

# ANÁLISIS ESPECTRAL APLICADO A LA IDENTIFICACIÓN DE UNA FALLA MECÁNICA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN ALIMENTADO CON INVERSOR

Valencia Rivera, Gerardo Humberto (1), Dr. García, Arturo (2)

<sup>1</sup> [Ingeniería Mecatrónica, División de ingenierías y arquitectura, seccional Bucaramanga, Universidad Santo Tomás] | Dirección de correo electrónico: [gerardovalencia1991@gmail.com]

<sup>2</sup> [Departamento de ingeniería eléctrica, División de ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [arturo@ugto.mx]

## RESUMEN

Los motores de inducción son empleados en el sector industrial por su buen rendimiento y su bajo índice de mantenimiento, lo cual es muy positivo porque representa un buen índice de costo-beneficio en el uso de este tipo de motores, debido a sus pocas paradas para su mantenimiento, su alta durabilidad para llevar procesos pesados y pueden ser conectados directamente a una fuente de corriente alterna, que a nivel industrial representa un ahorro de costo muy significativo. Con el paso del tiempo y uso constante de estos motores empiezan a presentar fallas mecánicas en sus componentes, llegan a presentar fallas como barras rotas, desbalance mecánico y fallas mecánicas en los baleros o rodamientos por la fuerzas eléctricas y mecánicas que actúan sobre estos componentes. En este proyecto se propone emplear diversas técnicas de estudio espectral para detectar las diferentes fallas que presentan los motores de inducción alimentado por inversores, estas fallas se pretenden identificar mediante el análisis de señales de corriente, realizando el diagrama en tiempo-frecuencia frecuencia-energía de estas señales. Identificar este tipo de fallas a tiempo es de suma importancia porque estas fallas se presentan cuando los motores presentan daños importantes y causan paros inesperados en los procesos industriales.

## ABSTRACT

The induction motor are used in the industrial sector for good performance and low maintenance, wich is very positive becuase it represent a good cost-benefit ratio in the use of this type of engine, because of its few stops for maintenance, high durability to carry heavy processes and can be connected directly to an AC power source, that industrial level represents an very significant cost savings. With the passage of time of time and constant use of this engines begin to show any mechanical faults in its components, even present frailures such as broken bars, mechanical imbalance and mechanical frailures in the bearings for the electrical and mechanical forces acting on these components. This project is proposed to used various techniques of spectral study to detect the different faults presentig induction motor for inverter feeder, these frailures are intended to identify by analyzing current signals and performing time-frequency energy-frecuency diagram of these signals. Identify such frailures on time is very important because these frailures occur when motor have major damage and cause unexpected stoppages in industrial process.

## Palabras Clave

barras rotas; desbalance mecánico; rodamientos

## INTRODUCCIÓN

La detección de fallas en los motores de inducción se realiza por medio del análisis de las señales de corriente, en la mayoría de los casos estas señales son adquiridas por acelerómetros que detectan las vibraciones mecánicas, y por medio de los diagramas tiempo-frecuencia frecuencia-energía de estas señales se puede determinar cuáles son las fallas mecánicas que presenta el motor. Actualmente los problemas que presentan los motores de inducción se dividen en fallas mecánicas y fallas eléctricas, dentro de las fallas mecánicas podemos encontrar desgaste en los cojinetes, desbalance del rotor y distorsión en el entrehierro. En las fallas eléctricas se encuentran fallas de barras rotas y averías en el aislamiento de la bobina, por lo general los problemas en los cojinetes de los motores de inducción representan entre el 40%-50% de las fallas mencionadas anteriormente, las fallas en el rotor y el desbalance mecánico se le otorga entre 5%-10%, finalmente otras fallas en estos motores representan un 12%.

Este proyecto propone estudiar las fallas en los motores de inducción alimentados por un inversor, el cual tiene como objetivo detectar la falla mecánica en las barras del rotor, mediante una técnica de análisis espectral. Para llevar a cabo este experimento se debe partir de la incertidumbre ya que no se sabe en qué instante puede ocurrir la falla, entonces se debe realizar un monitoreo continuo para determinar cuál es la condición actual del motor y evitar posibles catástrofes en el motor durante el experimento. Es necesario emplear una técnica de análisis espectral que puede interpretar la información extraída de las señales de corriente y vibraciones del motor, con el fin de observar cuales son los cambios que presentan los componentes durante su funcionamiento.

Otras de las razones por las cuales se pueden presentar fallas en los motores de inducción se debe a anomalías en la geometría del rotor, lo que en su defecto es causado por roturas en la barra del rotor y excentricidades mixtas. Las excentricidades se deben a que en el proceso de fabricación existencia unas tolerancias, que tienen como efecto una desalineación en el rotor y el estator. Por lo general las fallas en el rotor se debe a que estos motores operan en condiciones de

desequilibrio, estas condiciones están dadas a la falta de alineación en el eje de carga y en el eje del rotor, la ubicación errónea de los rodamientos y el roce de los mismos, por último, la carga desequilibrada en el eje del motor.

Las técnicas propuestas para la detección de fallas en los motores de inducción, consiste en técnicas de detección no invasivas. Estas técnicas de detección de fallas realizan el análisis a la corriente del estator, utilizando la transformada rápida de Fourier para el análisis de los datos, esta técnica solo es empleada cuando el motor se encuentra en estado estacionario. Utilizar la transformada de Fourier para detectar fallas solo es conveniente cuando el motor se encuentra en estado de equilibrio, por esta razón no es el método más utilizado para la detección de fallas porque en la industria no es muy común encontrar motores funcionando bajo condiciones de equilibrio, incluyendo motores que se encuentran bajo condiciones de variaciones en su carga.

Se debe tener en cuenta que existen armónicos en el estator del motor cuando es alimentado por un inversor, este es el caso que se presenta en la mayoría de empresas que utilizan motores de inducción. Técnicas como la transformada rápida de Fourier se les dificulta la detección de fallas debido a la presencia de los armónicos en la corriente del estator, así el motor se encuentre en estado estacionario o no, porque los armónicos se pueden confundir con las componentes espectrales relacionadas con el fallo.

Sin embargo existe métodos que puede detectar los fallos de un motor inducción alimentador por un inversor, estas técnicas se caracteriza por tener una alta resolución espectral, como por ejemplo, el método de detección MUSIC consiste en la clasificación múltiple de la señal, característica muy conveniente para las aspiraciones de este proyecto, ya que este método es capaz de detectar fallos en cualquier estado de funcionamiento que se encuentre el motor, estado de equilibrio, estado transitorio en el arranque del motor o ambos estados en un solo análisis espectral.

El objetivo principal de este proyecto consiste en emplear la herramienta MUSIC para detectar la evolución del fallo en el plano tiempo-frecuencia,

fallas como barras rotas del rotor y excentricidades mixtas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En estado estacionario, los análisis de fallas en los motores de inducción están identificados por la presencia de armónicos en el espectro de corriente del estator. La detección de barra rota del rotor se puede realizar mediante la observación de los siguientes armónicos espaciales, estos armónicos espaciales son conocidas como frecuencia de barra rota del rotor o broken rotor bar fault (fBRB).

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

Donde  $s$  es el deslizamiento por unidad del motor y  $f_c$  es la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación. Los fallos de excentricidades mixtas relacionados con los armónicos ( $f_{ecc}$ ) están dados por la siguiente ecuación:

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

Donde  $p$  es el número par de polos del motor. Estas fórmulas dependen del deslizamiento por unidad del motor y está dada por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Donde  $n_1$  es la velocidad síncrona y  $n$  es la velocidad del rotor. Durante el estado transitorio del motor, la velocidad del rotor cambia, entonces las frecuencias de fallo relacionadas con la velocidad del rotor evolucionarán con el tiempo. La figura 1 nos muestra la evolución de estos armónicos durante un tiempo transitorio de arranque de un motor de inducción alimentado por un inversor. Para esta figura la puesta en marcha del motor dura 10 segundos y la frecuencia principal incrementa linealmente de 0 a 50 Hertz.

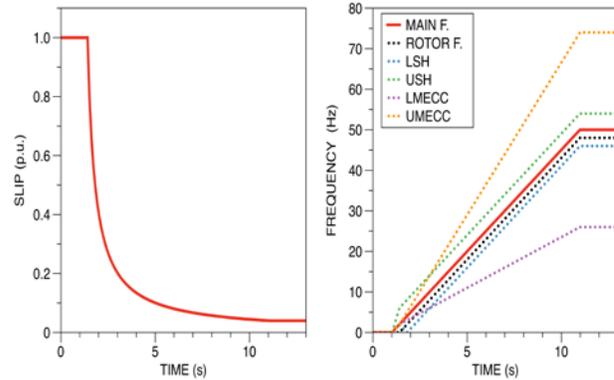


IMAGEN 1: Simulación de un motor de inducción alimentado a un inversor durante 10 segundos. Imagen A Evolución temporal del deslizamiento. Imagen B Evolución temporal de la frecuencia del rotor y los armónicos relacionados con las fallas de barra rota del rotor. LSH armónicos menores de banda lateral, USH armónicos superiores de banda lateral, LMECC excentricidad menor mixta, UMECC excentricidad mixta superior.

Para llevar a cabo este experimento se utilizó un motor siemens 1LA7090-51 con dos pares de polos, 1,1 kW de potencia nominal, 400 Voltios de tensión nominal, y 1500 rpm de velocidad síncrona. El motor está alimentado por un inversor Allen-Bradley PowerFlex 40 para poner a prueba las diferentes condiciones de funcionamiento del motor. Para simular una carga mecánica se utilizó un freno electromagnético Lucas-Nülle SE 2662-5R con su unidad de control.

Estas pruebas consisten en poner al motor de inducción en estado transitorio de arranque, seguido por una puesta del motor en estado estacionario con diferentes pares de carga. El funcionamiento del inversor está programado para que incremente la frecuencia del voltaje de 0 a 50 Hertz durante 10 segundos.

Para adquirir la señal de corriente del inversor se implementó una tarjeta con sensores de efecto hall Honeywell CSNE151, por último para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta de National Instruments DAQ 9174 con un módulo de adquisición de 16 bits, toda la instrumentación empleada para llevar a cabo este análisis está programada para una frecuencia de muestreo de 5 k Hertz.

El motor utilizado para este experimento se puso a prueba en 4 diferentes estados: el primer estado

consiste en poner al motor en estado sano, el segundo estado se trata de una desalineación entre los ejes del motor y la carga, el tercer estado consiste en unas perforaciones generadas al rotor, finalmente el cuarto estado es una combinación entre la barra rota del rotor y una desalineación de la carga a la que es sometida el motor.

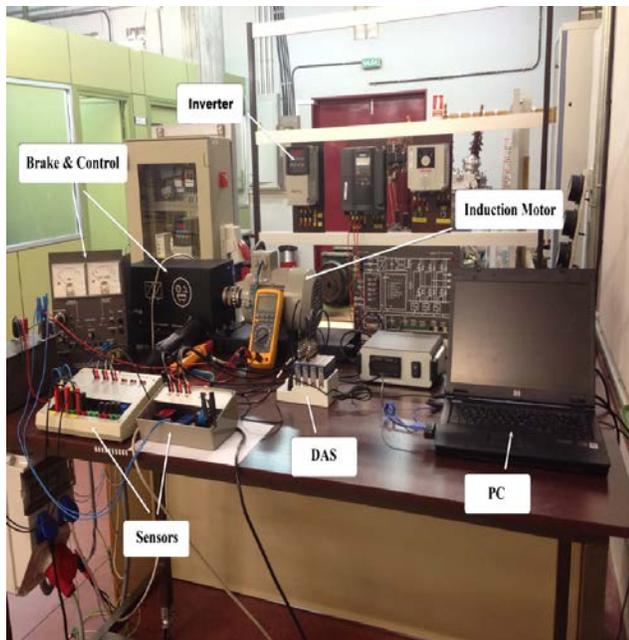


IMAGEN 2: Vista general del montaje experimental

La siguiente imagen hace un despliegue sobre cómo se va a llevar a cabo el experimento desde la alimentación del motor con el inversor hasta la técnica de análisis espectral MUSIC.



IMAGEN 3: Metodología propuesta para la detección de fallas para el motor de inducción en estado estable basado en la técnica de análisis espectral MUSIC

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El software implementado para la adquisición y procesamiento de datos es MATLAB, donde se hizo decimación de la señal de corriente proveniente del estator del motor de 5 k Hertz a 200 Hertz, desde la etapa de procesamiento y filtrado de esta misma señal. La decimación o disminución de muestras de esta señal nos provee una región de análisis de frecuencias de fallas en el arranque y estado estacionario del motor entre 0 y 100 Hertz, la señal de corriente del estator tiene una longitud máxima de 12 segundos. Durante 10 segundos se muestra el arranque en estado transitorio del motor, mientras que los 2 segundos restantes están asignados para el estado estacionario del motor.

Para el análisis de los estados sano, barra rota del rotor y excentricidades mixtas se utilizaron diferentes métodos de análisis espectral, con el fin de determinar cuál de los siguientes métodos tiene mejor eficacia y sensibilidad en su método de estimación espectral, esta comparación entre métodos de estimación espectral se evalúa en decibeles. La siguiente figura nos muestra la comparación entre los métodos empleados en MATLAB para el análisis espectral, en la detección de fallas en el motor de inducción implementado.

Tabla 1: Comparación de los diferentes métodos de análisis espectral en decibeles

Condición del motor	Técnicas de análisis espectral		
	STFT(Short Time Fourier Transform)	STFT+Wavelet	MUSIC
1. Sano	7	9	11
2. Barra rota del rotor	8	12	23
3. Excentricidades mixtas	12	18	29

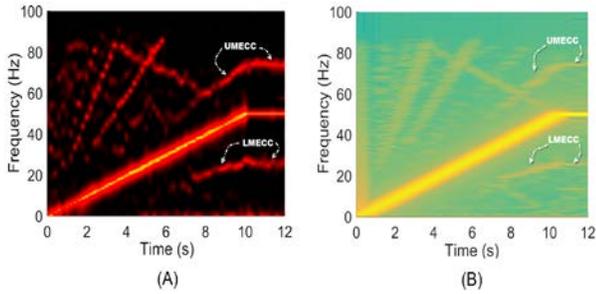


IMAGEN 4: Detección de la falla por desalineación de los ejes del motor y la carga utilizando (A) MUSIC y (B)STFT. LMECC excentricidad menor mixta, UMECC excentricidad mixta superior.

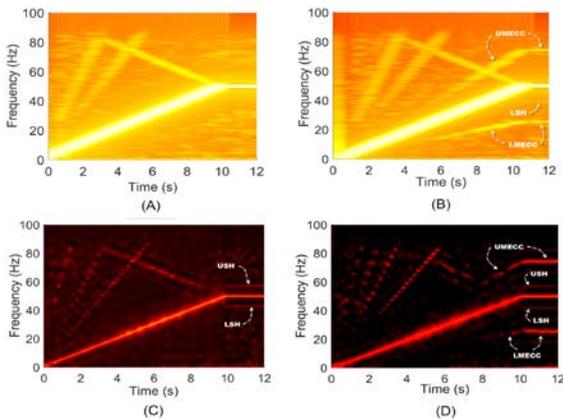


IMAGEN 5: (A) Detección de falla en barra rota de rotor utilizando STFT. (B) Detección de falla en barra rota de rotor y desalineación utilizando STFT. (C) Detección de falla en barra rota de rotor utilizando MUSIC. (D) Detección de falla en barra rota de rotor y desalineación utilizando MUSIC.

También se hizo un experimento con la falla barra rota del rotor y diferentes cargas a las que fue sometido el motor manteniendo constante la frecuencia del inversor.

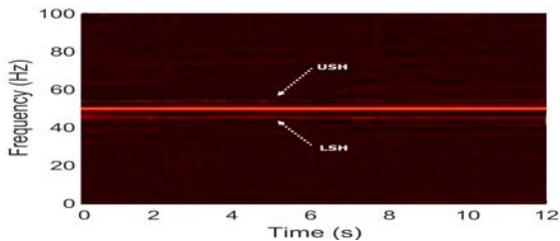


IMAGEN 5: La carga del motor permanece constante.

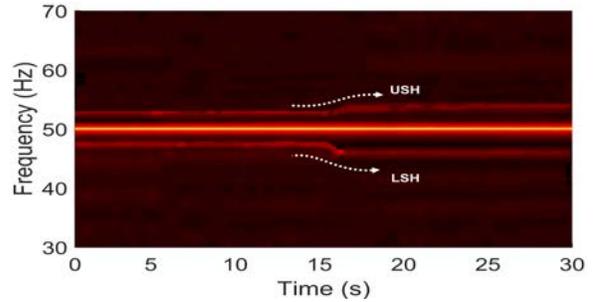


IMAGEN 6: Se incrementó la carga en estado estacionario.

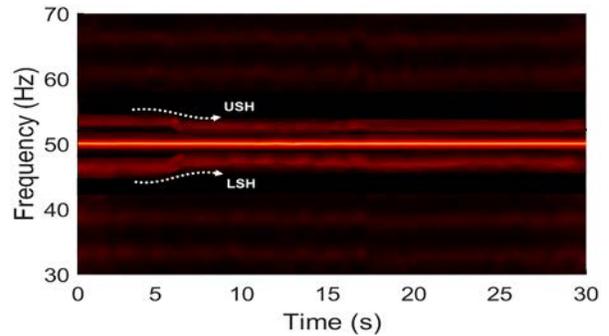


IMAGEN 7: Se hizo una disminución de la carga en estado estacionario.

En los espectrogramas obtenidos de la técnica MUSIC de las tres figuras anteriores se pueden observar que, aun así, se varió la carga se pueden detectar aun la falla dada por los armónicos de la barra rota del rotor.

## CONCLUSIONES

Mediante la herramienta MUSIC de MATLAB se logró detectar las diferentes fallas mecánicas del motor en estado transitorio y estado estacionario. Podemos deducir que la herramienta MUSIC es una de las mejores técnicas de análisis espectral, ya que pudo detectar las fallas mecánicas en el motor a pesar de los armónicos inducidos por el inversor. Esta técnica en comparación a otras es la propuesta más viable para la detección de fallos mecánicos ya sean individuales, combinados o cuando el motor se encuentra en frecuencia de operación constante, es tan alta la resolución de esta técnica espectral que demuestra su eficacia en el momento de detectar fallas de cualquier tipo.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad de Guanajuato por darme la oportunidad de participar en este verano de la investigación científica, que ha aportado grandes expectativas en mi carrera como investigador. Agradezco a mi director de investigación Dr. Arturo García Pérez y al Dr. David Camarena por el apoyo durante mi investigación.

## REFERENCIAS

- [1]Zamorano, M. 2010. Análisis de señales mediante STFT y Wavelet. Aplicación de defectología en rodamiento. Universidad Carlos 3 de Madrid.
- [2]García, 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. Universidad de Guanajuato, Mexico.