

APLICACIÓN DEL ESPECTROGRAMA MODIFICADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MÚLTIPLES FALLOS COMBINADOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN ALIMENTADOS POR INVERSORES

*THE APPLICATION OF MODIFIED SPECTROGRAM FOR
IDENTIFYING MULTIPLE COMBINED FAULTS IN
INVERTER-FED INDUCTION MOTORS*

Arturo García Pérez

Universidad de Guanajuato, México
arturo@ugto.mx

David Camarena Martínez

Universidad de Guanajuato, México
david.camarena@ugto.mx

Martín Valtierra Rodríguez

Universidad Autónoma de Querétaro, México
martin.valtierra@enap-rg.org

David Granados Lieberman

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
david.rodriguez@enap-rg.org

Recepción: 31/octubre/2021

Aceptación: 24/febrero/2022

Resumen

Actualmente, las industrias utilizan motores de inducción alimentados con variadores de velocidad, los cuales generan componentes armónicos en la corriente del estator. Por lo tanto, es importante la detección y el diagnóstico temprano de fallas en el motor de inducción para su uso en el mantenimiento basado en condiciones. Sin embargo, la mayoría de los métodos se ocupan de un único fallo. La contribución de esta investigación es la aplicación de una estrategia de monitoreo de condición que puede realizar evaluaciones precisas y confiables de la presencia de condiciones de falla única o combinada en motores de inducción. El artículo presenta una descripción del estado del arte en el monitoreo de fallas y establece los métodos usados para la identificación de estas fallas, usando el método del

espectrograma reasignado. Se analizan tres tipos de fallas y en los resultados pueden verse la adecuada identificación de estas usando espectros de tiempo-frecuencia. Los resultados muestran que el método del espectrograma reasignado podría utilizarse como técnica de detección determinista; donde las frecuencias de los fallos son muy cercanas a las reportadas analíticamente en la literatura.

Palabras Clave: Análisis espectral, diagnóstico de fallas, espectrograma reasignado, monitoreo de la condición, motores de inducción.

Abstract

Currently, industries use induction motors fed with variable speed drives, which generate harmonic components in the stator current. Therefore, it is important early failure detection and diagnosis in induction motor for use in condition-based maintenance. However, most of the methods deal with a single fault, only. In electrical equipment with multiple faulty conditions present; it is critical to differentiate between the single or combined faulty conditions; so, it is important to differentiate between these. The contribution of this research is the application of a condition monitoring strategy that can make accurate and reliable assessments of the presence of single or combined fault conditions in induction motors. The article presents a description of the state of the art in fault monitoring and establishes the methods used for the identification of these faults, using the reassigned spectrogram method. Three types of faults are analyzed, and the results show the proper identification of these faults using time-frequency spectra. Results show the reassigned spectrogram method could be used as a deterministic detection technique; where the fault frequencies are very close to those analytically reported in literature.

Keywords: *Condition monitoring, fault diagnosis, induction motors, reassigned spectrogram, spectral analysis.*

1. Introducción

Los motores de inducción (MI) se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales debido a su confiabilidad en las operaciones, pero están sujetos a

diferentes tipos de fallas indeseables. Las fallas en los MI pueden clasificarse en fallas eléctricas (voltaje o corriente de alimentación desequilibrado, monofásico, bajo o sobre voltaje, falla a tierra, sobrecarga, falla de cortocircuito entre vueltas, etc.) y fallas mecánicas (barra de rotor rota, desbalance de masa, excentricidad del entrehierro, daño del cojinete, falla del devanado del rotor, condición de desalineación, etc.). Estas fallas se deben al propio MI o a las condiciones de funcionamiento; por lo tanto, en esta era de automatización industrial, se han producido avances importantes en la adquisición y análisis de señales basados en procesadores.

Durante las últimas décadas ha habido mucha actividad en la detección temprana y el diagnóstico de fallas en los MI para su uso en el mantenimiento basado en la condición (CBM), CBM por las siglas de su nombre en inglés “Condition-Based Maintenance”. En comparación con el mantenimiento preventivo, en el CBM, el personal de mantenimiento no necesita programar el mantenimiento o el reemplazo de la máquina basándose en registros previos de fallas de la máquina. Más bien, se confía en la información proporcionada por el sistema de monitoreo de condición, que evalúa la condición del MI. Esto permite un mejor uso de los componentes y equipos, lo que lleva a una reducción considerable del tiempo de inactividad y el costo de mantenimiento. Sobre la base de estos desarrollos, se está realizando el monitoreo del estado de las máquinas eléctricas y se han estudiado varios métodos para el diagnóstico de fallas en MI [Liu, 2018]; [Rajan, 2017], [Fernandez, 2018]. El diagnóstico de fallas del motor se puede realizar mediante el análisis de la firma de la corriente del motor (MCSA), MCSA por las siglas de su nombre en inglés “Motor Current Signal Analysis” pero la mayoría de ellos se ocupan de una sola falla, exclusivamente.

En las máquinas de inducción reales, a veces, dos o tres fallas pueden evolucionar al mismo tiempo. En equipos eléctricos con múltiples condiciones de falla presentes; Es fundamental y necesario diferenciar entre las condiciones de falla únicas o fallas combinadas. Cuando ocurren diferentes fallas, la corriente del estator se ve perturbada por varias frecuencias relacionadas con fallas combinadas entre sí, de forma lineal o no lineal. Dado que pueden ocurrir numerosas situaciones de falla en

el MI, se puede identificar una falla errónea en el diagnóstico porque es difícil analizar dos o más fallas simultáneamente. Por lo tanto, la capacidad de detectar múltiples fallas es un requisito importante y exigente debido a la naturaleza estrechamente concurrente de la mayoría de las fallas. Por lo tanto, el diagnóstico de fallas múltiples sigue siendo un problema abierto en la investigación de monitoreo y mantenimiento del MI [Vilhekar, 2017]; [Smart, 2015]; [Panigrahy, 2019]. Las características individuales de los espectros de corriente del estator que están relacionadas con la mayoría de las condiciones de falla son bien reconocidas, y la existencia de estas condiciones de falla degradantes establece cuándo un MI es necesario aislar de su operación. El diagnóstico seguro de condiciones de falla podría resultar aún más complicado con la existencia de fallas múltiples y combinadas.

Asimismo, las componentes armónicas agregados están presentes invariablemente en la corriente del estator cuando el MI es alimentado por un inversor como sucede con los MI que se utilizan en equipos industriales. Las aplicaciones industriales se caracterizan por condiciones de operación dinámicas o no estacionarias, donde la mayoría de las metodologías estudiadas son inadecuadas para identificar fallas combinadas en el MI. Se han estudiado y propuesto numerosas metodologías distintas para el monitoreo y diagnóstico de fallas del MI en la literatura, donde la mayoría de ellas se enfocan en la detección de fallas únicas tales como: barras rotas del rotor [Madescu, 2020]; [Karvelis, 2019], [Rangel, 2019], desbalance mecánico [Bengherbia, 2020]; [Carbajal, 2017] y condición de desalineación [Carbajal, 2017], [Sudhakar, 2020]; [Gangsar, 2019]. Otras técnicas están asociadas al uso de la transformada de Fourier de corto tiempo (STFT) para el diagnóstico de asimetrías de bobinado en motores de inducción de rotor [Antonino, 2018]. [Pantea, 2018] muestra un modelo del MI de seis fases basado en el llamado enfoque orientado a circuitos, y aplicado para la simulación de fallas eléctricas en el estator y el rotor. [Kia, 2018] presenta un algoritmo basado en la combinación de zoom-MUSIC y zoom-FFT para la detección de fallas en los dientes de los engranajes del MI. [Gritli, 2017] investiga una metodología para la detección de fallas de rotor en motores de inducción de rotor bobinado, y se basa en el análisis de la firma del vector espacial

dato por el producto de vectores del voltaje del rotor y el espacio de la corriente del estator del rotor. [Trachi, 2018] muestra dos técnicas sub-espaciales (clasificación de señales múltiples (MUSIC) y estimación de parámetros de señales mediante invariancia rotacional) para identificar fallas en los rodamientos y barras rotas del rotor en un MI. Muy pocos trabajos tratan del monitoreo e identificación de fallos combinados únicos y múltiples en un MI; como [Amezquita, 2016] presenta un método basado en dimensión fractal para el diagnóstico de fallas combinadas simples y múltiples (desbalance, rotura de rotor y fallas de cojinetes) en MI para el diagnóstico de fallas combinadas múltiples. [García, 2014] muestra un algoritmo de diagnóstico para detectar fallas combinadas únicas y múltiples (desbalance, rotura de rotor y fallas de rodamientos) mediante análisis espectral de alta resolución en estado estacionario, donde se analizan la corriente del estator y las señales de vibración. [Romero, 2016] presenta un algoritmo de diagnóstico para detectar dos fallas simples y combinadas (barras rotas del rotor y excentricidad mixta) utilizando una combinación de metodologías: Descomposición en modo empírico de conjunto completo y Clasificación de señales múltiples en regímenes de arranque y de estado estacionario. [Antonino, 2009] aplica la técnica de Transformada de Onda Discreta a la corriente de arranque del estator para detectar fallas combinadas (asimetrías de rotor, excentricidades mixtas y cortocircuitos entre vueltas). Por lo que todavía se requiere examinar otros métodos que podrían identificar fallas combinadas, ya sea en el estado estacionario, el transitorio de arranque o en ambos estados en el mismo análisis considerando las condiciones de operación aplicadas al motor de inducción por una fuente de variador.

Por lo tanto, este artículo presenta una metodología donde se utiliza la fusión de la frecuencia instantánea corregida en el tiempo y el espectrograma, donde se implementa un método de umbral mejorado para que cualquier componente de frecuencia con valores menores que la tasa de ruido de señal se establezca en cero, y el ruido se reduce en el último espectro. La metodología sugerida se utiliza para analizar la corriente del estator del MI alimentado por inversor en el transitorio de arranque y continuando con el estado estacionario a media carga. Los resultados experimentales muestran la eficacia de esta metodología para determinar la

evolución de la falla en el plano tiempo-frecuencia; donde las frecuencias de falla detectadas son muy cercanas a las reportadas analíticamente en la literatura para una barra de rotor rota (BRB), fallas de desbalance mecánico (UNB) y desalineación de carga del motor (MAL), y también su combinación, lo cual es un gran avance relacionado con otros métodos de frecuencia de tiempo.

2. Métodos

Componentes de frecuencia relacionados con los fallos

En el trabajo se consideran tres diferentes fallas en el MI: fallas BRB, UNB y MAL, y también su combinación.

Desbalance mecánico (UNB)

La condición de desbalance se presenta cuando la carga mecánica en el motor de inducción no se distribuye uniformemente, sacando el centro de masa del eje del motor. El desbalance en las máquinas de inducción crea excentricidades en el espacio de aire, que cambian el espectro de frecuencia de la corriente de alimentación [Kia, 2018], y la ubicación de estas bandas laterales de frecuencias se puede predecir mediante la siguiente ecuación 1.

$$f_{UNB} = |k \cdot f_c \pm m \cdot f_r| \quad (1)$$

Donde f_c es la frecuencia fundamental de la alimentación de voltaje, f_r es la frecuencia de rotación y k y m son números enteros. Para $k = 1$, las bandas laterales de frecuencia en ecuación 1, se reducen a $f_c \pm m \cdot f_r$. Durante la operación en estado transitorio del MI, la velocidad del rotor cambia, por lo que las frecuencias relacionadas a la falla también se expandirán con el tiempo.

Desalineación de carga del motor (MAL)

La desalineación en el MI se produce cuando el motor y las poleas de carga no están alineadas. La condición de desalineación, así como el desbalance mecánico, crea excentricidades en el espacio de aire que cambian el espectro de frecuencia de la corriente de alimentación. La excentricidad del entrehierro afecta las

inductancias del motor que dan como resultado en armónicos en f_{MAL} en las bandas laterales de frecuencia de rotación de la frecuencia de alimentación predicha [Sudhakar, 2020], como en la ecuación 2. Donde s es el deslizamiento del motor por unidad y p es el número de pares de polos del motor.

$$f_{MAL} = f_c \left[1 \pm \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (2)$$

Barra de rotor rota (BRB)

La identificación de BRB en un MI se logra mediante la observación de las frecuencias de falla (f_{BRB}) [Gangsar, 2019], ecuación 3.

$$f_{BRB} = f_c (1 \pm 2s) \quad (3)$$

Donde las definiciones para s y p son similares que en la ecuación 2. La velocidad a través del deslizamiento del motor viene dada por la ecuación 4. Siendo n_1 la velocidad síncrona y n la velocidad del rotor en RMP. A la espera del régimen transitorio, la velocidad del rotor se ajusta, por lo que estas frecuencias de falla se extenderán con el tiempo.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4)$$

Antecedentes teóricos

Esta sección presenta los antecedentes matemáticos de la metodología propuesta para el análisis de la corriente del estator durante los estados de arranque transitorio y de estado estacionario.

Frecuencia instantánea con corrección de tiempo (reassignada)

Una adaptación del espectrograma; que ha sido llamado reasignado, o por el enunciado frecuencia instantánea corregida en el tiempo, [Fulop, 2013] se presenta a continuación. El procedimiento de reasignación da como resultado una modificación del espectrograma que finalmente lo agudiza, intensificando los componentes espectrales alrededor de líneas de mayor energía en el plano frecuencia-tiempo.

La transformada de Fourier de corta duración (STFT) se determina en la ecuación 5 para cualquier función de ventana $h(t)$.

$$\text{STFT}_h(\omega, T) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + T)h(-t)e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

Donde T es el tiempo. La frecuencia instantánea canalizada (CIF) y el retardo de grupo local (LGD) se definen en las ecuaciones 6 y 7.

$$\text{CIF}(\omega, T) = \frac{\partial}{\partial T} \text{arg}(\text{STFT}_h(\omega, T)) \quad (6)$$

$$\text{LGD}(\omega, T) = -\frac{\partial}{\partial \omega} \text{arg}(\text{STFT}_h(\omega, T)) \quad (7)$$

Como las ecuaciones 6 y 7 son derivadas de la fase compleja de una función (la matriz STFT), es aceptable utilizar las diferencias finitas de las fases en la matriz. Entonces, la CIF se puede expresar como en la ecuación 8.

$$\text{CIF}(\omega, T) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\varepsilon} \left[\phi\left(T + \frac{\varepsilon}{2}, \omega\right) - \phi\left(T - \frac{\varepsilon}{2}, \omega\right) \right] \quad (8)$$

La ecuación 8 establece que la CIF se puede expresar usando una expresión de diferencia, y esto implica los valores de la fase compleja en tiempos compensados por ε ; el símbolo ϕ representa el argumento (fase) de la STFT. En este estudio; la aproximación en diferencias finitas a las derivadas de fase STFT se implementa para obtener el auto espectro cruzado, ecuaciones 9 y 10. Donde C codifica el CIF, mientras que L codifica el LGD. La reasignación de la matriz del espectrograma se expresa luego como un mapeo de cada valor de magnitud desde su ubicación original en el plano frecuencia-tiempo en un nuevo lugar en el plano de frecuencia-tiempo.

$$C(\omega, T, \varepsilon) \stackrel{\text{def}}{=} \text{STFT}\left(\omega, T + \frac{\varepsilon}{2}\right) \text{STFT}^*\left(\omega, T - \frac{\varepsilon}{2}\right) \quad (9)$$

$$L(\omega, T, \varepsilon) \stackrel{\text{def}}{=} \text{STFT}\left(\omega + \frac{\varepsilon}{2}, T\right) \text{STFT}^*\left(\omega - \frac{\varepsilon}{2}, T\right) \quad (10)$$

Algoritmo que usa las aproximaciones en diferencias finitas

Existen numerosas metodologías para calcular espectrogramas reasignados. No obstante, el método de Nelson es sencillo de calcular [Nelson, 2012]. El algoritmo

de Nelson para la reasignación se implementa en los dos primeros pasos (a-b) como se explica a continuación:

- a) Primero, configure dos matrices S y S_{del} son datos de la ventana de magnitud w muestras de tiempo, con S_{del} retrasado por una muestra cerca de la matriz S . En esta investigación se utiliza una ventana de Hamming de 50 coeficientes. La señal en ventana se superpone con un número determinado de puntos de entrada en todas las matrices.
- b) A continuación, calcule dos matrices STFT.
- c) Ahora los requisitos computacionales de que este análisis y el método de Nelson divergen: La matriz CIF se obtiene primero al encontrar la matriz espectral cruzada de Nelson, ecuación 11.

$$C = STFT \times (FFT(S_{del}))^* \quad (11)$$

donde X^* representa el conjugado complejo; y el producto es punto por punto. C es una matriz; donde los ángulos de fase de cada fila son iguales al CIF en el canal indexado por esa fila. Entonces la CIF se puede lograr como en la ecuación 12. Donde F_s es la frecuencia de muestreo de la señal en Hz.

$$CIF = \frac{F_s}{2\pi} \times \arg(C) \quad (12)$$

- d) A continuación, calcule la matriz LGD calculando la matriz espectral cruzada de Nelson, ecuación 13.

$$L = STFT \times STFTdl \quad (13)$$

Donde $STFTdl$ es la transformada de Fourier de corta duración en un intervalo de frecuencia, y L es una matriz compleja; donde las columnas son iguales a la LGD en todas las frecuencias durante el índice de tiempo. Entonces el LGD se puede obtener como en la ecuación 14.

$$LGD = \frac{-fftn}{2\pi F_s} \times \arg(L) \quad (14)$$

Donde $fftn$ es la duración de la transformada de Fourier. Por lo tanto, con estas ecuaciones, se puede dibujar el espectrograma reasignado.

Configuración Experimental

La configuración experimental consiste en utilizar el arranque (5 segundos) seguido de una señal de corriente en estado estable (5 segundos) proporcionada por un variador de velocidad (VSD) modelo WEG CFW08 conectado al motor de inducción. El VSD tiene un intervalo de funcionamiento de 0 Hz a 100 Hz con una resolución de frecuencia de 0.01 Hz. La figura 1 muestra el montaje experimental, donde se utiliza un trifásico de 750 vatios (modelo WEG 00136APE48T).



Figura 1 Configuración experimental: una vista general.

El funcionamiento de la frecuencia del MI está controlado por un VSD a 3 Hz, 30 Hz y 60 Hz. Los motores examinados tienen dos pares de polos ($p = 2$), veintiocho barras y reciben una fuente de alimentación de 220 Volts de AC. La carga mecánica aplicada proviene de un alternador típico, que representa la mitad (50%) de la carga del MI. Las señales de corriente de fase se recopilan utilizando sensores de efecto Hall modelo L08P050D15 (bloque de sensor inteligente en la figura 1). En el sistema de adquisición de datos (DAS) se utiliza un convertidor analógico-digital de muestreo de salida en serie de 16 bits y 4 canales ADS8341 de Texas Instruments con una frecuencia de muestreo $f_s = 4 \text{ kHz}$; que obtiene 120,000 muestras de cada fase actual durante 30 segundos de la operación del MI. El arranque del motor se automatiza mediante un relé para controlar la marcha de prueba.

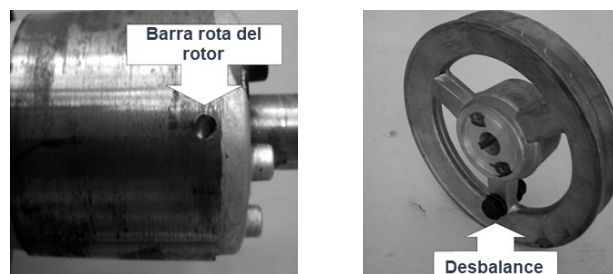
3. Resultados

El método sugerido ha sido probado en varios casos en los que una sola falla (una barra de rotor rota, desbalance mecánico y desalineación de la carga del

motor) está presente en el MI, y también sus combinaciones. Para confirmar la efectividad del método, se estudia para todas las combinaciones posibles de las tres fallas, y se realiza software de procesamiento digital de señales de Matlab. En las etapas de preprocesamiento y filtrado, la señal de corriente del estator se diezma de 4 kHz a 200 Hz, 133 Hz y 26 Hz cuando el VSD se alimenta a 60, 30 y 3 Hz respectivamente. Esto restringe las investigaciones en las siguientes regiones de frecuencia: (0-100 Hz), (0-66 Hz) y (0-13 Hz) para la inspección de la evolución de la frecuencia de falla en los estados de arranque y estable. En los casos del MI alimentado por inversor, la señal de corriente del estator tiene una duración de 30 segundos (5 segundos dura el transitorio de arranque total y 25 segundos para el estado estacionario).

Condición de falla única: una barra de rotor rota (BRB)

La condición de BRB se realiza artificialmente perforando un orificio de 7,938 mm de diámetro, figura 2a. El MI funciona a 3355 RPM en un sistema de 60 Hz. Las dos frecuencias de falla, relacionadas con la falla de BRB, se obtienen reemplazando primero los valores de datos de velocidad real del motor en ecuación 4, para encontrar el valor de deslizamiento.



a) Falla de barra rota del rotor

b) Falla de desbalance mecánico

Figura 2 Falla de barra rota del rotor y falla de desbalance mecánico.

El valor de deslizamiento se coloca en ecuación 3, y se obtienen las frecuencias de banda lateral relacionadas con el BRB: 55,9 Hz y 64,1 Hz. De la misma forma se obtienen las frecuencias de falla cuando el VSD se alimenta a 30 Hz y 3 Hz, ver tabla 1. Los valores marcados en color gris corresponden a la frecuencia de la falla de BRB en la tabla 1.

Tabla 1 Frecuencias de falla (BRB).

VSD Frecuencia (Hz)	Velocidad del MI (RPM)	Frecuencias de Falla de BRB (Hz)
3	57	2.05, 3.95
30	1641	27.35, 32.65
60	3355	55.9, 64.1

Condición de falla única: Desbalance mecánico (UNB)

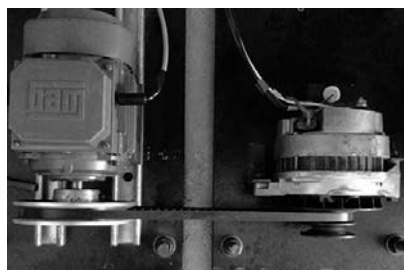
La condición de desbalance mecánico se produjo artificialmente mediante un perno en la polea del rotor como se muestra en la figura 2b; donde las frecuencias de falla se reducen a $fc \pm k \cdot fr$. La tabla 2 muestra las frecuencias de falla para los casos del MI alimentados por el inversor estudiado en este trabajo y sus respectivas frecuencias de falla.

Tabla 2 Frecuencias de falla (UNB).

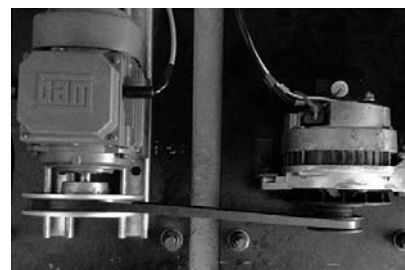
Frecuencia del VSD (Hz)	fr (Hz) y k	Frecuencias de falla (UNB) (Hz)
3	1.4, 2	0.2, 5.8
	1.4, 4	8.6
		16, 44
30	14, 1	
60	28.5, 1	31.5, 88.5

Condición de falla única: desalineación (MAL)

El estudio de desalineación se logró desplazando hacia adelante la banda en la polea del alternador, y luego los ejes transversales de rotación del motor y su carga no estaban alineados. La figura 3a muestra el motor alineado y la figura 3b muestra el motor desalineado.



a) Motor alineado



b) Motor desalineado

Figura 3 Motor alineado y motor desalineado.

La tabla 3 muestra las frecuencias de fallas por desalineación de acuerdo con la ecuación 2, para las tres condiciones de fallas del MI alimentadas por el inversor.

Tabla 3 Frecuencias de falla (MAL).

Frecuencia del VSD (Hz)	Frecuencias de falla (MAL) (Hz)
3	1.5, 4.5
30	18.75, 41.25
60	82.5, 37.5

4. Discusión

Ahora analizaremos y discutiremos los resultados obtenidos con la combinación de múltiples fallas: BRB, UNB y MAL.

Las condiciones de múltiples fallas combinadas se obtienen combinando cada falla individual con las fallas consideradas restantes. Para fines de comparación del método propuesto; El caso sano y el más difícil (combinación de falla BRB, MAL y UNB con el MI alimentado por el inversor a 3 Hz) se examinaron con el espectrograma tradicional, el método MUSIC (clasificación de señales múltiples) y el espectrograma reasignado propuesto con métodos de umbral mejorados. Primero, la condición saludable con el MI alimentado por inversor a 3 Hz se muestra en la figura 4a; donde las condiciones de falla no se muestran en el espectro.

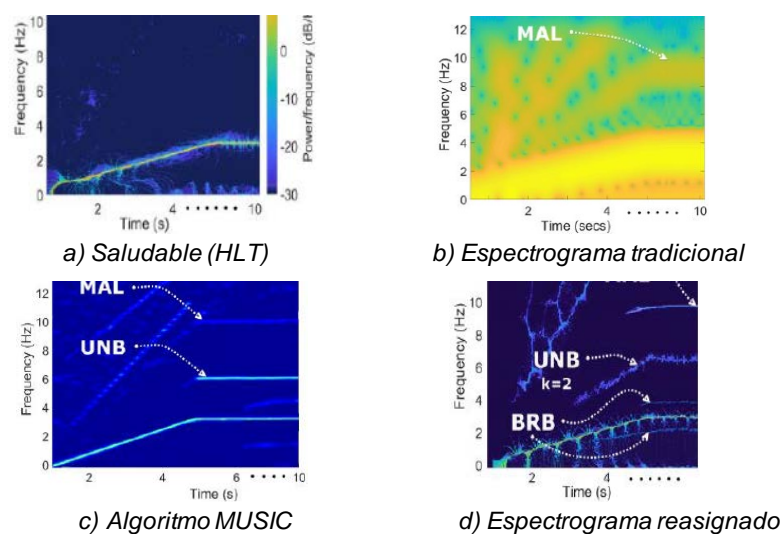


Figura 4 Condición de salud.

La figura 4b muestra el espectro con el espectrograma tradicional; donde solo es visible la falla de desalineación, pero con una mala resolución que no permite distinguir claramente la frecuencia de la falla. La figura 4c presenta el espectro con el método MUSIC; donde las fallas de desalineación y desequilibrio son visibles en la condición de estado estable, pero falta la falla de la barra del rotor rota. Sin embargo, se observa que el espectrograma reasignado, figura 4d, es capaz de distinguir las tres fallas combinadas (BRB, MAL y UNB) en regímenes de arranque y de estado estacionario, y además genera una gráfica más nítida en comparación con la tradicional. Espectrograma, figura 4b.

Ahora se aplica el espectrograma reasignado propuesto con un método de umbralización mejorado a la corriente del estator de un MI con un VSD alimentado a 3, 30 y 60 Hz, con el fin de estudiar la identificación de la falla única y de las tres combinadas (BRB, MAL y UNB) en regímenes de puesta en marcha y de estado estacionario. La figura 5 muestra espectros para un MI con VSD alimentado a 3 Hz. La figura 5a muestra la condición saludable donde las condiciones de falla no se muestran en el espectro.

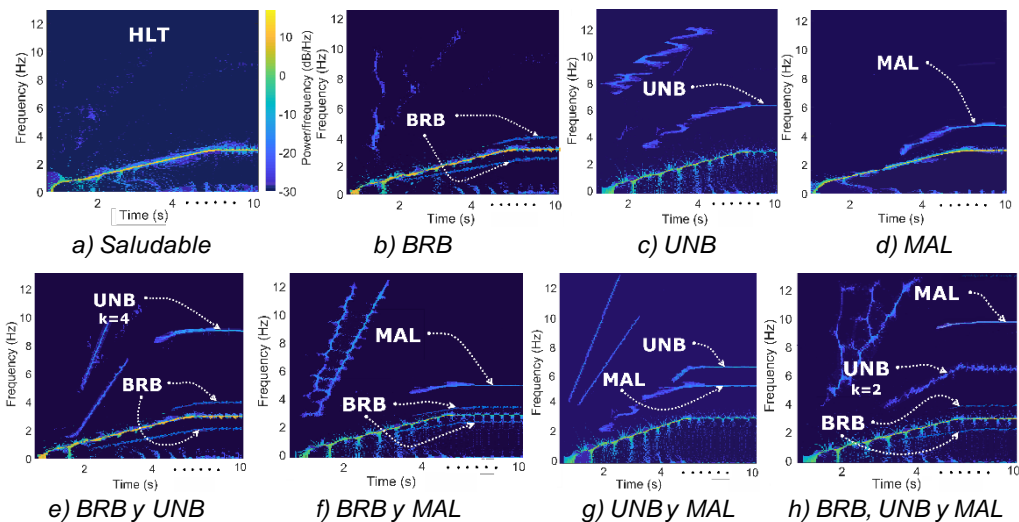


Figura 5 Espectros de la evolución del fallo en condiciones simples y combinadas en un MI con alimentación de línea a 3 Hz.

La figura 5b presenta el espectro para la condición BRB donde la evolución de la falla para los armónicos de banda lateral superior e inferior (USH y LSH) se ven

completamente en el régimen de estado estacionario; sin embargo, ambas fallas de frecuencia (USH y LSH) se ven parcialmente en el régimen de puesta en marcha. La figura 5c muestra el espectro para la condición de desequilibrio con la frecuencia de falla alrededor de 6 Hz, que casi coincide con la frecuencia teórica a 5.8 Hz, con $k = 2$ en la ecuación 1. La figura 5d muestra el espectro para la evolución de fallas por desalineación, y es claramente observable durante el régimen de estado estacionario y parcialmente en la condición de arranque, como en el caso de la condición de desequilibrio. La figura 6e muestra la combinación de desequilibrio y fallas de la barra del rotor rota donde el desequilibrio de fallas es visible alrededor de 9 Hz, que corresponden a $k = 4$ en la ecuación 1, y el USH y LSH se ven completamente en el régimen de estado estacionario, y esos se ven parcialmente en el régimen de puesta en marcha. Las figuras 5f a 5h representan los espectros para el resto de los casos combinados, donde se observa que se produce un pequeño cambio de frecuencia para las fallas UNB y MAL; por lo que la presencia de fallas combinadas tiene influencia en la frecuencia final de fallas para estas fallas. La figura 6 muestra los espectros para un MI con un VSD alimentado a 30 Hz; donde un comportamiento similar al del MI con un VSD alimentado a 3 Hz; con la diferencia de que se pudieron detectar las frecuencias de falla superior e inferior para las fallas UNB y MAL, y también se produjo un pequeño cambio en las frecuencias de falla. La figura 7 muestra los espectros para un MI con un VSD alimentado a 60 Hz; donde un comportamiento similar al del MI con un VSD alimentado a 30 Hz, y nuevamente, ocurre un pequeño cambio en las frecuencias de falla debido a la presencia de fallas combinadas.

5. Conclusiones

En este trabajo, una metodología de detección basada en el uso combinado de dos técnicas: la frecuencia instantánea corregida en el tiempo y el espectrograma, también conocido como espectrograma reasignado, para identificar la evolución temporal de las frecuencias defectuosas en los regímenes de arranque y de estado estacionario de la señal con una gran cantidad de ruido en el ruido intrínseco al sistema, como es el caso del MI alimentada por inversor. En este caso, el inversor

induce armónicos que afectan la detección de los componentes espectrales relacionados con la falla.

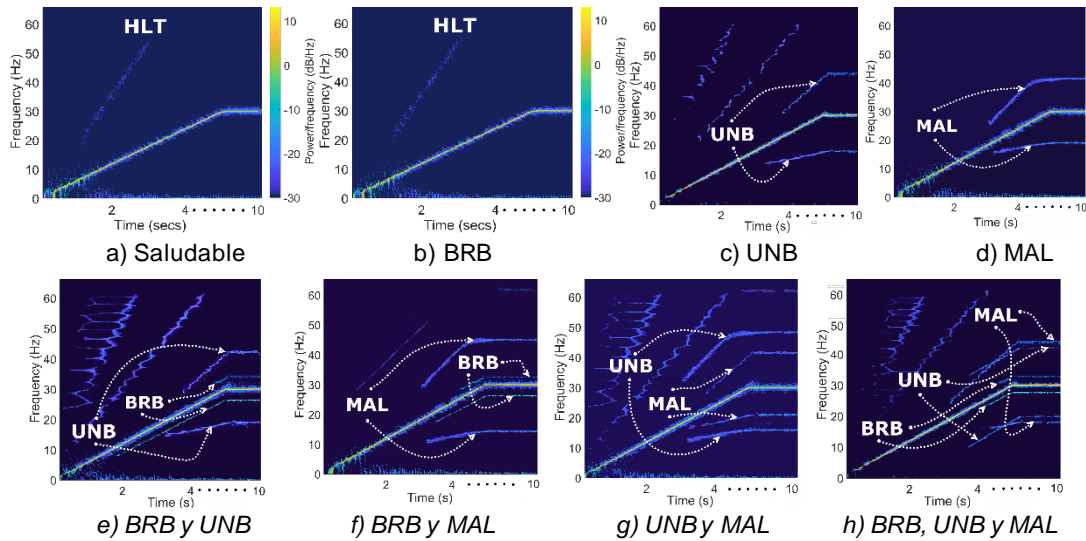


Figura 6 Espectros de la evolución del fallo en condiciones simples y combinadas en un MI con alimentación de línea a 30 Hz.

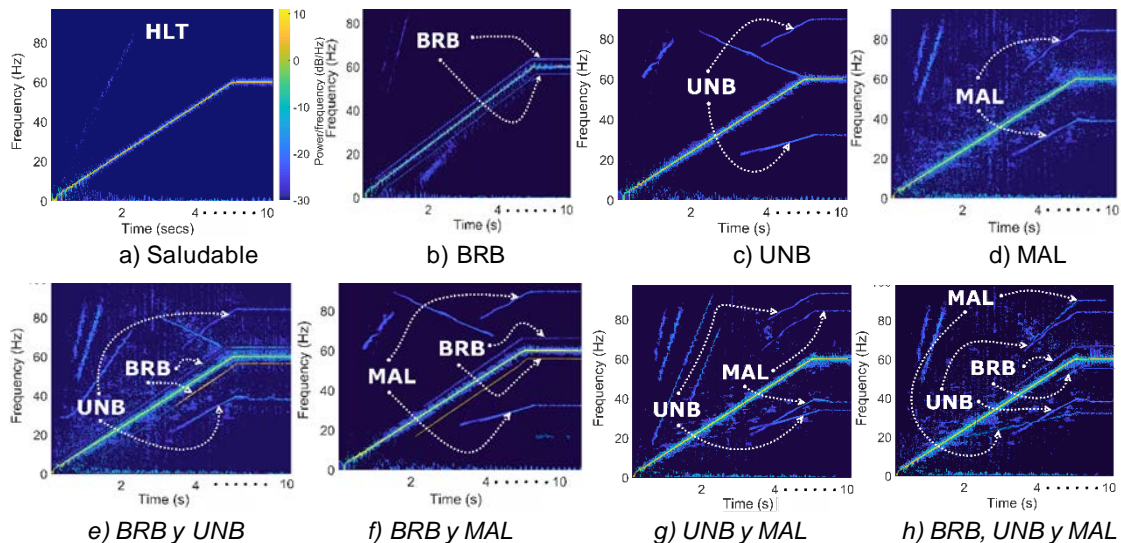


Figura 7 Espectros de evolución del fallo de condiciones simples y combinadas en un MI con alimentación de línea a 60 Hz.

La efectividad de la propuesta se demuestra a través de la comparación con los métodos tradicionales de espectrograma y MUSIC; donde el espectrograma reasignado y el uso de un umbral mejorado induce a que cualquier elemento con valores menores que la tasa de ruido de la señal se establezca en cero, y el ruido

se reduce en el espectrograma final. Por lo tanto, el espectrograma reasignado es un enfoque poderoso debido a la inmunidad a ambientes ruidosos y la capacidad de identificar la evolución de frecuencias defectuosas durante los regímenes de arranque y de estado estacionario con alta precisión, como fue en el caso del MI alimentado con el inversor a 3 Hz; donde no se encontró trabajo en la literatura. Esto hace que la propuesta sea una herramienta adecuada y poderosa que se utiliza para la identificación de fallas únicas y combinadas durante diferentes estados de un MI que sea alimentado a través de un inversor.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amezcua Sanchez, J.P., Valtierra Rodriguez, M., Camarena Martinez D., Granados Lieberman, D., Romero Troncoso, R.J., & Dominguez Gonzalez, A., (2016). Fractal dimension-based approach for detection of multiple combined faults on induction motors. *SAGE Journal of Vibration and Control*, 22(13), pp. 3638-3648.
- [2] Antonino Daviu, J., Jover Rodriguez, P., Riera Guasp, M., Pineda Sánchez M., & Arkkio, A., (2009). Detection of combined faults in induction machines with stator parallel branches through the DWT of the startup current. *ELSEVIER Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, pp. 2336–2351.
- [3] Antonino Daviu, J., Quijano López, A., Climente Alarcon, V., & Garín Abellán, C., (2018). Reliable Detection of Rotor Winding Asymmetries in Wound Rotor Induction Motors via Integral Current Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), pp. 2040-2048.
- [4] Bengherbia, B., Zmirli, M. O., Toubal, A., Guessoum, A., (2020). FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *ELSEVIER Measurement*, 101, pp. 81-92.
- [5] Liu, Y., & Bazzi, A. M., (2018). A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. *Elsevier ISA Transactions*, 70, pp. 400–409.
- [6] Fernandez Cavero, V., Morinigo Sotelo, D., Duque Perez, O., & Pons Llinares, J., (2018). Fault Detection in Inverter-fed Induction Motors in Transient Regime:

- State of the Art. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 205-211.
- [7] Fulop, S. A., (2013). *Speech Spectrum Analysis*, 1st ed., Springer, pp. 127-137.
- [8] Carbajal Hernández, J. J., Sánchez Fernández, L. P., Hernández Bautista, I., Medel Juárez, J. J., & Sánchez Pérez, L. A., (2017). Classification of unbalance and misalignment in induction motors using orbital analysis and associative memories. *ELSEVIER Neurocomputing*, 175, pp. 838-850.
- [9] Gangsar, P., & Tiwari, R., (2019). Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms. *ELSEVIER Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, pp. 464-48.
- [10] Garcia Perez, A., Romero Troncoso, R. J., Cabal Yopez, E., & Osornio Rios, R. A., (2014). The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(5), pp. 2002-2010.
- [11] Gritli, Y., Rossi, C., Casadei, D., Filippetti, F., & Capolino, G. Andre, (2017). A Diagnostic Space Vector-Based Index for Rotor Electrical Fault Detection in Wound-Rotor Induction Machines Under Speed Transient. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64(5), pp. 3892-3902.
- [12] Karvelis, P., Georgoulas, G., Tsoumas, I. P., Antonino Daviu, J. A., Climente-Alarcón, V., & tylios, C. D., (2019). A Symbolic Representation Approach for the Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11(5), pp. 1028-1037.
- [13] Kia, S. H., Cirrincione, G., Henao, H., & Capolino, G. A., (2018) A computationally efficient algorithm devoted to gear tooth localized fault detection in induction machine-based systems. *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 2144-2150.
- [14] Madescu, G., Biriescu, M., Tutelea, L. N., Mot, M., Svoboda, M., & Boldea, I., (2020). Experimental Investigation of Rotor Currents Distribution in the Healthy and Faulty Cage of Induction Motors at Standstill. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64(7), pp. 5305-5313.

- [15] Panigrahy, P. S., Konar, P., & Chattopadhyay, P., (2019). Application of Data Mining in Fault Diagnosis of Induction Motor. IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), pp. 274-278.
- [16] Nelson, D. J., (2012). Instantaneous higher order phase derivatives. Digital Signal Processing, 12, pp. 416-428.
- [17] Pantea, A., Yazidi, A., Betin, F., Taherzadeh, M., Carrière, S., Henao, H., & Capolino, G. A., (2018). Six-Phase Induction Machine Model for Electrical Fault Simulation Using the Circuit-Oriented Method. IEEE Trans. Ind. Electron., 63(1), pp. 494-503.
- [18] Rajan Babu, W., & Ravichandran C. S., (2017). Comprehensive Review on Fault Detection in Induction Motor. International Journal of Applied Engineering Research, 10, pp. 43630-43634.
- [19] Rangel Magdaleno, J., Peregrina Barreto, H., Ramirez Cortes, J., Morales Caporal, R., & Cruz Vega, I., (2019). Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT. Hindawi Shock and Vibration, 2019, pp. 1-10.
- [20] Romero Troncoso, R. J., Garcia Perez, A., Morinigo Sotelo, D., Duque Perez, O., Osornio Rios, R. A., & Ibarra Manzano, M. A., (2016). Rotor unbalance and broken rotor bar detection in inverter-fed induction motors at start-up and steady-state regimes by high-resolution spectral analysis. ELSEVIER Electric Power System Research, 133, pp. 142–148.
- [21] Smart, E., Brown D., & Axel-Berg, L., (2015). Comparing one and two class classification methods for multiple fault detection on an induction motor. IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA), pp. 244-251.
- [22] Sudhakar, I., Adi Narayana, S., & Anil Prakash, M., (2020). Condition Monitoring of a 3- \emptyset Induction Motor by Vibration Spectrum analysis using Fft Analyser- A Case Study. ELSEVIER Materials Today: Proceedings, 4, pp. 1099-1105.
- [23] Trachi, Y., Elbouchikhi, E., Choqueuse, V., & Benbouzid, M. E. H., (2018). Induction Machines Fault Detection Based on Subspace Spectral Estimation. IEEE Trans. Ind. Electron., 63(9), pp. 5641-5651.