

RUIDO BARKHAUSEN EN ÁLABES DE TURBINA

Neyra Astudillo, Miriam^{1,a}, Ortega Paredes, Valeria I.^{1,b}, Nuñez, Nicolás^{1,c},
Ruzzante, José E.^{1,2,3,d}, López Pumarega, María I.^{1,e}, Marengo, José A.^{1,f}, Marengo
Rodríguez, Fernando A.^{4,g}

¹Centro Atómico Constituyentes – CNEA, Buenos Aires, Argentina.

²Universidad Nacional de San Martín, Buenos Aires, Argentina.

³Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta, Buenos Aires, Argentina.

⁴Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

^a neyra@cnea.gov.ar, ^b vortega@cnea.gov.ar, ^c nnunez@cnea.gov.ar, ^d ruzzante@cnea.gov.ar,

^e lopezpum@cnea.gov.ar, ^f marengo@cnea.gov.ar, ^g fmarengorodriguez@yahoo.com.ar.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del estudio comparativo sobre cuatro álabes de turbina de vapor, correspondientes a la etapa de baja presión de una central eléctrica de potencia, idénticos en material y forma. Dos de ellos, sin uso previo, fueron empleados como testigos y comparados con los otros dos ya usados, mediante el método de Ruido Magnético Barkhausen (RMB). El material con el cual están contruidos los álabes es AISI 420. Cada álabe, tanto en su cara cóncava como en su cara convexa, fue dividido en 38 secciones ubicadas en los bordes. Se hicieron diferentes mediciones de RMB en la superficie de los álabes teniendo en cuenta dichas secciones, para dos posiciones perpendiculares del yugo excitador. Se analizaron los resultados de esta técnica usando el cálculo de la función valor cuadrático medio (RMS) y el método matemático de filtrado por Descomposición Empírica de Modos (EMD) para extraer las componentes energéticas más relevantes. La señal resultante se adoptó como envolvente de un fador cuya fase es la de la excitación. Este método hace posible determinar para qué fase de la corriente de excitación se obtiene la máxima respuesta del RMB, y se utiliza para comparar las señales de los diferentes álabes en función del ángulo de excitación.

Palabras claves: Ensayo No Destructivo, Ruido Barkhausen, Materiales Ferromagnéticos.

1. Introducción

Los álabes están expuestos al fenómeno de erosión, esto se puede observar en los bordes de ataque, con rugosidades a simple vista, debidas a este fenómeno. Este proceso se debe al movimiento relativo entre el fluido corrosivo y la superficie del componente. Tal movimiento es rápido e involucra efectos de desgaste y abrasión: aparición de estrías, canales, ondas, valles que presentan un patrón direccional o agujeros redondeados⁽¹⁾. La determinación de su estado, tiene una importancia práctica significativa porque da una medida de la evaluación microestructural del mismo en un tiempo determinado, conociendo el estado en que se encuentra para soportar los regímenes de explotación⁽²⁾.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del estudio comparativo sobre cuatro álabes de turbina de vapor, correspondientes a la etapa de baja presión de una central eléctrica de potencia, idénticos en material y forma, dos retirados de servicio y los otros dos sin uso, considerados como “testigos”.

El Ruido Magnético Barkhausen (RMB) es una técnica de Ensayos No Destructivos (END). Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, el aumento de la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de los dominios magnéticos. Estos aumentos bruscos de inducción se conocen como RMB. La señal se detecta como un pulso de voltaje eléctrico al colocar una bobina sobre la superficie de la muestra. Las irregularidades presentes en la red cristalina actúan como barreras o puntos de anclaje al movimiento de las paredes de los dominios, y son atribuidos a diferentes características físicas como, borde de grano, vacancias, inclusiones y dislocaciones^(3,4,5). Para producir el RMB, es necesario aplicar en forma controlada un campo magnético variable, de manera que los saltos de inducción magnética se vuelvan detectables en el tiempo^(6,7).

El uso del método RMB está aumentando su aplicación en la industria por ser un método no invasivo. En la actualidad se está prestando atención especial a los métodos micromagnéticos, relacionando la microestructura, los defectos, las tensiones residuales, la carga, y la dureza, con los movimientos de las paredes de los dominios magnéticos⁽⁸⁾. Se ha demostrado que la amplitud de RMB aumenta con la reducción del tamaño de grano⁽⁹⁾, la fatiga y el tiempo de servicio⁽¹⁰⁾ y la deformación plástica. El parámetro más frecuentemente usado es el que está dado por el valor cuadrático medio (RMS) de la señal de RMB^(5,11).

En este trabajo se analizan los resultados del RMB, empleando el cálculo de la función valor cuadrático medio (RMS) de las señales y usando el método matemático de filtrado por Descomposición Empírica de Modos (EMD). Este método se aplica al análisis de señales no estacionarias y no lineales. Se basa en la extracción sucesiva de las oscilaciones presentes en la señal, desde el detalle más fino hasta el detalle más grueso. La aplicación de esta metodología a una señal dada, brinda un reducido conjunto de funciones de tipo amplitud modulada - frecuencia modulada (AM-FM) con media nula, llamadas Funciones de Modo Intrínseco (IMF).

En una señal con apreciable contenido de ruido de alta frecuencia como por ejemplo el RMS en un ciclo de la excitación, la IMF resume dicho ruido. Si se filtra esta función IMF, se obtiene una versión optimizada de RMS, ya que no se tienen los detalles finos que aportan información energética a nivel local y no global.

El filtrado de las primeras IMF aplicado al RMS, brinda una representación de la respuesta del sistema estudiado. Para vincularlo con su excitación (corriente aplicada sobre el yugo), se propone un método gráfico que incluye la amplitud y la fase de dicha excitación, además de la respuesta del sistema (RMS filtrado) expresada como amplitud. Entonces, se propone describir el sistema analizado como un fasor cuyo ángulo es el de la excitación y cuya amplitud está compuesto por la envolvente de la corriente de excitación y el RMS filtrado por EMD⁽¹²⁾.

Cabe aclarar que un fasor es un vector utilizado para representar una onda, de forma que el vector suma de varios fasores, puede ser utilizado para determinar la magnitud y fase de varias ondas después de procesos de interferencia. La longitud del fasor da la amplitud o envolvente y el ángulo entre él y el eje x , la fase angular.

Se muestran aquí los resultados preliminares de la aplicación del método de RBM y los abordajes para el análisis de las señales.

2. Desarrollo experimental

Se utilizaron 4 álabes para la realización de este estudio, dos “fuera de servicio” (usados) y dos “sin uso”. El material con el cual fueron construidos los álabes, es un acero comercial de bajo contenido de carbono AISI 420, y con una composición química detallada en la tabla 1 ⁽¹⁾. En la figura 1 se muestra una fotografía de todo el sistema de medición del RBM.

Tabla 1. Valores máximos para los aleantes de un acero AISI 420

Designación	C	Mn	P	S	Si	Cr
AISI 420	0.15 min.	1.00	0.04	0.03	1.00	12.00 -14.00

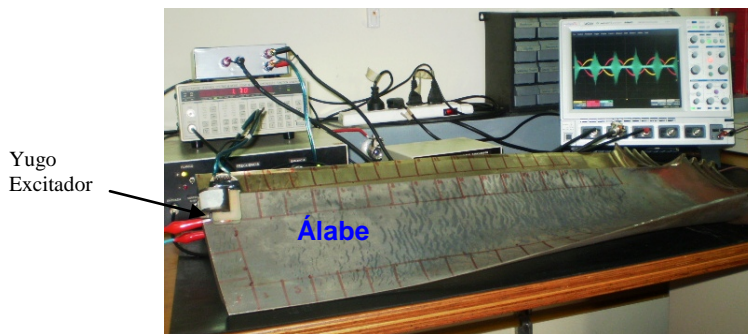


Figura 1. Fotografía de todo el sistema de medición. En el osciloscopio se registra la señal senoidal de excitación (corriente y tensión) sobre el yugo y el RBM del álabes.

Para la medición del RBM, cada álabes, tanto en su cara cóncava como en la cara convexa, fue dividido en 38 secciones ubicadas en los bordes; el área de cada sección medía 3 cm x 3 cm. En el esquema de la figura 2 se puede ver la distribución y nomenclatura de dichas secciones.

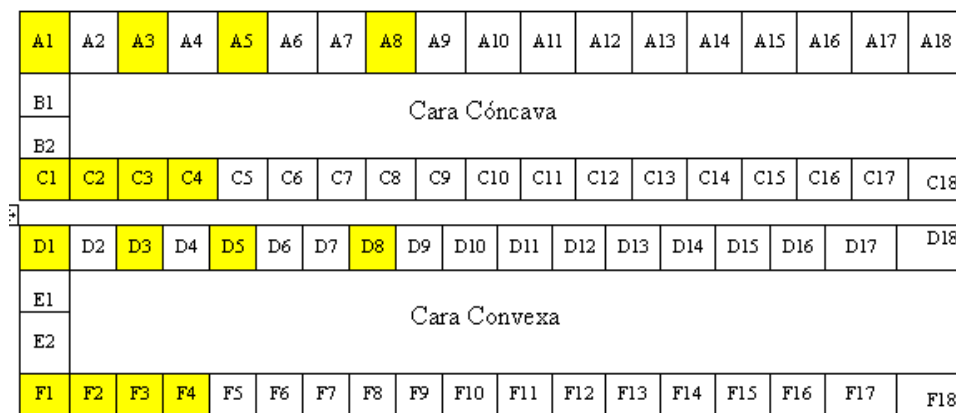


Figura 2. Esquema de las 38 secciones en que fue dividido el álabes en sus dos caras. En color amarillo se indican las mejores secciones elegidas para el análisis final.

2.1. Dispositivo de medición

El yugo magnético excitador se afirmaba sobre la superficie del álabe, manteniendo entre sus apoyos, la bobina sensora (ver Figura 3).⁽⁶⁾

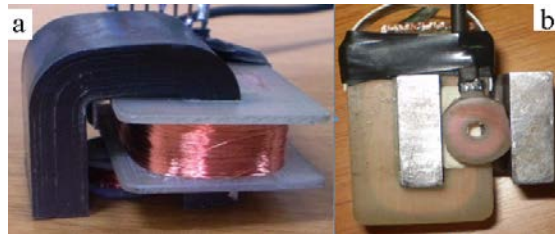


Figura 3. a) Imagen del yugo magnético excitador. b) Detalle de la bobina sensora entre los apoyos del yugo.

Se utilizó el generador de funciones Stanford Research Systems, para producir la señal de excitación sobre el yugo. Esta señal fue de tipo senoidal con una frecuencia de 5 Hz, y luego fue amplificada. Con esta señal se excitó la bobina que fue ubicada sobre cada sección del álabe, para dos posiciones del yugo, a 0° y a 90°. La posición 0° indica el yugo ubicado paralelo a la dirección de la mayor dimensión del álabe, y la posición 90°, perpendicular a la anterior. El RMB captado por la bobina colectora se midió en cada sección, para los dos ángulos, en las 38 secciones consideradas (ver figura 2).

Se trabajó con un osciloscopio digital de 4 canales LeCroy, con una frecuencia de digitalización de 1 Mega Sample/s. En el canal 1 se registró la tensión sobre el yugo (medida como la caída de potencial en una resistencia en serie de 1 Ω), en el canal 2 la corriente de excitación y en el canal 3 la señal de RMB.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de las señales mediante la función valor cuadrático medio

Se obtuvieron un total de 152 archivos de las señales digitalizadas en cada álabe. En una primera etapa se analizaron todas las señales obtenidas. En una segunda etapa, sólo se tuvieron en cuenta las secciones del álabe donde el yugo tenía mejor contacto (las zonas más planas) y además se detectaba mayor diferencia entre las amplitudes de las señales para el yugo a 0° y a 90°. Así, el análisis de las señales se realizó finalmente sobre un conjunto de 16 archivos correspondientes a las posiciones indicadas en la tabla 2 y marcadas en color amarillo en la figura 2.

Para estimar el error en el proceso de medición del RMB, se repitieron 10 medidas en la misma sección del álabe, y se calculó su desviación estándar, obteniéndose un valor de 3×10^{-4} V. Esto da una prueba de la confiabilidad y la validez en las mediciones realizadas.

Tabla 2. Secciones de cada uno de los álabes en los que se observa mayor diferencia entre las amplitudes de la señal del RMB.

Dirección del yugo	0°	90°
Cara cóncava	A1, A3, A5, A8, C1, C2, C3, C4	A1, A3, A5, A8, C1, C2, C3, C4
Cara convexa	D1, D3, D5, D8, F1, F2, F3, F4	D1, D3, D5, D8, F1, F2, F3, F4

En esta primera parte, se analizan directamente las señales del RMB y sus correspondientes funciones RMS. Las características de las mediciones se repetían al comparar cada par de álabes, uno “sin uso” con otro “fuera de servicio”. A modo de ejemplo, en la figura 4 se muestran las señales de RMB para diferentes secciones de distintos álabes y posiciones del yugo (0° y 90°). En la figura se puede observar claras diferencias en las señales, no sólo en su forma sino también en su amplitud, mostrando su desigual comportamiento magnético como ya ha sido citado en la literatura ⁽¹⁰⁾. Además se observa que para la posición del yugo a 0°, la intensidad del RMB es mayor que para 90°. Por tal motivo, se tomó en cuenta para todo el análisis de las señales, sólo la posición del yugo a 0°.

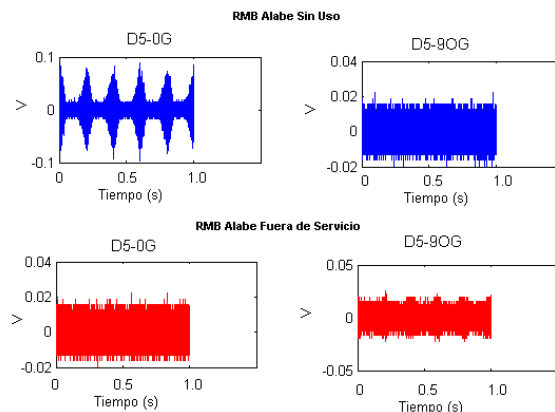


Figura 4. Señales de RMB en la sección D5 de cada álabe, para las posiciones del yugo a 0° y 90°.

Para visualizar mejor las diferencias entre las señales, se las procesó calculándose la función RMS. A modo de ejemplo, en las figuras 5 a 8, se muestra el RMB, para la misma sección, de los álabes “sin uso” (color azul) y “fuera de servicio” (color rojo), junto con la comparación entre ambos y sus respectivas funciones RMS. Analizando las figuras 5 y 6 (cara cóncava), se observa que para el caso del álabe “fuera de servicio”, la amplitud del RMB es el orden de 10 veces mayor que en el álabe “sin uso”, lo mismo se observa claramente en las curvas de la función RMS. En la última columna de ambas figuras debe tenerse en cuenta que las señales para el álabe “sin uso” (color azul) aparecen cubiertas por las de mayor amplitud (color rojo). En las figuras 7 y 8 (cara convexa), la amplitud del RMB para el álabe “fuera de servicio” es del orden de la mitad que en el álabe “sin uso”, lo mismo se observa en las curvas de la función RMS. Se ve también que la cara cóncava del álabe “fuera de servicio” produce mayor RMB que su cara convexa. Por el contrario, en la cara convexa del álabe “sin uso” (figuras 7 y 8) la señal del RMB es mayor.

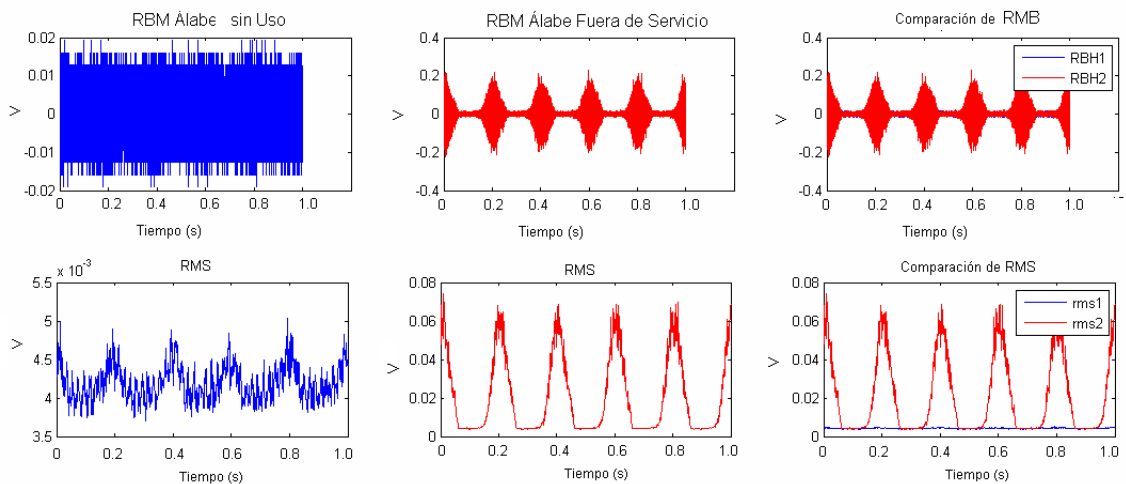


Figura 5. Señales de RBM y su función RMS para la sección A1 de la cara cóncava, con una posición del yugo a 0° , para los álabes “sin uso” (azul) y “fuera de servicio” (rojo).

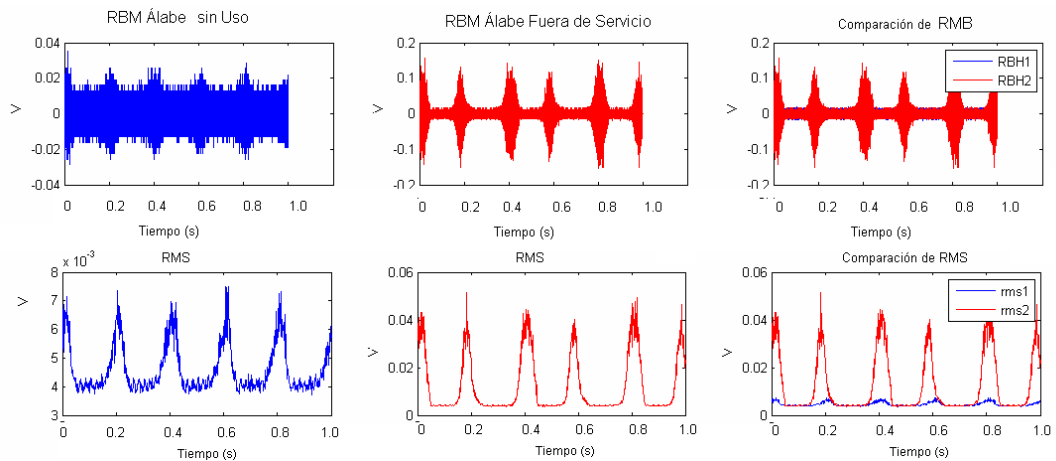


Figura 6. Señales de RBM y su función RMS para la sección A8 de la cara cóncava, con una posición del yugo a 0° , para los álabes “sin uso” (azul) y “fuera de servicio” (rojo).

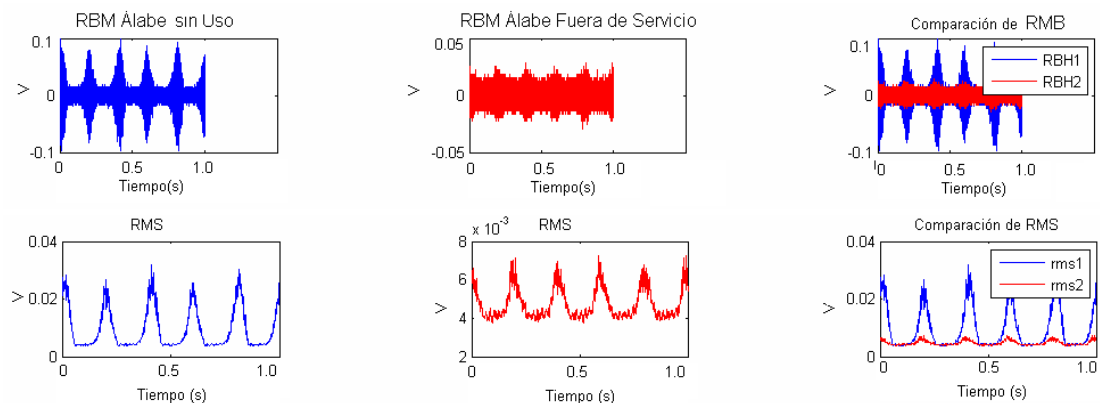


Figura 7. Señales de RBM y su función RMS para la sección D1 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0° , para los álabes “sin uso” (azul) y “fuera de servicio” (rojo).

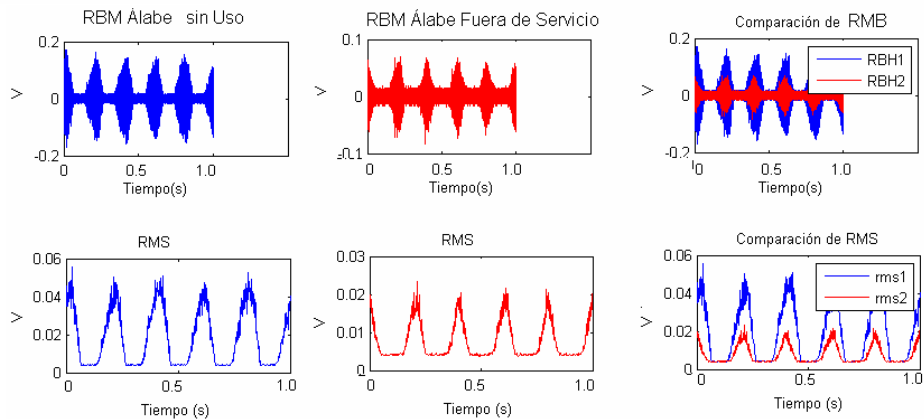


Figura 8. Señales de RMB y su función RMS para la sección D8 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0°, para los álabes “sin uso” (azul) y “fuera de servicio” (rojo).

Se sabe que cuanto más deformado está un material (mayores tensiones), presenta menor RMB debido a que aparecen mayor número de sitios de anclaje (dislocaciones, granos alargados), que dificultan el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos^(3,4,5). Por lo tanto, la cara cóncava del álabes “sin uso” presentaría mayores tensiones que podrían deberse al proceso de fabricación. En la cara convexa, se da la situación contraria, es decir, el álabes “fuera de servicio” tiene mayores tensiones que podrían deberse al ciclado al que fue sometido durante su tiempo de funcionamiento⁽⁹⁾. Por otro lado, observando visualmente el álabes “fuera de servicio”, se identificó en su cara convexa una zona claramente erosionada en el borde (todas las secciones indicadas con la letra F, ver figura 2). A modo de ejemplo, en la figura 9 se muestran las señales para la sección F3. Analizando esta figura, se observa que en el álabes “fuera de servicio”, las señales de RMB son tan bajas que se pueden confundir con el “ruido”. En esta zona erosionada hay mayores tensiones y deformación (aumento de dislocaciones) causando esfuerzos residuales dentro del material, que se oponen al movimiento de las paredes de los dominios magnéticos. En un trabajo publicado⁽⁹⁾ se señala que la presencia de dislocaciones, ocasiona que las señales de RMB sean cortas (baja duración) y de baja amplitud; esto último podría ser la razón del menor nivel de RMB en la zona erosionada.

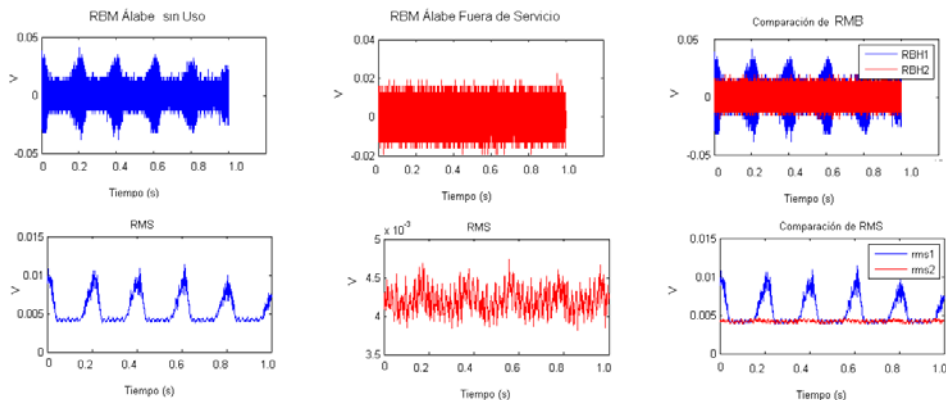


Figura 9. Señales de RMB y su función RMS para la sección F3 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0°, para los álabes “sin uso” (azul) y “fuera de servicio” (rojo).

3.2 Análisis por Filtrado Mediante el Método de Descomposición Empírica

En la segunda parte de este trabajo, se utilizó el Método de Descomposición Empírica de Modos (EMD) sobre las señales de RMS evaluadas en un ciclo de excitación (200 ms). En estas señales, se filtraron las IMF de primeros órdenes. Dichas IMF corresponden a las componentes del RMS de alta resolución temporal (alta frecuencia), y representan variaciones energéticas locales. Como no aportan información global acerca del sistema, se las filtra a pesar de poseer desvío estándar comparable a la señal de RMS original.

Por otro lado se determinó la señal que mejor se ajusta a la corriente senoidal de excitación del yugo, eliminando su ruido. Se obtuvo así un vector que tiene en cuenta la amplitud de la corriente y la fase inicial. Dada la naturaleza de la onda senoidal de excitación, se encontró el fasor asociado al sistema, es decir, se halló la representación compleja de la corriente de excitación. Dicha excitación se expresó mediante un fasor cuya amplitud y fase son las de la corriente de excitación. Para contemplar la respuesta, es decir la señal de RMB, se hace el producto entre el fasor de la excitación y el valor RMS del RMB.

Este fasor del sistema resume las variables de interés: la corriente de excitación, su fase temporal y la función RMS del RMB. Debido a la periodicidad de la excitación, basta con estudiar el fasor en el intervalo temporal de un período ($0 \leq t \leq T$). Esto representa una vuelta completa del fasor, es decir que su fase se incrementa en 2π radianes.

En la figura 11 se muestra la comparación del “fasor del sistema”, filtrado con EMD para el álabe “fuera de servicio” (color azul) y el “fasor del sistema” para el álabe “sin uso” (color rojo) de las secciones A1 y A8 de la cara cóncava, para una posición del yugo a 0^0 .

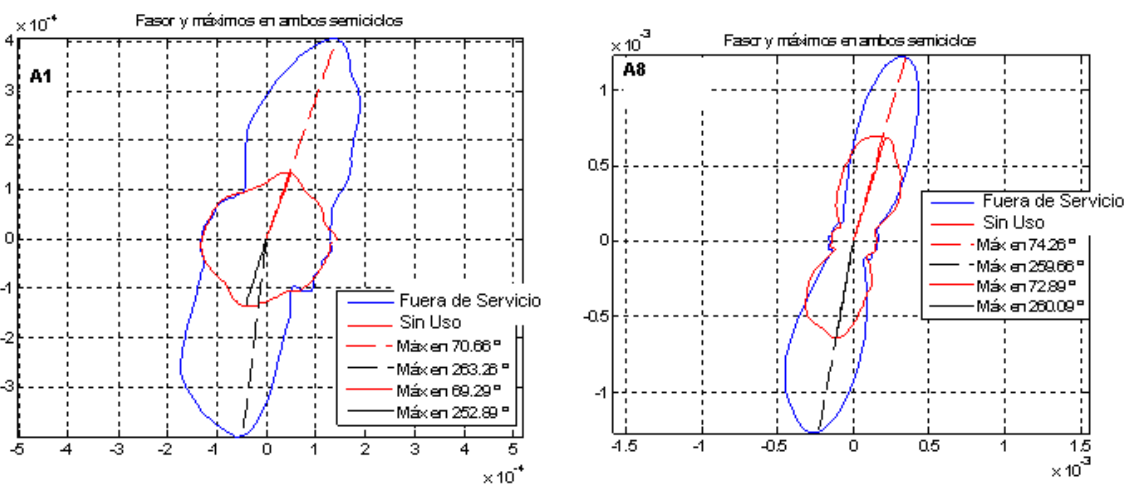


Figura 11. Comparación del fasor del RMS filtrado con EMD para el álabe “fuera de servicio” (color azul) y para el álabe “sin uso” (color rojo) para las secciones A1 y A8 de la cara cóncava, para una posición del yugo a 0^0 .

Se observa que las curvas para ambos álabes difieren en sus amplitudes para ciertas regiones, en la sección A8 ambos fasores comparten una región de mínima respuesta, quedando excluida otra región de máxima respuesta. Además los máximos se producen para ángulos muy similares. De esto se puede decir que en ambas secciones el deterioro del material no modifica el ángulo de máxima respuesta.

En la figura 12 se muestra la comparación del fador del RMS filtrado con EMD para el álabes “fuera de servicio” (color azul) y el fador del RMS para el álabes “sin uso” (color rojo), para las secciones D1 y D15 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0^0 .

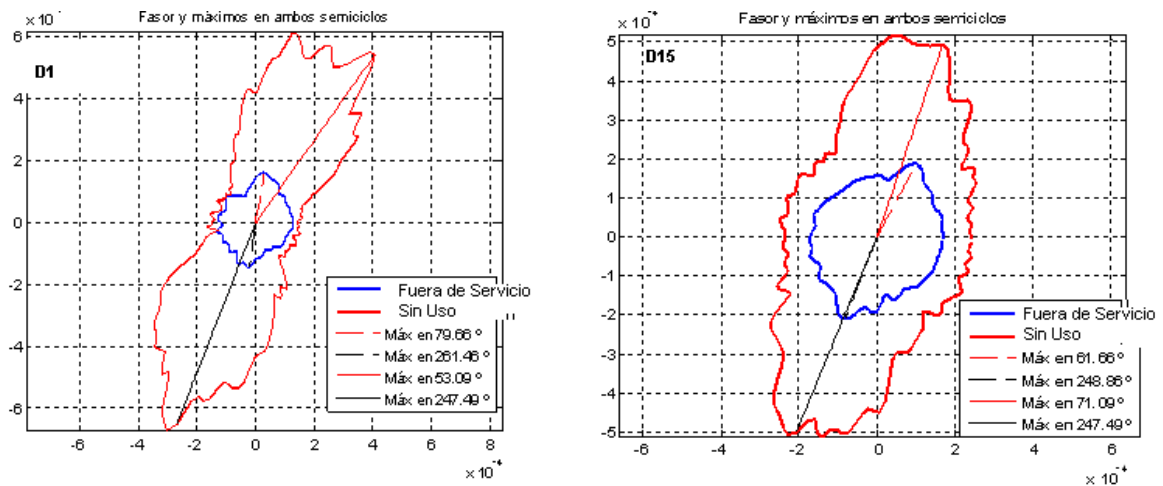


Figura 12. Comparación del fador del RMS filtrado con EMD para el álabes “fuera de servicio” (color azul) y para el álabes “sin uso” (color rojo) para las secciones D1 y D15 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0^0 .

Se observa que la curva para el álabes “sin uso” tiene mayor amplitud respecto al álabes “fuera de servicio”. En la sección D1 se observa coincidencias entre los dos fasores para ciertos ángulos. En la sección D15 se observa que el álabes “sin uso” y el álabes “fuera de servicio” no coinciden para ninguna fase. La respuesta del álabes “sin uso” es superior a la del álabes “fuera de servicio”. Además, la fase de máxima respuesta es muy similar para ambos álabes, lo cual permite suponer que el deterioro no modifica el ángulo de máxima respuesta.

En la figura 13 se muestra la comparación del fador del RMS filtrado con EMD para el álabes “fuera de servicio” (color azul) y el fador del RMS para el álabes “sin uso” (color rojo), para la sección F1 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0^0 .

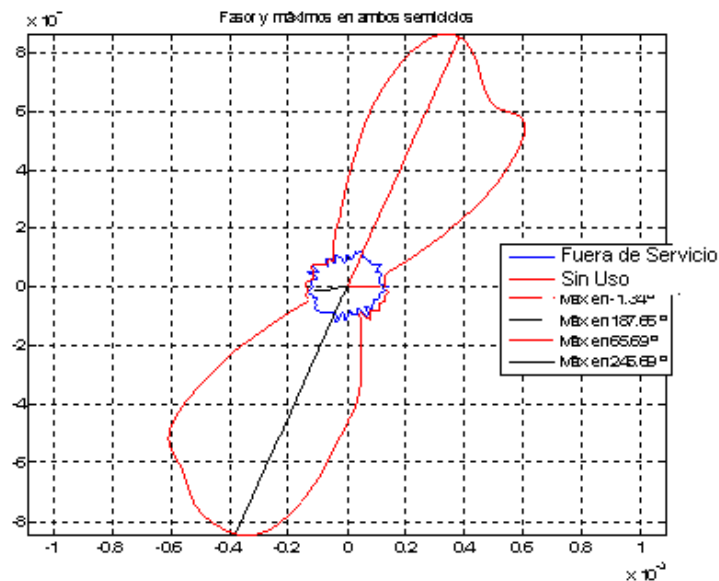


Figura 13. Comparación del fasor del RMS filtrado con EMD para el álabe “fuera de servicio” (color azul) y para el álabe “sin uso” (color rojo) para la sección F1 de la cara convexa, con una posición del yugo a 0^0 .

Se puede ver que el fasor del álabe “sin uso” tiene una mayor amplitud respecto al álabe “fuera de servicio”, eso quiere decir que hay una mayor diferencia de respuesta entre ambos, en regiones similares a las señaladas para los primeros casos. Para ciertos ángulos se cumple que la respuesta en ambos álabes es similar, es decir, que el deterioro se nota solamente para ciertos ángulos.

De lo anterior se deduce que las comparaciones respecto del estado de los álabes, obtenidos mediante los análisis realizados en las secciones 3.1 y 3.2 dan resultados coherentes.

4. Conclusiones

Se estudiaron y compararon mediante la técnica de RMB, 4 álabes de turbina, dos “fuera de servicio”, con otros dos “sin uso”. Se empleó el cálculo de la función RMS y el método de Descomposición Empírica de Modos. Los primeros resultados aquí mostrados, son alentadores.

Queda para la continuidad de este trabajo analizar en profundidad las causas de las diferencias en el RMB para el yugo a 0^0 y 90^0 . Se puede decir que con el yugo a 0^0 se afecta al álabe en la dirección de más fácil magnetización.

Se considera que deberían hacerse nuevos ensayos con un yugo de menor área de contacto, para mejorar y optimizar su apoyo sobre las superficies de los álabes.

A través del ensayo de más álabes se podrían determinar mejor las zonas de los mismos donde deberían hacerse las mediciones para poder caracterizarlos.

Actualmente se continúa profundizando el análisis de las señales completas digitalizadas.

5. Referencias

1. C. C. Spinosa, "Estudio no Destructivo de Fallas en Álabes de Turbina", Actas del 5to Congreso Regional de Ensayos no Destructivos y Estructurales (V CORENDE), ISBN: 987-1154-66-6, pp. 355–359, Neuquén, Argentina, 2-4 de Noviembre de 2005.
2. F. Rodríguez, E. Franco y J. Benitez "Modelo Teórico Para la Caracterización del Envejecimiento del Acero 12CR1MOV a Partir del Efecto Barkhausen". Tecnología Química Vol XXX No 1, 2010.
3. D. Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman and Hall, 1995.
4. R. López Sánchez, M. I. López Pumarega, M. Armeite, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, "Barkhausen Effect and Acoustic Emission in a Metallic Glass, Preliminary Results", "30th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (30th QNDE)", 27 de Julio-1 de Agosto, 2003, Green Bay, Wisconsin, EEUU, AIP Conference Proceedings, Vol. 23B, pp. 1328-1335, 2004.
5. P. Martinez, J Espina, J. Hallen, R. Linares y Miranda "Caracterización de Aceros API-5L por Medio de la Medición de Ruido Magnético Barkhausen." ISSN 1665-0654 Científica, Vol.14 Núm. 2, pp. 81-87, Abril-Junio 2010.
6. A. Ruiz, R. Piotrkowski, M. I. López Pumarega, J. Ruzzante, "Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica para la Caracterización de Materiales Ferromagnéticos", Materia, Vol. 13, pp.12-22, Abril, 2008.
7. A. Ruiz, J. Marengo, I. López Pumarega, R Piotrkowski, J. Ruzzante, "Construcción de un Equipo para Medición de Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica", "XXXI Reunión Anual, Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, AATN, Buenos Aires, Argentina, 23-25 de Noviembre, 2004.
8. "Barkhausen Noise and Magneto Acoustic Emission in Fe-Cu alloy", M. I. López Pumarega, D. N. Torres, N. Núñez, M. P. Gómez, M. Armeite, J. E. Ruzzante, "8th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM8", Kalpakkam, India, 11-12 de Febrero de 2010.
9. Freddy A, Franco G. y Padovese "Ruido Magnético de Barkhausen: Ensayo no Destructivo para la Evaluación de Grados de Dureza en Aceros". Scientia et Technica Año XIII, No 36. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, Septiembre 2007.
10. J. Blachnio "The Effect of Changing Loads Affecting The Martensite Steel on its Structure and the Barkhausen Noise Level". ScientiaDirect NDT&E Internacional Vol 41, pp. 273-279, 2008.
11. J.L. Rodríguez, J, A. Perez-Benitez, and J. Capo-Sanchez. "Nondestructive Inspection of Plastic Deformation in Commercial Carbon Steels Using Magnetic Barkhausen Noise". Revista Mexicana de Física S 54 (2), pp. 51-53, Noviembre 2008.

12. F. A. Marengo Rodriguez, F. Miyara. “Representación de Señales de Audio con Descomposición Empírica de Modos y Submuestreo Adaptativo” Primeras Jornadas Regionales de Acústica (AdAA2009) A056R, Rosario, Argentina, 19-20 de Noviembre de 2009.