

## Simulación de fallas de motores de inducción tipo jaula de ardilla en media tensión

**Marot Alfredo**

<https://orcid.org/0000-0002-8829-4124>

[alfredomarot@gmail.com](mailto:alfredomarot@gmail.com)

Asesor e Instructor en la Empresa Technology, C.A  
Barcelona, Anzoátegui, Venezuela.

**Recibido (04/03/22), Aceptado (07/04/22)**

**Resumen:** El presente trabajo tuvo como objetivo principal modelar fallas de los motores de inducción rotor jaula de ardilla, presentamos las ecuaciones matemáticas que modelan las variables de la máquina, simulamos un motor de inducción en el software Matlab, para conocer y evaluar los efectos de los devanados estáticos cuando el motor experimenta faltas a su funcionamiento como cortocircuito entre espiras que existen muchas metodologías de diagnóstico para cada clase de falla. La técnica de mayor uso es el análisis del espectro de frecuencias de una o varias señales del motor. Una falla en el motor, representa una asimetría con respecto a su construcción, en consecuencia, en las señales eléctricas aparecen componentes armónicas que se relacionan con la falla presente el análisis espectral de firmas de corriente del motor aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) a la corriente ya que estas, contienen información relevante que se distingue en un espectro de frecuencias.

**Palabras Clave:** Maquina inducción, cortocircuito, detección de fallo, FFT.

## Fault simulation of medium voltage squirrel cage induction motors

**Abstract:** The main objective of this paper is to model failures of squirrel cage rotor induction motors, it presents the equations that model the machine variables, we simulate an induction motor in the Matlab-Simulink software, to know and evaluate the effects of the stator windings when the motor experiences failure to function as a short circuit between spirals that there are many diagnostic methodologies for each class of failure. The most widely used technique is the analysis of the frequency spectrum of one or several motor signals. A fault in the motor represents an asymmetry with respect to its construction; consequently, harmonic components appear in the electrical signals that are related to the present fault, the spectral analysis of motor current signatures applying the fast Fourier transform (FFT) to the current since these contain relevant information that is distinguished in a spectrum of frequencies.

**Keywords:** Induction machine, short circuit, fault detection, FFT.



## I. INTRODUCCIÓN

Desde que Mikhail Dolivo Dobrovolsky en 1889 construyó a escala comercial el primer modelo de prototipo de un motor de inducción trifásico, este actualmente se conserva en todas las máquinas de inducción [1]. El mismo se ha convertido en el más usado en la industria, debido a que la mayoría de los sistemas actuales de distribución de energía eléctrica suministran corriente alterna además que son robustos y sencillos en diseño, construcción y reparación. En el ámbito industrial se emplean generalmente motores grandes, trifásicos con elevado costo de mantenimiento y reparación. Dada la abundancia que tienen en la mayoría de los sectores industriales, son de mucha importancia y de especial atención en el área de mantenimiento puesto que el correcto funcionamiento en las industrias va a depender del porcentaje de estas máquinas presentes en la instalación. Cada día resulta más necesario conocer el estado de las máquinas de inducción, para así poder realizar la detección de fallo que puedan aparecer, incluso cuando todavía se encuentran en un estado incipiente. Existen numerosas razones que pueden causar falla en un motor, como un corto entre espiras, pérdida de aislamiento, etc. Si estas fallas no son atendidas, se puede originar una rápida degradación del devanado; requiriendo al final, un reemplazo de motor. Existen diversas investigaciones publicadas donde se muestra, que existen muchas metodologías de diagnóstico para cada clase de falla. La técnica de mayor uso es el análisis del espectro de frecuencias de una o varias señales del motor. Una falla en el motor, representa una asimetría con respecto a su construcción, en consecuencia, en las señales eléctricas aparecen componentes armónicas que se relacionan con la falla presente. Dentro del análisis espectral está el análisis de firmas de corriente del motor, en la cual se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) a la corriente de una de las fases del estator cuando existe alguna asimetría, las corrientes del estator contienen información relevante que se distingue en un espectro de frecuencias.

## II. DESARROLLO

### A. Modelo del Motor de Inducción con resistencias explícitas

Resulta fundamental conocer los modelos de las máquinas eléctricas respecto al diagnóstico de fallas de las mismas, y en particular, el software Matlab implementa un Modelo dinámico del motor de inducción [2]. El programa permite la simulación dinámica de motores eléctricos en Simulink, plataforma que proporciona un entorno gráfico y un conjunto de bibliotecas de bloques, Simcape una extensión de bloques que nos permite modelar máquinas eléctricas, estos bloques de la máquina implementado en el software, usa la teoría de la máquina generalizada (modelo dq) y puede modelar motores con jaula de ardilla simple.

#### Modelo del motor

El modelo parte de la teoría clásica del motor de inducción expresando las variables eléctricas en forma compacta por las siguientes ecuaciones [3]:

$$\begin{aligned}
 v_s^{abc} &= [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]' \\
 v_r^{abc} &= [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]' \\
 v_s^{abc} &= [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]' \\
 I_s^{abc} &= [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]' \\
 I_r^{abc} &= [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]' \\
 \lambda_s^{abc} &= [\lambda_{as} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]' \\
 \\ 
 \lambda_r^{abc} &= [\lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]' \\
 \\ 
 R_s^{abc} &= \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \\
 R_r^{abc} &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Al transformar el modelo en el marco de referencia arbitrario se convierte en:

$$T_{qd0}(\theta)v_s^{abc} = T_{qd0}(\theta)R_s^{abc}T_{dq0}^{-1}(\theta)T_{qd0}(\theta)I_s^{abc} + T_{qd0}(\theta)p[T_{dq0}^{-1}(\theta)T_{qd0}(\theta)\lambda_s^{abc}] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_{qd0}(\theta - \theta_r)v_r^{abc} \\ = T_{qd0}(\theta - \theta_r)R_r^{abc}T_{dq0}^{-1}(\theta - \theta_r)T_{qd0}(\theta - \theta_r)I_r^{abc} \\ + T_{qd0}(\theta - \theta_r)p[T_{dq0}^{-1}(\theta - \theta_r)T_{qd0}(\theta - \theta_r)\lambda_r^{abc}] \end{aligned}$$

Donde

$$T_{qd0}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La ecuación (3) se reduce a

$$v_s^{dq0} = T_{dq0}(\theta)R_s^{abc}T_{dq0}^{-1}(\theta)I_s^{dq0} + w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{dq0} + p\lambda_s^{dq0} \quad (4)$$

$$v_r^{dq0} = T_{dq0}(\theta - \theta_r)R_r^{abc}T_{dq0}^{-1}(\theta - \theta_r)I_r^{dq0} + (w - w_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_r^{dq0} + p\lambda_r^{dq0} \quad (5)$$

Si las resistencias de los devanados del estator son iguales ( $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$ ) entonces resulta:

$$T_{dq0}(\theta)R_s^{abc}T_{dq0}^{-1}(\theta) = T_{dq0}(\theta) \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} T_{dq0}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} = R_s^{dq0} \quad (6)$$

Es decir, la transformación es invariante para los elementos estáticos, de igual forma, si las resistencias de los devanados del rotor son iguales ( $R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r$ ) Se tiene:

$$T_{dq0}(\theta - \theta_r) R_r^{abc} T_{dq0}^{-1}(\theta) = T_{dq0}(\theta - \theta_r) \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} T_{dq0}^{-1}(\theta - \theta_r) = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} = R_r^{dq0} \quad (7)$$

Sin embargo al considerar las resistencias desiguales, resulta:

$$\begin{aligned} T_{dq0}(\theta) R_s^{abc} T_{dq0}^{-1}(\theta) &= T_{dq0}(\theta) \begin{bmatrix} R_{Sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{Sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Sc} \end{bmatrix} T_{dq0}^{-1}(\theta) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{2}{3}R_{Sa} + \frac{1}{6}R_{Sb} + \frac{1}{6}R_{Sc} & \frac{\sqrt{3}}{6}(R_{Sb} - R_{Sc}) & \frac{2}{3}R_{Sa} - \frac{1}{3}R_{Sb} - \frac{1}{3}R_{Sc} \\ \frac{1}{6}(R_{Sb} - R_{Sc}) & \frac{1}{3}(R_{Sb} - R_{Sc}) & \frac{\sqrt{3}}{3}(R_{Sb} - R_{Sc}) \\ \frac{1}{3}R_{Sa} - \frac{1}{6}R_{Sb} - \frac{1}{6}R_{Sc} & -\frac{\sqrt{3}}{6}(R_{Sb} - R_{Sc}) & \frac{1}{3}(R_{Sa} + R_{Sb} + R_{Sc}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_{s11} & R_{s12} & R_{s13} \\ R_{s21} & R_{s22} & R_{s23} \\ R_{s31} & R_{s32} & R_{s33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

De igual manera para el rotor se tiene

$$T_{dq0}(\theta) r_s^{abc} T_{dq0}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} R_{r11} & R_{r12} & R_{r13} \\ R_{r21} & R_{r22} & R_{r23} \\ R_{r31} & R_{r32} & R_{r33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sustituyendo (8) y (9) en (2)

En notación matricial:

$$V = (W \cdot L + R) \cdot I + L \cdot pI \quad (10)$$

Al despejar la derivada de la corriente se obtiene:

$$pI = -L^{-1}(W \cdot R)I + L^{-1}V \quad (11)$$

El modelo del motor de inducción en el marco de referencia fijo al estator, considerando los efectos de resistencias distintas es:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{qs} \\ \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qr} \\ \dot{I}_{dr} \\ \dot{w}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta(-L_r R_{s11} I_{qs} - (L_r R_{s12} + n_p w_r M^2) I_{ds} + M R_{r11} I_{qr} + (R_{r12} - n_p w_r L_r) M I_{dr} + L_r V_{qs} \\ \zeta(-(L_r R_{s21} + n_p w_r M^2) I_{qs} - L_r R_{s22} I_{ds} + (R_{r21} - n_p w_r L_r) M I_{qr} + M R_{r22} I_{dr} + L_r V_{ds} \\ \zeta(M R_{s11} I_{qs} - (M R_{s12} + n_p w_r L_s M) I_{ds} + L_s R_{r11} I_{qr} + (R_{r12} - n_p w_r L_r) L_s I_{dr} + M V_{qs} \\ \zeta((M R_{s21} + n_p w_r L_s M) I_{qs} + M R_{s22} I_{ds} - (R_{r21} + n_p w_r L_r) L_s I_{qr} - L_s R_{r22} I_{dr} - M V_{ds} \\ \frac{3n_p M}{2J} (I_{qs} I_{ds} - I_{qr} I_{dr}) - \frac{B}{J} w_r - \frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dónde:

$R_{sij}, R_{rij}$  = Resistencias del estator y rotor respectivamente para  $i, j : 1...3$

$L_s, L_r$  = Inductancias de los devanados del estator y rotor respectivamente

$M$  = Inductancia mutua  $p$  n Número de pares de polos del motor

$T_L$  = Par de carga

$B$  = Coeficiente de fricción viscosa

$J$  = Inercia total

$\Omega_r$  = Velocidad mecánica de rotación

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$  = Corrientes de estator y rotor en el marco de referencia fijo al estator

$V_{ds}, V_{qs}$  = Voltajes de alimentación en el marco de referencia fijo al estator

### Fallas en el estator o armadura

El devanado del estator consta de bobinas de alambre de cobre aislado distribuidas en ranuras alrededor de la superficie del estator. Las fallas en el devanado del estator son a menudo causadas por fallas en el aislamiento entre dos espiras adyacentes en una bobina. Esto es llamado una falla entre vuelta-vuelta o cortocircuito en el devanado. Las corrientes inducidas resultantes producen calentamiento adicional y causan un desequilibrio en el campo magnético de la máquina. Se pueden dañar las máquinas debido al sobrecalentamiento de los sistemas de aislamiento, por lo que se pueden instalar en el estator sensores de temperatura en posiciones estratégicas.

Existe una expresión que nos permite encontrar la frecuencia característica de los cortocircuitos. [4]

$$f_{cc} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1 - s) + / - k \right\} \quad (13)$$

Donde

$f_{cc}$  = frecuencia característica de la componente producida por el cortocircuito;

$f_1$  = frecuencia de la red de alimentación.

$n = 1, 2, 3, \dots$ ;

$k = 1, 3, 5, \dots$ ;

$p$  = número de pares de polos

$s$  = deslizamiento

### Ruptura de las barras del rotor y fallas en los anillos

La detección de este fallo se puede suceder debido a la fractura de una de las barras o de uno de los anillos del rotor, lo que convierte al rotor en un circuito trifásico (3I) desbalanceado. Este desbalance se manifiesta por medio de la circulación de corrientes de secuencia negativa. Como consecuencia de ello, se establece un campo magnético que gira en sentido contrario a la rotación del rotor, este campo giratorio provoca un nuevo par sobre el rotor, a una frecuencia [4]:

$$f_0 = 2 \cdot s \cdot f_1 \quad (14)$$

Este par, a su vez, ocasiona una oscilación en la velocidad del rotor, cuya amplitud depende de la inercia acoplada. Tales oscilaciones afectan a las corrientes del estator, sobre las cuales se inducen las denominadas bandas laterales, dadas a las frecuencias:

$$f_s = (1 \pm 2 \cdot s) \cdot f_1 \quad (15)$$

Estas bandas laterales permiten identificar claramente fallas en el rotor, las frecuencias a las que se manifiestan son función del deslizamiento del motor y su amplitud es fuertemente dependiente del estado de la carga. Un diagnóstico correcto exige como mínimo que el motor se encuentre por encima de la mitad de su carga nominal. Algunas cargas que presentan pares pulsantes (tales como los compresores) pueden provocar bandas laterales similares a las producidas por una falla e interferir en el diagnóstico.

### III.METODOLOGÍA

#### A.Simulación de fallas en el Motor de Inducción

El modelo presentado tiene la posibilidad de provocar fallas de corto circuito y circuito abierto en cualquiera de las tres fases, ya sea del estator o rotor, En esta parte se realizó la simulación en matlab simulink utilizando los parámetros de un motor de inducción de media tensión con las características siguientes:

Tabla 1. Características del motor.

<b>MOTOR</b>	
Tipo de Maquina	ABB TRAFO
Aislamiento/ aumento de temp.	POV/10.000/123
Ambiente de max. temperatura	1999
Potencia mecánica de salida nominal	1500HP
Voltaje Nominal	6600V
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	892rpm
Corriente Nominal	123Amp
Factor de Potencia.	0.83
Torque	8834 lb-ft

Los parámetros, resistencias del estator y rotor, Inductancias de los devanados del estator y rotor, Inductancia mutua fueron estimados en el software Etap versión 12.6.0. A continuación mostramos el montaje en simulink del modelo del motor ensayado

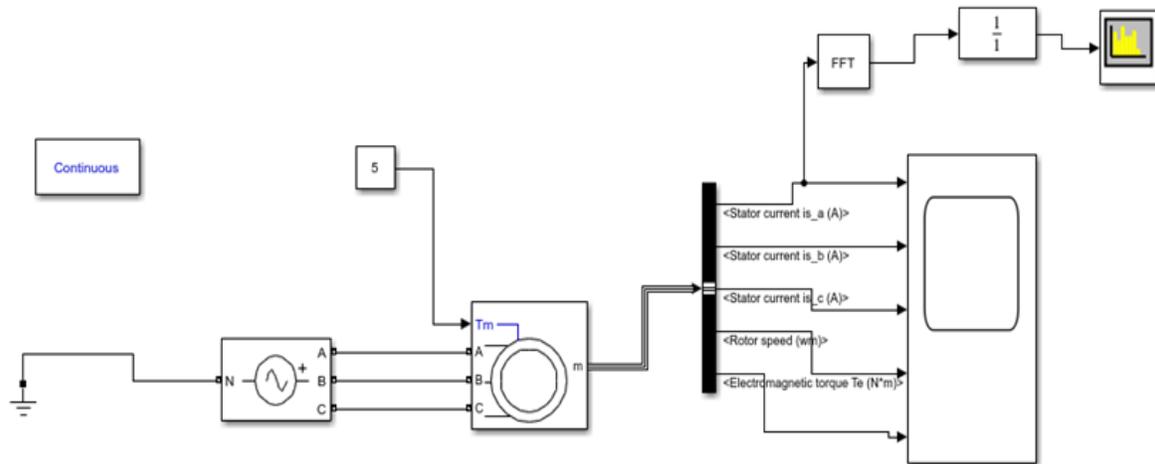


Fig. 1. Simulación de motor jaula de ardilla de media tensión en Simulink

#### IV.RESULTADOS

Se trata de simular el espectro de frecuencia del motor trabajando en condiciones ideales acorde a su diseño, como se muestra a baja carga no existen bandas laterales .

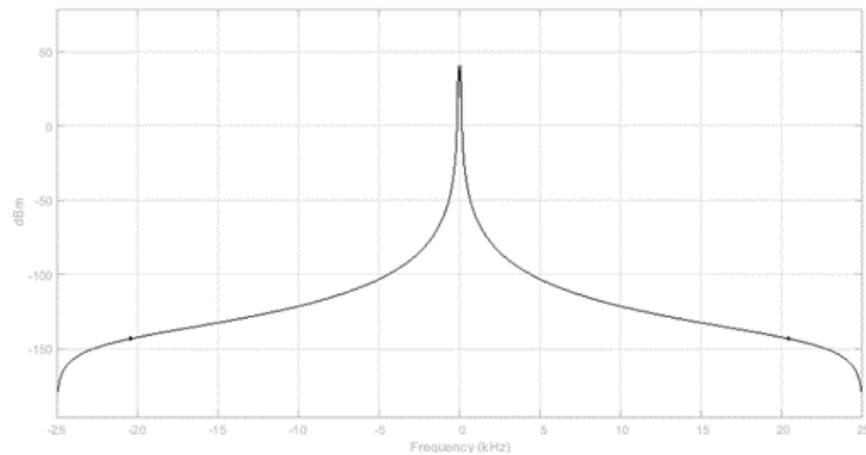
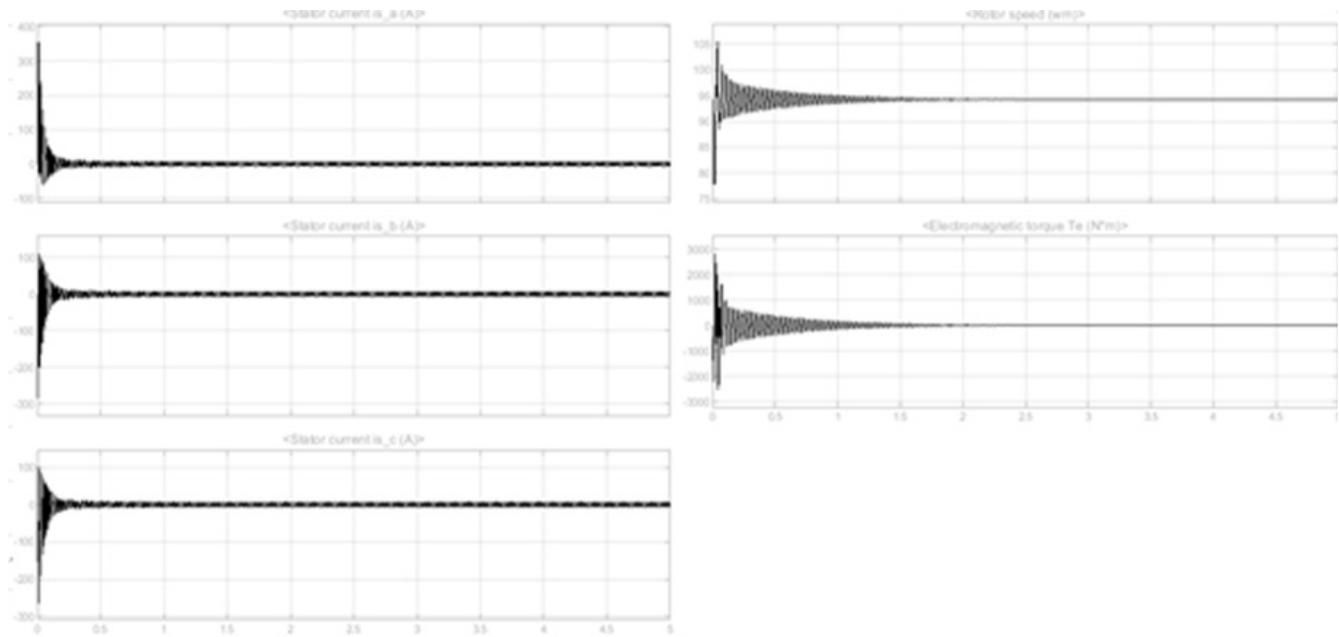
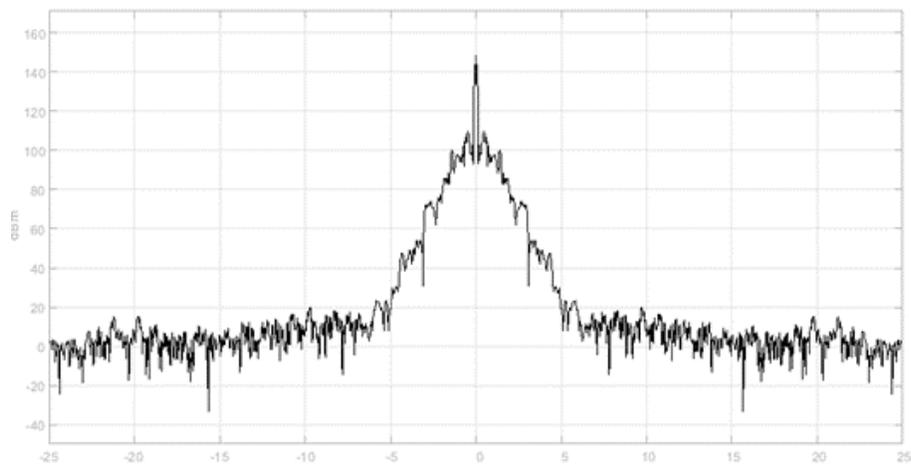


Fig. 2. Espectro de la corriente en la fase A motor sano.

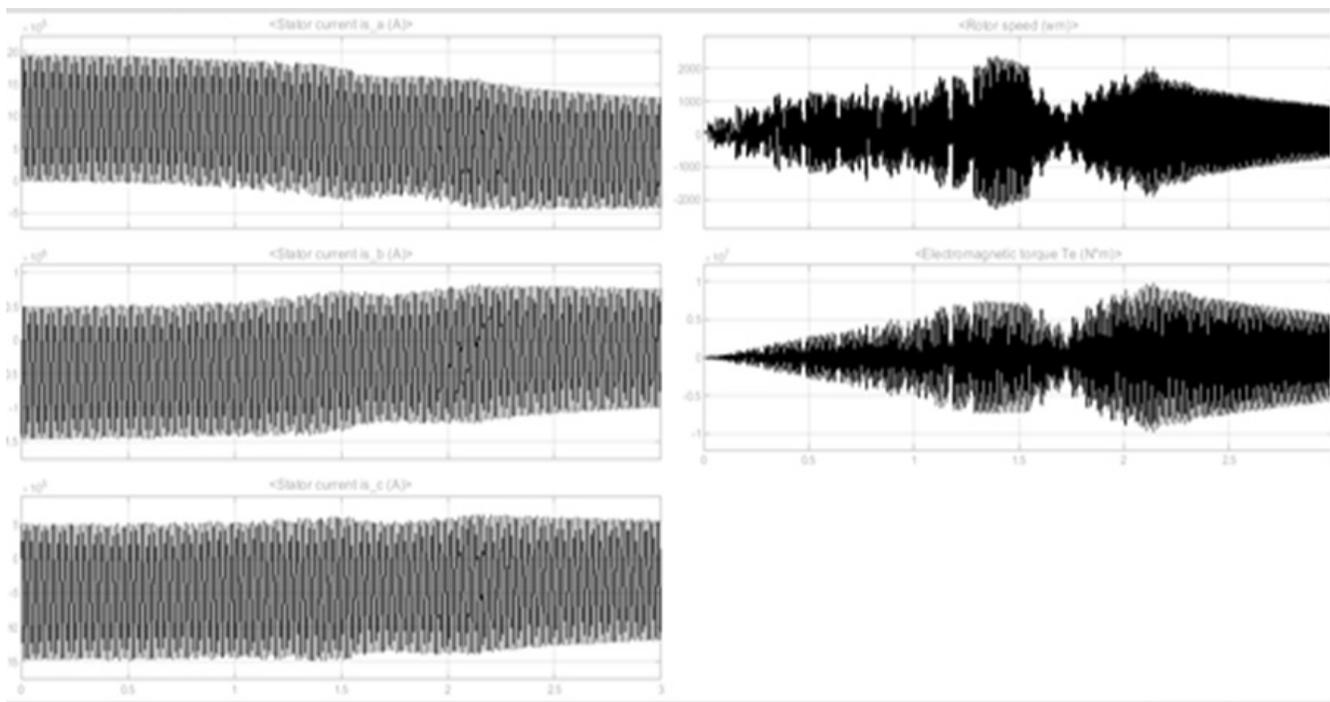


**Fig. 3** Corriente en la fase A, Corriente en la fase b, Corriente en la fase C, Velocidad del rotor Torque electromagnético de la máquina, motor sano

En las figura 2 y 3, en 2 se muestra el espectro de frecuencia de la corriente y en 3 el desarrollo de la corriente en cada fase, velocidad, el par generado, a continuación alteramos las resistencias e impedancias de la máquina para inducir una falla del sistema y observar el comportamiento del patrón del espectro de frecuencia.



**Fig. 4.** Espectro de la corriente motor en falla



**Fig. 5. Corriente en la fase A, Corriente en la fase b, Corriente en la fase C, Velocidad del rotor Torque electromagnético de la máquina, motor Fallado**

En las figura 4 y 5, en 4 se muestra el espectro de frecuencia de la corriente con el motor fallado y, en 5 el desarrollo de la corriente en cada fase, velocidad, el par generado, cuando hemos alterado las resistencias e impedancias de la máquina para inducir una falla del sistema y observar el comportamiento del patrón del espectro de frecuencia, podemos observar la aparición de las bandas laterales en todo el espectro de frecuencia, si bien otros autores han demostrado que existe patrones alterados cuando se aumenta la carga del sistema es de notar que se puede estudiar más a fondo haciendo comparación con inteligencia artificial, técnicas de análisis de datos, o recurrir al estudio de los invariantes de la dinámica para establecer comparaciones cuando existen fallas o cuando existen cambios en la carga y poder discriminar las fallas del sistema y caracterizar cada una de ellas.

## V.CONCLUSIONES

Al contar con los modelos de fallas experimentados en simulación, es posible obtener un conjunto de datos que permitan caracterizar el comportamiento de los devanados de un motor trifásico, cuando este es sometido a condiciones anormales de funcionamiento. La caracterización de los resultados podría permitir obtener modelos de comportamiento para la detección de fallos y diagnosticar la máquina de inducción. A partir de estos resultados se daría la posibilidad de crear sistemas expertos que permite detectar las fallas en los motores eléctricos y así planificar acciones preventivas para evitar fallas catastróficas en el futuro. Algunos de los tipos de fallas presentes en los devanados se pueden detectar por análisis de la FFT de la corriente, cuando aún se encuentren en estado prematuro. El principio para encontrar las frecuencias de falla es preciso, ya que los valores de frecuencias de falla que aparecen en el espectro de la FFT de la corriente se pueden determinar a través búsqueda en dicho espectro.

## REFERENCIAS

- [1] A. Blanco Benito. Máquinas Eléctricas. Bolivia. Universidad técnica de Oruro. Facultad Nacional de Ingeniería. Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica. 2018.
- [2] P. Abellan Olivares. "Diseño de una GUI en Matlab para el estudio y control de variadores de frecuencia en motores electricos,". M.S.Tesis, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. VAL. 2019
- [3] E. Vidal Rosas. "Diagnóstico y reconfiguración de fallas en el motor de inducción utilizando observadores

no lineales". M.S.Tesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cenidet. Cuernavaca. MOR. Mexico.2006.

[4]Z.Y. Medrano Hurtado. "Un estudio sobre la localización, detección y diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas,". Cienc. Ing. Neogranad. vol.23 no.1.pp. 37-59. June 2013.

[6]P.I González Domínguez. "Aportaciones al diseño de máquinas eléctricas de inducción mediante el método de la celda". Ph.D. Disertación. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. LPA. España. 2015

[7]R. Bargallo Perpiña. "Aportación a la determinación de parámetros de los modelos en la maquina asíncrona para una mejor identificación de variables no mensurables incidentes en su control". Ph.D. Disertación. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. CAT. 2001.

[8]A. Mohamed. "Fault diagnosis of mechanical systems based on electrical supply characteristics". Ph.D. Disertación. University of Huddersfield. Huddersfield. YSW. 2019.

[9]J. Perat Benavides. "Contribución al control de motores de reluctancia autoconmutados". Ph.D. Disertación. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. CAT. 2006.

## RESUMEN CURRICULAR



**Alfredo Marot.** Ingeniero Electricista/Electrónico, especialista en Automatización e Informática Industrial, profesor universitario. Actualmente Instructor en MDJ Technology. C.A. residenciado en la ciudad de Barcelona, Anzoátegui. Venezuela.