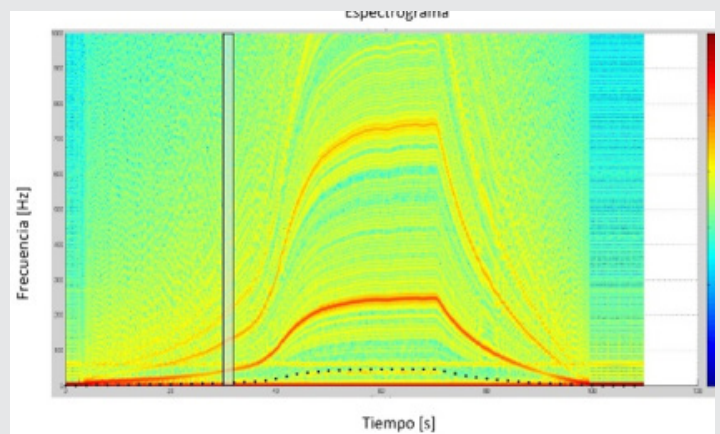


Figura 4. Espectrograma obtenido de la señal acústica.

En la Figura 5 se muestran los armónicos en dicha las ventanas de análisis, esto permite distinguir con claridad la presencia de las componentes armónicas y determinar la magnitud de la componente frecuencia característica de la falla, Ffpi.

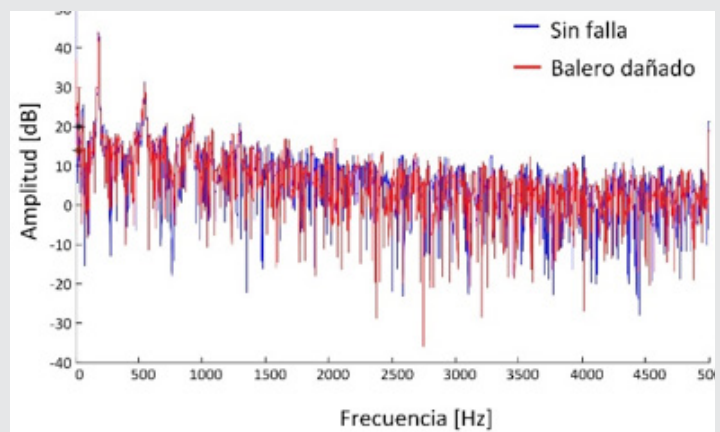


Figura 5. Transformada de Fourier a la velocidad de análisis.

Los resultados de las magnitudes armónicas a 3 diferentes velocidades (3, 6 y 9 rps) son mostrados en la Tabla 1, la cual indica la velocidad de rotación analizada, la frecuencia de la componente de falla, y las magnitudes de esta componente en condiciones del aerogenerador sin falla y con falla en el balero.

Tabla 1. Resultados de las pruebas ante diferentes velocidades.

Velocidad [fps]	Ffpi [Hz]	Magnitud en Sano [dB]	Magnitud con Falla [dB]
3	11.3725	16.6	23.78
6	22.7451	17.57	20.21
9	34.1176	17.22	30
12	45.4902	24.48	32.02

Finalmente, los valores de la Tabla 1 son gráficos en la figura 6.

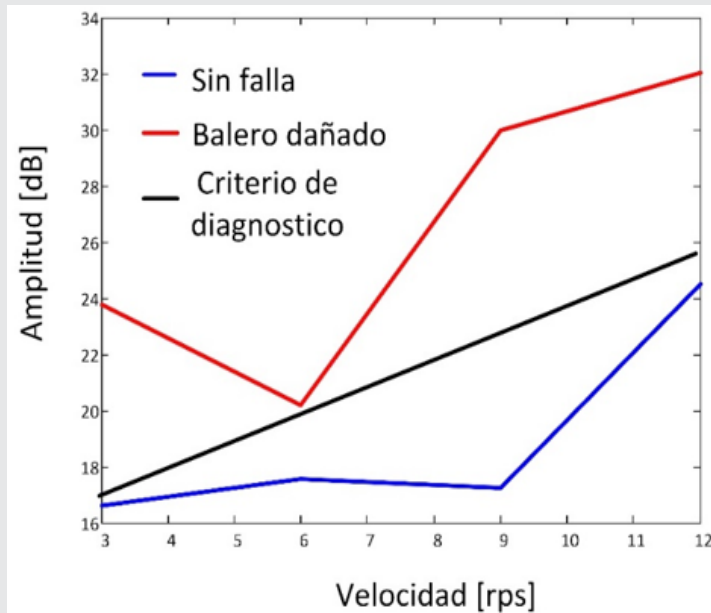


Figura 6. Magnitudes de la componente de falla a diferentes velocidades

En base a los resultados obtenidos se propone un umbral lineal dependiente de la velocidad como criterio de diagnóstico (línea negra), el cual indique que a partir de este umbral existe la presencia de una falla en rodamientos. Este criterio puede servir como protección y detener la operación del aerogenerador mediante frenado y así evitar una falla más severa.

## CONCLUSIONES

Los resultados del presente proyecto muestran la viabilidad de la metodología propuesta analizando las magnitudes de la componente de falla, la cual puede ser clasificada mediante una función lineal como criterio de diagnóstico y así implementar un sistema de alarmas o paros de emergencia que permita detener el equipo a tiempo antes de que ocurra una falla más severa. Se logró emular el funcionamiento de un aerogenerador con condiciones de operación normal y bajo condiciones de fallas en rodamientos, esto permitió analizar las componentes frecuenciales mediante la STFT, centrando el análisis en la frecuencia de falla en baleros a diferentes velocidades de operación del aerogenerador. Por otra parte, se tiene como prospectiva el mejoramiento de las señales adquiridas para poder detectar el nivel de severidad de la falla e implementación de algoritmos de clasificación inteligente como redes neuronales y lógica difusa.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.

[2] Herbert, G. J., Iniyan, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6), 1117-1145.

[3] 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. *Elsevier*.

[4] di Prátula, H. R., Guillermo, E., Rossi, A., Bocero, R. 2012. Turbinas Eólicas: Optimización en el Pre-Diagnóstico de Fallas en el Generador. *Información Tecnológica Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires*.

[5] Gong, X. 2012. Online Nonintrusive Condition Monitoring And Fault Detection For Wind Turbines. Ph. D Thesis University of Lebraska-Lincoln.

[6] Djurovic, S., Crabtree, C. J., Tavner, P. J., Smith, A. C. 2011. Condition monitoring of wind turbine induction generators with rotor electrical asymmetry. *IET Journals*.

[7] Hajnayeb, A., Ghasemloonia, A., Khadem, S.E., Moradi, M. H. 2011. Application and comparison of an ANN-based feature selection method and the genetic algorithm in gearbox fault diagnosis. *Elsevier*.

[8] Saravanan, N., Ramachandran, K.I. 2009. Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN). *Elsevier*.

[9] Hang, J., Zhang, J., Cheng, M. 2013. Fault diagnosis of wind turbine based on multi-sensors information fusion technology. *IET Journals*.