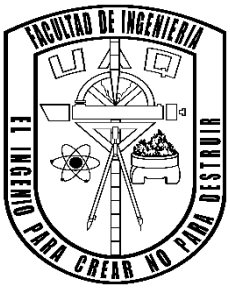


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO

MAESTRÍA EN CIENCIAS (MECATRÓNICA)



Modelado de fallas de excentricidad en motores de inducción mediante técnicas numéricas computacionales para caracterizar sus componentes frecuenciales

T E S I S

Como parte de los requisitos para obtener el título de

MAESTRO EN CIENCIAS

Línea Terminal
Mecatrónica

PRESENTA:

ING. CITLALLI ZAMUDIO RAMÍREZ

DIRIGIDO POR:

DR. ISAÍAS CUEVA PÉREZ

SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO. JUNIO DE 2026

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (MECATRÓNICA)
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO

Modelado de fallas de excentricidad en motores de inducción mediante técnicas numéricas computacionales para caracterizar sus componentes frecuenciales

T E S I S

Como parte de los requisitos para obtener el título de

MAESTRO EN CIENCIAS (MECATRÓNICA)

Línea Terminal
Mecatrónica

Presenta:
ING. CITLALLI ZAMUDIO RAMÍREZ

Dirigido por:
DR. ISAÍAS CUEVA PÉREZ

DR. ISAÍAS CUEVA PÉREZ
Presidente

DR. LUIS MORALES VELÁZQUEZ
Secretario

DR. JUAN PABLO AMÉZQUITA SÁNCHEZ
Vocal

DR. CARLOS GUSTAVO MANRÍQUEZ PADILLA
Suplente

M. EN C. JOSÉ VILLAGÓMEZ MORENO
Sinodal

San Juan del Río, Qro. Junio de 2026

DEDICATORIA

A mi familia, por acompañar cada sueño mucho antes de que pudiera alcanzarlo.
A mi madre, cuya voz aún encuentro cuando más la necesito.
A mi novio, por permanecer a mi lado y recordarme siempre de lo que soy capaz.
A mis amigos, por compartir conmigo sus pasiones, su tiempo y amistad.
A mi mascota, cuya presencia hace del silencio un refugio.
A Dios, por la gracia de llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por ser mi mayor pilar, por su cariño y por el apoyo que me impulsa a seguir adelante en cada paso que doy. A mi padre, Gabino Zamudio, por su apoyo constante y por ser un gran ejemplo de esfuerzo y fortaleza en mi vida. A mis hermanos Omar, Karen, Israel y Aldo, por estar presentes siempre; gracias por ser personas trabajadoras, resilientes, honradas y perseverantes, y por recordarme, con su ejemplo, el valor de seguir adelante. Agradezco especialmente a mi querida madre, Bertha Ramírez, quien con amor dedicó su vida entera a su familia. Aunque tu ausencia se siente profundamente, tu amor, tus enseñanzas y tu recuerdo me acompañan siempre. Sin ti, sin tu guía y sin todo lo que sembraste en mí, este logro no habría sido posible.

Agradezco a mi pareja, Esteban, por acompañarme durante estos casi cuatro años con cariño, paciencia y apoyo constante. Gracias por creer en mí y por recordarme mis capacidades cuando más lo necesité. Tu amor, confianza y compañía han sido un apoyo invaluable durante esta etapa.

Agradezco a mis amigos y compañeros del cubículo F4: Melissa, Carlos E., Carlos A., Ángel, Gustavo y David. Gracias por su amistad y por enseñarme nuevas cosas, las cuales jamás pensé que llegarían a gustarme. No olvidaré aquellos momentos jugando UNO ni los jueves de JJK. Gracias por hacer más ameno mi paso por la maestría y por recibirme con los brazos abiertos en tan agradable cubículo.

Agradezco a mi cuerpo sinodal, por ser parte de este trabajo, por sus observaciones, comentarios y valiosas aportaciones. Agradezco especialmente su disposición y compromiso con mi formación académica.

Asimismo, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado a través de la beca otorgada durante mis estudios de maestría (CVU 1353469), la cual fue fundamental para poder dedicarme al desarrollo y realización del presente trabajo.

RESUMEN

La excentricidad en motores de inducción es una falla mecánica que modifica la distribución del entrehierro entre el rotor y el estator, lo que puede generar componentes frecuenciales características en la corriente del estator. En este trabajo se presenta una metodología basada en el método de elementos finitos para modelar un motor de inducción en estado sano y con falla de excentricidad mixta, con el objetivo de caracterizar el efecto de la carga sobre la respuesta en frecuencia de la señal de corriente. El modelo bidimensional fue desarrollado en Ansys Maxwell y evaluado bajo cuatro niveles de carga: 0%, 50%, 78.6% y 100%. Posteriormente, las señales de corriente obtenidas mediante simulación fueron procesadas aplicando la Transformada Rápida de Fourier, con el fin de identificar las componentes asociadas a la falla. Los resultados fueron comparados con señales experimentales del mismo motor, obteniendo una similitud aproximada del 99% en la ubicación frecuencial de las componentes de interés. Estos resultados demuestran que la integración de simulación mediante el Método de Elementos Finitos y análisis frecuencial mediante FFT, hacen del método una herramienta útil para estudiar el comportamiento de fallas por excentricidad en motores de inducción bajo distintas condiciones de carga.

Palabras clave: Ansys Maxwell, falla de excentricidad, método de elementos finitos, motor de inducción, transformada rápida de Fourier, variación de carga.

ABSTRACT

Eccentricity in induction motors is a mechanical fault that modifies the air-gap distribution between the rotor and the stator, which can generate characteristic frequency components in the stator current. This work presents a methodology based on the finite element method to model an induction motor under healthy and mixed eccentricity fault conditions, with the aim of characterizing the effect of load on the frequency response of the current signal. The two-dimensional model was developed in Ansys Maxwell and evaluated under four load levels: 0%, 50%, 78.6%, and 100%. Subsequently, the current signals obtained through simulation were processed using the Fast Fourier Transform in order to identify the frequency components associated with the fault. The results were compared with experimental signals from the same motor, obtaining an approximate 99% similarity in the frequency location of the components of interest. These results demonstrate that the integration of simulation through the finite element method and frequency analysis using FFT makes the proposed methodology a useful tool for studying the behavior of eccentricity faults in induction motors under different load conditions.

Keywords: Ansys Maxwell, eccentricity fault, Fast Fourier Transform, finite element method, induction motor, load variation.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 12

1.1 ANTECEDENTES 15

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 18

1.3 JUSTIFICACIÓN 21

1.4 OBJETIVOS 23
1.4.1 OBJETIVO GENERAL 23
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 23

1.5 HIPÓTESIS 24

1.6 PLANTEAMIENTO GENERAL 24

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y TECNOLÓGICA 27

2.1 MOTOR ELÉCTRICO 27
2.1.1 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS 28
2.1.2 MOTORES DE INDUCCIÓN 30

2.2 FALLAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN 31
2.2.1 FALLAS MECÁNICAS 32
2.2.2 FALLAS ELÉCTRICAS 33

2.3 FALLA DE EXCENTRICIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN 34

2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 36
2.5.1 TIPOS DE ELEMENTO UTILIZADOS EN EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO EN SOLUCIONES ELECTROMAGNÉTICAS 38

2.5 ECUACIONES DE MAXWELL 40

2.6 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER 42

3 METODOLOGÍA 44

3.1 MODELADO GEOMÉTRICO EN 2D DEL MOTOR DE INDUCCIÓN 45
3.1.1 GEOMETRÍA DEL ESTATOR 48
3.1.2 GEOMETRÍA DEL ROTOR 50

3.2 ASIGNACIÓN DE CONDICIONES INICIALES 53
3.2.1 CONFIGURACIÓN DEL MOVIMIENTO 53
3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL LÍMITE DE POTENCIAL VECTORIAL. 61
3.2.3 ASIGNACIÓN DE LAS FASES 63
3.2.4 CONFIGURACIÓN DE LA CONEXIÓN FINAL 69

3.3 MALLADO Y SOLUCIÓN DE CONFIGURACIÓN 73
3.4 CONFIGURACIÓN DE LA FALLA DE EXCENTRICIDAD MIXTA 76
3.5 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES 78
4 RESULTADOS 82
4.1 SEÑALES EN EL TIEMPO 82
4.2 RESULTADOS EN SIMULACIÓN 84
4.2.1 FFT CONDICIÓN DE EXCENTRICIDAD MIXTA 85
4.2.2 FFT CONDICIÓN ESTADO SANO 86
4.2.3 COMPARATIVA FFT EXCENTRICIDAD MIXTA EN ESTADO SANO.. 88
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES 95
4.3.1 COMPARATIVA CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CONDICIÓN CON EXCENTRICIDAD MIXTA 95
4.3.2 COMPARATIVA CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CONDICIÓN SANO 100
5 CONCLUSIONES 106
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 109
7 ANEXOS 121
7.1 PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS DE CONGRESO 121
7.1.1 PRIMER ARTÍCULO DE CONGRESO: IECON 2025 121
7.1.2 SEGUNDO ARTÍCULO DE CONGRESO: CONIIN 2026 122
7.2 CONSTANCIA DE MANEJO DE LENGUA INGLÉS 123
7.3 REGISTRO DE PROTOCOLO 124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Motor de inducción y sus partes [24] 31

Figura 2.2. Sección transversal de un motor de inducción con falla de excentricidad: a) estática, b) dinámica y c) mixta (autoría propia) 35

Figura 2.2. Pasos para la simulación mediante MEF [74] 38

Figura 2.3. Elementos típicos de MEF en el plano bidimensional x, y [74] 39

Figura 2.4. Elementos típicos de MEF en el plano tridimensional x, y, z [74] 39

Figura 3.1. Diagrama metodológico (autoría propia) 44

Figura 3.2. Niveles de eficiencia del motor de inducción trifásico WEG W22 de 4 polos para 50 Hz [84] 47

Figura 3.3. Geometría bidimensional empleada para el estator del motor de inducción (autoría propia) 50

Figura 3.4. Geometría bidimensional empleada para el rotor del motor de inducción (autoría propia) 51

Figura 3.5. Geometría bidimensional del motor de inducción (autoría propia) 53

Figura 3.6. Configuración del movimiento del motor de inducción (autoría propia) 60

Figura 3.7. Configuración del límite de potencial vectorial del motor de inducción (autoría propia) 63

Figura 3.8. Distribución de las fases A, B y C y asignación de polaridades en el motor de inducción trifásico (autoría propia) 67

Figura 3.9. Configuración de la fase A del motor de inducción mediante Ansys Maxwell (autoría propia) 68

Figura 3.10. Configuración de la conexión final del motor de inducción (autoría propia) 72

Figura 3.11. Mallado del modelo del motor de inducción (autoría propia) 75

Figura 3.12. Configuración de la falla de excentricidad mixta en el motor de inducción (autoría propia) 77

Figura 3.13. Acercamiento a la configuración de la falla de excentricidad mixta en el motor de inducción (autoría propia) 78

Figura 3.14. Metodología para el procesamiento de señales y aplicación de la FFT (autoría

propia) 79

Figura 4.1. Señales en el tiempo del motor sano con diferentes niveles de carga en: a) pruebas experimentales y b) pruebas simuladas en Ansys Maxwell (autoría propia) 83

Figura 4.2. Señales en el tiempo del motor con excentricidad mixta con diferentes niveles de carga en: a) pruebas experimentales y b) pruebas simuladas en Ansys Maxwell (autoría propia) 84

Figura 4.3. Espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor con excentricidad mixta bajo diferentes niveles de carga (autoría propia) 85

Figura 4.4. Espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano bajo diferentes niveles de carga (autoría propia) 87

Figura 4.5. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 0% de carga (autoría propia) 89

Figura 4.6. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 50% de carga (autoría propia) 90

Figura 4.7. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 78.6% de carga (autoría propia) 91

Figura 4.8. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 100% de carga (autoría propia) 92

Figura 4.9. Variación de la magnitud de las componentes frecuenciales $fs \pm kfr$ obtenidas mediante FFT en las señales de corriente simuladas del motor de inducción con falla de excentricidad mixta, para distintos niveles de carga (autoría propia) 93

Figura 4.10. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 0% de carga (autoría propia) 96

Figura 4.11. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 50% de carga (autoría propia) 97

Figura 4.12. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 78.6% de carga (autoría propia) 98

Figura 4.13. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 100% de carga (autoría propia) 99

Figura 4.14. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 0% de carga (autoría propia) 101

Figura 4.15. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 50% de carga (autoría propia) 101

Figura 4.16. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 78.6% de carga (autoría propia) _____ 102

Figura 4.17. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 100% de carga (autoría propia)_____ 103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial (autoría propia) _____ 40

Tabla 3.1. Matriz de pruebas para la generación de la base de datos mediante simulaciones MEF en Ansys Maxwell (autoría propia)_____ 45

Tabla 3.2. Características del motor de inducción (autoría propia)_____ 46

Tabla 3.3. Parámetros principales empleados para la construcción del estator del modelo bidimensional del motor de inducción (autoría propia) _____ 50

Tabla 3.4. Parámetros principales empleados para la construcción del rotor del modelo bidimensional del motor de inducción (autoría propia) _____ 52

Tabla 3.5. Parámetros utilizados para la configuración del movimiento del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia) _____ 61

Tabla 3.6. Parámetros utilizados para la configuración del límite de potencial vectorial del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia) _____ 62

Tabla 3.7. Parámetros utilizados para la configuración de las fases A, B y C del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia) _____ 69

Tabla 3.8. Parámetros utilizados para la configuración de la conexión final del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia) _____ 72

Tabla 3.9. Parámetros utilizados para el mallado y configuración de solución del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia) _____ 75

Tabla 4.1. Resultados comparativos entre frecuencias de la señal de simulación y pruebas experimentales con excentricidad mixta (autoría propia)_____ 99

1 INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos son máquinas electromecánicas encargadas de transformar energía eléctrica en energía mecánica, por lo que constituyen elementos de suma importancia en una amplia variedad de procesos industriales, comerciales, de transporte, entre otros. Dentro de estos sistemas, los motores de inducción destacan, debido a su robustez, bajo costo y facilidad de mantenimiento, además de su alta confiabilidad, características que han favorecido su uso en aplicaciones finales como bombas, ventiladores, compresores, bandas transportadoras, molinos, prensas, entre otras (Bouzida et al., 2017; Gyftakis et al., 2021). Debido a su amplia presencia en la industria, el estudio de su comportamiento bajo distintas condiciones de operación resulta relevante, ya que una falla no detectada puede ocasionar una disminución de eficiencia, incremento en el consumo energético, paros no programados y pérdidas económicas (Gangsar & Tiwari, 2020; Lee et al., 2020; Polat et al., 2015).

A pesar de su robustez, los motores de inducción pueden presentar fallas de origen eléctrico y mecánico. Las fallas eléctricas se relacionan principalmente con daños en el aislamiento, devanados del estator, barras del rotor, anillos terminales o condiciones anormales de alimentación; mientras que las fallas mecánicas se asocian con daños en los rodamientos, desalineación, desbalance y excentricidad (Gangsar & Tiwari, 2020; Henao et al., 2014; Singh et al., 2016a). Entre estas, la excentricidad es una falla de interés debido a que modifica la uniformidad del entrehierro entre el estator y el rotor, alterando la distribución del campo magnético dentro de la máquina (Petryna et al., 2021; Salah et al., 2017). Esta condición puede originarse por defectos de fabricación, montaje inadecuado de rodamientos, desalineación entre el eje del rotor y el eje de la carga, desgaste en los rodamientos o deformaciones mecánicas durante la operación del motor (Salah et al., 2017; Yang et al., 2014).

La falla de excentricidad puede clasificarse como estática, dinámica o mixta. En la excentricidad estática, el eje del motor se desplaza del eje del estator, pero el rotor sigue girando sobre su eje; en la excentricidad dinámica el eje del rotor gira alrededor del eje del estator, cambiando la distancia entre ambos durante la rotación; y en la excentricidad mixta se presenta una combinación de ambas condiciones (Petryna et al., 2021; Salah et al., 2017).

En aplicaciones reales, la excentricidad estática y dinámica no siempre aparecen de manera aislada, sino que aparecen de manera conjunta en una excentricidad mixta (Alimardani et al., 2025). La falla de excentricidad puede generar fuerzas electromagnéticas asimétricas (UMP, Unbalanced Magnetic Pull), además de vibraciones, incremento de temperatura, desgaste acelerado de rodamientos, esfuerzos adicionales sobre el eje y posibles afectaciones al aislamiento del motor (Salah et al., 2017; Yang et al., 2014).

Una de las técnicas más utilizadas para el diagnóstico de fallas en motores de inducción es en Análisis de Firma de Corriente del Motor, debido a que permite evaluar el estado de la máquina mediante la corriente del estator sin intervenir directamente sus componentes internos (Gangsar & Tiwari, 2020; Henao et al., 2014; Thomson & Culbert, 2017). Esta técnica se basa en que las fallas mecánicas y eléctricas producen modulaciones en el campo magnético, las cuales se reflejan como componentes características en el espectro de la corriente. Para obtener dicha representación frecuencial, la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform), permite convertir las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, facilitando la identificación de armónicos o bandas laterales asociadas a condiciones de falla (Cooley & Tukey, 1965; James, 2011; Oppenheim et al., 1999).

En el caso de la falla de excentricidad, las componentes frecuenciales relacionadas con la rotación del rotor pueden aparecer alrededor de la frecuencia de alimentación del motor, en $f_s \pm f_r$ (Petryna et al., 2021; Salah et al., 2017; Thomson & Culbert, 2017). No obstante, la interpretación de estas componentes no siempre es directa, ya que su amplitud puede verse modificada por factores como el nivel de carga, la velocidad de operación, las asimetrías propias del motor y las condiciones del sistema real (Blodt et al., 2006; Thomson & Culbert, 2017). Esto puede ocasionar que una componente asociada a falla se amplifique, disminuya o incluso sea enmascarada, aumentando la posibilidad de falsos diagnósticos.

En este contexto, el Método de Elementos Finitos (MEF) representa una herramienta útil para estudiar el comportamiento electromagnético de los motores de inducción bajo condiciones controladas. Mediante este método es posible resolver numéricamente las ecuaciones que describen el campo electromagnético de la máquina, considerando la

geometría, materiales, condiciones de frontera, excitaciones eléctricas y movimiento del rotor (Jin, 2014; Liang et al., 2020; Meunier, 2008; Pyrhönen et al., 2014). Además, el uso de software especializado como Ansys Maxwell permite obtener señales de corriente, distribución de flujo magnético y otras variables de interés, las cuales pueden ser posteriormente analizadas mediante técnicas de procesamiento digital de señales.

Por lo anterior, en el presente trabajo se desarrolla un modelo bidimensional de un motor de inducción mediante técnicas numéricas computacionales, con el propósito de analizar el comportamiento de la corriente del estator en estado sano y bajo condición de excentricidad mixta. A partir de las simulaciones realizadas en Ansys Mxwell, se obtienen señales de corriente en el dominio del tiempo para distintos niveles de carga y evaluar la influencia de la carga en el comportamiento del motor, las cuales son procesadas mediante FFT para identificar las componentes frecuenciales asociadas a la falla. Además, los resultados obtenidos mediante simulación son comparados con señales experimentales del mismo motor, con el objetivo de evaluar la similitud entre el modelo numérico y el comportamiento real del sistema. De esta manera, el trabajo busca contribuir al desarrollo de herramientas de diagnóstico para fallas de excentricidad en motores de inducción y al análisis del efecto de la carga sobre las componentes frecuenciales de falla.

1.1 ANTECEDENTES

Para abordar los trabajos asociados con la implementación de técnicas numéricas computacionales en fallas de motores eléctricos se estudian diversos trabajos y metodologías afines. Por ejemplo, Bouzida et al. (2017), presentaron un estudio sobre el diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción utilizando simulación mediante técnicas numéricas computacionales y pruebas experimentales. Los autores utilizaron el análisis de firma de corriente del motor (MCSA, Motor Current Signature Analysis) a través de la densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density) para monitorear las componentes de baja frecuencia relacionados con fallas del rotor. Las pruebas experimentales mostraron las dificultades para detectar excentricidad dinámica bajo diversas condiciones de carga, ya que la representación espectral reveló la existencia de componentes de baja frecuencia para el caso saludable que se superponían con los componentes indicadores.

Además, Polat et al. (2015), implementaron un modelo de un motor de inducción de jaula de ardilla bajo diversos tipos y grados de excentricidad. Investigaron los efectos de la excentricidad sobre la densidad de flujo del entrehierro del motor a través de simulación con técnicas numéricas computacionales y resultados experimentales. Los autores encontraron que la excentricidad condujo a la distorsión de la densidad de flujo del entrehierro, en cuanto más grave fue la falla de excentricidad, el rendimiento del motor se vio severamente afectado. Por otro lado, Yang et al. (2014), desarrollaron una metodología de detección de fallas de barras rotas en motores de inducción que habían sido diagnosticados erróneamente con el análisis de espectro de estado estacionario del fallo; su metodología se basó en el análisis de componentes espaciales de la corriente del motor, que pueden verse afectados por la asimetría magnética inducida por los conductos de aire. Sus resultados mostraron que la metodología propuesta puede detectar de manera confiable una falla de barras rotas, incluso cuando los efectos de los conductos de aire axiales están presentes, diferenciando entre fallas reales en el rotor por barras rotas y los efectos de los conductos de aire.

Por su parte, Antonino-Daviu et al. (2015), desarrollaron una metodología mediante el análisis del espectro de Corriente de Secuencia Cero (ZSC, Zero Sequence Current) para detectar barras rotas en motores de inducción incluso cuando estas no son adyacentes; los

autores encontraron que las amplitudes de banda lateral en la respuesta en frecuencia de la corriente pueden disminuir para algunos casos de dos barras rotas no adyacentes en comparación con su amplitud cuando solo se rompe una, lo cual puede conducir a falsos negativos cuando se hace el diagnóstico de la falla una vez producidas las roturas no adyacentes. Los autores concluyeron que una componente de falla en específico del espectro ZSC muestra un excelente comportamiento para realizar el análisis de barra rota no adyacente en los que el método MCSA no es capaz de realizar. Adicionalmente, Gyftakis et al. (2021), desarrollaron una metodología para analizar el espectro de ZSC de un motor de inducción en estado transitorio durante el arranque del mismo. Para ello, demostraron a través de simulaciones del Método de Elementos Finitos (MEF) y pruebas experimentales que su método es inmune a las asimetrías inherentes del rotor, además, las frecuencias relacionadas con la falla de barras rotas de rotor presentaron amplitudes mucho más altas que las de una sola corriente, reduciendo así la probabilidad de realizar un falso diagnóstico.

En estudios recientes, el MEF, se ha utilizado como una herramienta para analizar distintas fallas en motores de inducción, debido a que permite representar con mayor detalle el comportamiento electromagnético de la máquina bajo condiciones de falla. Por su parte, Sri Ram Prasad & Singh (2022), desarrollaron un análisis por el MEF para estudiar la falla de barras rotas en el rotor de un motor de inducción polifásico, con el propósito de identificar los efectos de esta condición en el comportamiento de la máquina. De manera similar, Dhakal et al. (2023), propusieron un modelo de falla en rodamientos de un motor de inducción mediante el MEF, empleando una co-simulación en Ansys Maxwell y Simplorer para evaluar el impacto de dicha falla sobre los parámetros del motor. Por otra parte, Gaber et al. (2025), propusieron un esquema de co-simulación basado en Ansys Maxwell, Ansys Simplorer y Matlab/Simulink para analizar fallas de excentricidad estática en motores de inducción, considerando diferentes grados de severidad de falla.

Además, Thomson & Culbert (2017), expusieron un fenómeno interesante detectado en la respuesta en frecuencia de la corriente del motor, previamente descrito por Williamson y Smith. Los autores analizaron la variación de la amplitud de la componente frecuencial de falla asociada a barras rotas en un motor de inducción, considerando diferentes condiciones de carga y velocidad. Los resultados mostraron que la amplitud de corriente de la componente

de la falla no es constante, sino que varía con la carga y con la velocidad del motor, lo que podría llevar a un falso diagnóstico, dando por hecho que la falla puede ser muy severa o llegar a un falso negativo. A partir de la revisión del estado del arte, se determinó que las metodologías existentes se centran en la falla de barras rotas de rotor, dando acceso a la necesidad de estudiar las fallas de excentricidad en los motores de inducción y a la relación entre la carga del motor y el comportamiento de las componentes frecuenciales de falla. A partir de esta revisión, también se encontró que los autores mencionados han propuesto modelos realizados mediante técnicas numéricas computacionales para dar sustento a los resultados experimentales en fallas por barras rotas de rotor, y cómo es que contribuyen para evitar falsos diagnósticos de fallas.

En la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), se han publicado diversos trabajos de tesis, los cuales, han tenido como objetivo desarrollar distintas metodologías para el diagnóstico en fallas de motores. Por ejemplo, Zamudio Ramirez (2023), desarrolló una metodología que genera un diagnóstico automático de fallas en motores de inducción bajo diversas condiciones de operación mediante el análisis de flujo magnético de dispersión para determinar fallas en motores de inducción como barras rotas y asimetrías del rotor. Por su parte, Pacheco Guerrero (2023), implementó una metodología que detecta fallas de desbalance y desalineamiento en motores de inducción usando la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) para obtener el espectro de frecuencias sobre la señal de corriente. Además, Cureño Osornio (2023), desarrolló una metodología para diagnosticar fallos en rodamientos mediante señales de corriente eléctrica y flujo magnético y su cálculo de indicadores estadísticos, así como la implementación y uso de un algoritmo genético, Análisis Discriminatorio Lineal (LDA, Linear Discriminant Analysis) y redes neuronales. Estos trabajos de tesis se centran en el diagnostico de fallas distintas a la falla de excentricidad, siendo las fallas en rodamientos la más común. Adicionalmente, Resendiz-Ochoa et al. (2024), propusieron una metodología basada en termografía infrarroja y un clasificador basado en inteligencia artificial para detectar distintas condiciones del motor de inducción: sano, fallas en rodamientos, barras rotas, desalineación y desgaste de engranajes en la caja de cambios. Nuevamente, la falla de excentricidad está ausente dentro de su análisis.

A nivel local, se han propuesto metodologías prometedoras para el diagnóstico y monitoreo de fallas en motores; sin embargo, estos trabajos han basado su análisis y metodología en pruebas experimentales en motores bajo ambientes controlados, por lo tanto, se identificó la necesidad de dar un sustento a las metodologías basadas en resultados experimentales que se han desarrollado para reducir el porcentaje de falsos diagnósticos en fallas de motores. Adicionalmente, se detectó la necesidad de estudiar la falla de excentricidad, ya que, de acuerdo con Liang et al. (2020), aproximadamente el 80% de las fallas mecánicas pueden provocar excentricidad en el motor de inducción, lo cual representa un alto porcentaje de incidencia.

Los trabajos revisados en esta sección demuestran que la falla por excentricidad en motores de inducción puede ser analizada mediante técnicas numéricas computacionales. Se encontró que cuando un motor opera con excentricidad y se somete a fluctuaciones de carga, la severidad de la falla tiende a incrementarse. No obstante, los estudios encontrados no abordan de manera específica la componente de falla asociada a la excentricidad ni su evolución frente a distintos niveles de carga. En cambio, la mayoría de los trabajos se enfocan en fallas por barras rotas bajo condiciones variables, analizando cómo cambia la frecuencia característica correspondiente. Además, se identificaron investigaciones que advierten que ciertos fenómenos no relacionados con fallas pueden generar patrones espectrales similares, lo cual puede inducir a falsos diagnósticos al enmascarar la presencia real de una falla.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los motores de inducción son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y representan aproximadamente el 60% del consumo de electricidad en el sector industrial. Su uso abarca fábricas, sistemas de producción, compresores de aire, ventiladores, bombas, grúas, la industria textil y vehicular, así como sistemas de generación eólica, entre otros (Hannan et al., 2018).

La fiabilidad y disponibilidad de estos sistemas son aspectos importantes para garantizar un funcionamiento continuo y eficiente en entornos industriales. No obstante, los motores de inducción están expuestos a múltiples factores de estrés inevitables, tales como

tensiones mecánicas, eléctricas, térmicas y ambientales, que pueden deberse a variaciones en la carga, fluctuaciones en el suministro eléctrico, sobrecalentamiento, lubricación deficiente, defectos en el sellado, presencia de polvo, fallos de fabricación y envejecimiento natural, entre otros. Estas condiciones pueden generar fallas inesperadas en distintos componentes del motor, y en muchas ocasiones no son detectadas en sus etapas iniciales, lo que puede derivar en averías catastróficas. Como consecuencia, la industria enfrenta considerables pérdidas económicas debido a la interrupción de los procesos productivos e, incluso, en algunos casos, pueden presentarse riesgos graves para la seguridad del personal (Gangsar & Tiwari, 2020).

Cuando un motor de inducción falla, su eficiencia disminuye, lo que genera un mayor consumo de energía y costos de operación adicionales (M. Garcia et al., 2019). En particular, la excentricidad estática y la excentricidad dinámica son fallos que pueden presentar los motores de inducción, la primera provoca fuerzas de tensión magnética desequilibradas con componentes radiales y tangenciales, mientras que la segunda puede ocasionar dislocación, daño o desgaste de los rodamientos, aumento del tiempo de arranque del motor, vibraciones del orden de los kHz transmitidas al estator (lo que puede causar daños mecánicos en el aislamiento), tensiones inducidas en los extremos del eje que reducen la vida útil del rodamiento, posible fricción del rotor con el estator, formación de chispas, daños en las láminas del núcleo y disminución de la eficiencia, entre otros efectos adversos. Cabe destacar que la excentricidad estática es la principal causa de la excentricidad dinámica, y ambos fenómenos pueden presentarse simultáneamente, dando lugar a una excentricidad mixta (Petryna et al., 2021). En la literatura, se destaca el hecho de que en la vida real, la excentricidad estática y dinámica no se presentan de manera aislada, sino que de manera conjunta en una excentricidad mixta (Alimardani et al., 2025).

Los estudios revisados en la sección de antecedentes centran sus análisis en la falla de barras rotas en los motores de inducción, ya que se ha observado que diversos fenómenos mecánicos, eléctricos, térmicos, entre otros, pueden generar una respuesta en frecuencia de las distintas señales analizadas, que son similares a las asociadas a la falla de barras rotas. No obstante, no se han encontrado investigaciones que aborden los efectos de la carga en las fallas por excentricidad mixta y cómo esta carga podría influir en las frecuencias asociadas a

la falla. Cabe resaltar que estas metodologías evidencian que muchos métodos de diagnóstico de fallas en motores de inducción pueden presentar limitaciones ya que existen casos en los que el error está oculto en las señales de fallo o bien, existen muchas condiciones en donde se generan frecuencias similares a las del fallo, llevando a dar falsos diagnósticos. En este sentido, para validar estas metodologías se requieren modelos capaces de predecir el desempeño del motor y de detectar las firmas características de fallos específicos (Singh et al., 2016b).

Por otro lado, se destaca que los modelos mediante técnicas numéricas computacionales permiten establecer una relación directa entre la operación del motor de inducción y su degradación ante la presencia de fallas. Sin embargo, a menudo resultan demasiado complejos y requieren un mayor número de variables a analizar, lo que dificulta su implementación (Lee et al., 2020). Como consecuencia, existe una notable escasez de modelos basados en técnicas numéricas computacionales que describan el comportamiento del motor de inducción bajo distintos niveles de carga en presencia de fallas por excentricidad mixta. Esta limitación representa un desafío en el presente trabajo de tesis. Además, otro obstáculo importante es el acceso y manejo del software. La mayoría de las herramientas disponibles para modelado electromagnético mediante técnicas numéricas computacionales son de pago, y aquellas que ofrecen versiones estudiantiles suelen restringir funcionalidades esenciales para el análisis detallado.

A modo de resumen, los motores de inducción, ampliamente utilizados en la industria están expuestos a múltiples factores de estrés que pueden generar fallas no detectadas en etapas tempranas. Entre ellas, la excentricidad representa una condición particularmente dañina y compleja de diagnosticar. La mayoría de los estudios se han centrado en fallas por barras rotas, dejando un vacío importante en el análisis del comportamiento de la excentricidad mixta bajo diferentes niveles de carga. Además, fenómenos externos pueden generar firmas espectrales similares a las de fallas reales, lo que conduce a diagnósticos erróneos. Aunque las técnicas numéricas computacionales ofrecen un enfoque prometedor para estudiar estos fenómenos, su complejidad y alto costo computacional dificultan su adopción, generando una escasez de modelos precisos y accesibles para el estudio de la excentricidad mixta en condiciones variables de carga. Esta problemática representa un

desafío abordado en el presente trabajo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, los motores de inducción constituyen uno de los dispositivos electromecánicos más utilizados en el sector industrial debido a su bajo costo, alta confiabilidad y reducido mantenimiento, siendo empleados en aplicaciones como sistemas de bombeo, compresión, metalurgia, manufactura y transporte, entre otras (Konuhova, 2025). Debido a su amplia presencia en procesos industriales, la detección temprana de fallas en este tipo de máquinas eléctricas ha adquirido gran relevancia durante las últimas décadas, ya que permite reducir costos asociados al mantenimiento correctivo, evitar paros no programados y disminuir pérdidas económicas derivadas de interrupciones en los procesos productivos (Henao et al., 2014). Dentro de las fallas más comunes en motores de inducción se encuentra la excentricidad, la cual altera la distribución del campo magnético en el entrehierro y afecta directamente el comportamiento electromagnético del motor, generando modificaciones en las componentes frecuenciales de la señal de corriente (Zaabi et al., 2014).

En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo de un modelo basado en técnicas numéricas computacionales para caracterizar la falla de excentricidad en motores de inducción y evaluar su impacto en la respuesta en frecuencia de la señal de corriente bajo distintas condiciones de carga (Singh et al., 2016). El desarrollo de este modelo permitirá analizar con mayor precisión los efectos electromagnéticos asociados a dicha falla y contribuirá a la validación y mejora de las metodologías de diagnóstico existentes, favoreciendo una detección temprana, buscando reducir el porcentaje de falsos diagnósticos en sistemas industriales (Henao et al., 2014).

El impacto científico de esta investigación radica en el desarrollo de un modelo capaz de representar el comportamiento electromagnético del motor de inducción ante la presencia de fallas de excentricidad mediante el análisis de los armónicos de la señal de corriente. Actualmente, gran parte de las investigaciones relacionadas con el diagnóstico de fallas en motores de inducción se enfocan principalmente en estudios experimentales, existiendo una limitada cantidad de trabajos orientados al modelado computacional de este fenómeno desde

la perspectiva de la respuesta en frecuencia (Singh et al., 2016). Por ello, este trabajo contribuirá al fortalecimiento del estado del arte científico en el área de modelado electromagnético aplicado al diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas. Asimismo, los resultados obtenidos servirán como base para futuras investigaciones y favorecerán la generación de nuevas líneas de investigación relacionadas con el análisis numérico y el diagnóstico de fallas en motores de inducción.

El impacto tecnológico de este proyecto consiste en el desarrollo de un modelo computacional que permita caracterizar la falla de excentricidad sin la necesidad de realizar pruebas destructivas en motores reales, lo que representa una reducción significativa en costos y tiempo de investigación. Además, el modelo desarrollado proporcionará una herramienta con mayor confiabilidad para el análisis y diagnóstico de fallas en motores de inducción, facilitando la comprensión del comportamiento electromagnético del motor y contribuyendo al desarrollo de metodologías más robustas para el monitoreo de condición y mantenimiento predictivo (Zaabi et al., 2014).

Por otra parte, el impacto social de esta investigación se relaciona con la optimización energética y la mejora en la confiabilidad operativa de los motores de inducción utilizados en diversos sectores estratégicos. La detección temprana de fallas de excentricidad permitirá evitar pérdidas de eficiencia energética ocasionadas por el deterioro progresivo del motor, contribuyendo así a la reducción del consumo energético y de los costos operativos en procesos industriales (Henao et al., 2014). De igual manera, este trabajo favorecerá la continuidad de operación en sistemas productivos, minimizando riesgos asociados a fallas inesperadas y promoviendo un uso más eficiente y sostenible de la energía eléctrica.

Asimismo, este trabajo de investigación responde a las necesidades establecidas por los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) impulsados por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), particularmente en el área relacionada con energía y cambio climático (SECIHTI, 2026). De manera específica, el presente trabajo se vincula con el objetivo 3 de energía que plantea “promover un cambio radical de paradigma energético, con cambios profundos en la producción industrial”, sustentado en que los motores de inducción representan hasta un 60% de consumo de energía en la industria a nivel global de acuerdo con (Hannan et al., 2018), además, en el estado del

arte se ha descrito que cuando un motor de inducción falla, su eficiencia disminuye e incrementa su consumo energético (Ferreira et al., 2015; M. Garcia et al., 2019; Riera-Guasp et al., 2015; Singh et al., 2016), por lo que el diagnóstico oportuno de fallas en motores eléctricos y el uso de modelos con técnicas numéricas computacionales representa un avance para cubrir objetivos importantes dentro de las necesidades impulsadas por SECIHTI.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar la falla de excentricidad en un motor de inducción en régimen estable para determinar los efectos de la variación de la carga del motor sobre la frecuencia de falla mediante técnicas numéricas computacionales a través de un análisis de los armónicos de rotación del espectro de Fourier de la corriente del motor.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar un modelo numérico simplificado de un motor de inducción a partir de su geometría y sus especificaciones técnicas numéricas computacionales para poder analizar su comportamiento electromagnético bajo diferentes condiciones de operación.
- Obtener el comportamiento electromagnético del motor a partir del modelo simplificado en estado sano y con falla de excentricidad considerando al menos cuatro niveles de carga mediante herramientas numéricas computacionales.
- Obtener la señal de la corriente en el dominio del tiempo a partir del análisis del modelo numérico del motor para obtener la frecuencia asociada a las condiciones de estado sano y de falla de excentricidad con distintos niveles de carga.
- Determinar la respuesta en frecuencia de la señal de corriente obtenida numéricamente mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

- Identificar las componentes frecuenciales asociadas a la falla de excentricidad y caracterizar su comportamiento espectral bajo diferentes condiciones de carga.
- Validar el modelo numérico del motor mediante experimentación en un banco de pruebas de un motor de inducción bajo condiciones controladas, comparando la respuesta en frecuencia obtenida experimentalmente contra la obtenida en el análisis numérico con los mismos niveles de carga para evaluar la precisión del modelo.

1.5 HIPÓTESIS

Mediante técnicas numéricas computacionales es posible determinar los efectos de una falla por excentricidad bajo distintos niveles de carga en un motor de inducción sobre la respuesta en frecuencia de su señal de corriente asociada a la falla, en donde la similitud de la respuesta en frecuencia obtenida con el modelo numérico y aquellos obtenidos con las pruebas experimentales sea de alrededor del 80%.

1.6 PLANTEAMIENTO GENERAL

Las fallas en motores de inducción pueden originarse por distintos factores eléctricos, mecánicos, de fabricación, entre otros, que afectan el desempeño y la vida útil de la máquina. Entre las fallas más comunes se encuentran los defectos de rodamientos, barras rotas del rotor, fallas de aislamiento, condiciones de excentricidad, entre otras (Nandi et al., 2005). Particularmente, la excentricidad constituye una de las fallas mecánicas que pueden presentarse en los motores de inducción, esta falla provoca una distribución no uniforme del entrehierro entre el rotor y el estator, alterando el comportamiento electromagnético de la máquina e introduciendo componentes armónicas características en las señales de corriente del estator (Thomson & Fenger, 2001). Estas variaciones generan modificaciones en la distribución de flujo magnético, fuerzas electromagnéticas asimétricas y corrientes inducidas irregulares que pueden derivar en vibraciones, calentamiento excesivo y degradación progresiva del motor (Thomson & Fenger, 2001). De acuerdo con la literatura, las condiciones de excentricidad estática y dinámica no se presentan de forma aislada en

aplicaciones reales, sino que normalmente coexisten como una condición de excentricidad mixta (Alimardani et al., 2025).

Para analizar esta falla, la simulación mediante MEF, específicamente con el software ANSYS Maxwell, representa una herramienta eficaz para evaluar el comportamiento electromagnético del motor de inducción bajo distintas condiciones de operación y falla (Zienkiewicz et al., 2005).

Mediante esta técnica es posible obtener la distribución del flujo magnético, las corrientes inducidas y las señales eléctricas y mecánicas generadas por la máquina a partir de la solución numérica de las ecuaciones de Maxwell (Ida & Bastos, 1997). Sin embargo, el análisis mediante MEF no es la única herramienta que se emplea durante el desarrollo del presente trabajo, ya que también se implementan técnicas de procesamiento digital de señales para analizar la respuesta en frecuencia de las corrientes del estator, ambas herramientas son utilizadas de manera complementaria.

En una primera etapa se consideran las dimensiones geométricas y parámetros tanto eléctricos como mecánicos de un motor de inducción tipo jaula de ardilla para desarrollar un modelo bidimensional en ANSYS Maxwell. Posteriormente, se asignan las propiedades electromagnéticas de los materiales, condiciones de frontera, excitaciones eléctricas y parámetros de funcionamiento del motor, como la configuración del movimiento del rotor, la asignación del vector potencial, la asignación de las fases del motor, entre otras. Una vez validado el comportamiento del modelo en condición sana, se implementa una condición de falla por excentricidad mixta mediante desplazamientos geométricos controlados, del rotor y el estator dentro del mismo plano de simulación. A partir de las simulaciones transitorias realizadas, se obtienen las señales de corriente del estator en el dominio del tiempo, las cuales, posteriormente son procesadas mediante FFT con el propósito de identificar componentes armónicas asociadas a la condición de falla estudiada.

Finalmente, los resultados que se obtienen mediante simulación computacional son comparados con señales del espectro de la corriente experimentales adquiridas en un banco de pruebas de motores de inducción, con el objetivo de validar el comportamiento del modelo electromagnético desarrollado. Entre las principales limitaciones de la investigación

se encuentra el empleo de un modelo bidimensional, el cual requiere simplificaciones geométricas para representar ciertos fenómenos físicos presentes en la máquina real, como los anillos de corto circuito del rotor. Además, el proceso de simulación transitoria mediante MEF demanda tiempos computacionales elevados debido al refinamiento adaptativo de malla y cálculo iterativo de las variables electromagnéticas durante cada paso temporal.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y TECNOLÓGICA

En esta sección se abordan diversos conceptos teóricos y tecnológicos necesarios para el desarrollo de la presente investigación. Se incluyen temas relacionados con los motores eléctricos de inducción, sus principales componentes y las fallas que pueden presentarse durante su operación, particularmente la falla de excentricidad. Asimismo, se describen los fundamentos del MEF aplicado al análisis electromagnético de máquina eléctricas, así como las ecuaciones de Maxwell que gobiernan el comportamiento de los campos electromagnéticos dentro del motor.

De igual manera, se presentan conceptos relacionados con el procesamiento digital de señales, específicamente la FFT, utilizada para analizar las señales de corriente en el dominio de la frecuencia e identificar componentes armónicas asociadas a las condiciones de falla. Debido al carácter multidisciplinario de esta investigación, se integran conocimientos de electromagnetismo, máquinas eléctricas y análisis de señales, con el propósito de estudiar y caracterizar el comportamiento de un motor de inducción bajo condiciones de excentricidad mixta mediante simulaciones numéricas y datos experimentales.

2.1 MOTOR ELÉCTRICO

Los motores eléctricos son máquinas capaces de transformar la energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos eléctricos y magnéticos. Su principio de operación se basa en los fenómenos electromagnéticos que permiten generar movimiento rotatorio a partir de una fuente de alimentación eléctrica. Debido a esta capacidad de conversión energética, los motores eléctricos se han convertido en elementos sumamente utilizados en aplicaciones industriales, comerciales, domésticas y de transporte, ya que permiten accionar bombas, ventiladores, compresores, bandas transportadoras, elevadores, molinos, prensas, mezcladoras y una amplia variedad de sistemas electromecánicos (Dinolova et al., 2023; Ferreira & de Almeida, 2016; Goman et al., 2019; Liang & Ilochonwu, 2011).

En la actualidad, se ha reportado que los sistemas accionados por motores eléctricos representan aproximadamente entre el 40% y el 50% del consumo total de electricidad a nivel global (Liu et al., 2021). Esta proporción evidencia que la eficiencia y confiablidad de estas máquinas tienen un impacto significativo en el consumo de energía, los costos de operación y la continuidad de los procesos productivos (Dinolova et al., 2023; Ferreira & de Almeida, 2016).

En aplicaciones industriales, los motores eléctricos se seleccionan de acuerdo con parámetros como potencia nominal, tipo de alimentación, velocidad de operación, torque requerido, eficiencia, costo y mantenimiento (Kinoti et al., 2024; Rivera et al., 2018). En este tipo de aplicaciones se prefieren máquinas robustas, confiables y capaces de operar durante largos periodos bajo condiciones variables de carga (Dinolova et al., 2023; Goman et al., 2019). Sin embargo, durante su operación pueden estar sometidas a esfuerzos mecánicos, eléctricos, térmicos y ambientales que afectan su desempeño y vida útil (Garcia-Calva et al., 2022; Rivera et al., 2018).

Cuando un motor eléctrico presenta una falla, puede disminuir su eficiencia, incrementar su temperatura de operación, aumentar el consumo energético y generar vibraciones o ruidos anormales, entre otros escenarios (Garcia-Calva et al., 2022; Hamani et al., 2025). Además, una falla no detectada oportunamente puede provocar interrupciones no programadas en los procesos industriales, así como costos asociados al mantenimiento correctivo y a la pérdida de producción (J. Garcia et al., 2025; Hamani et al., 2025).

2.1.1 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios, como el tipo de alimentación, principio de funcionamiento, construcción del rotor, número de fases, potencia nominal o aplicación específica. Una de las clasificaciones más comunes se basa en el tipo de corriente eléctrica utilizada para su alimentación, por lo que se distinguen principalmente motores de corriente directa (CD) y motores de corriente alterna

(CA). Esta clasificación permite diferenciar su construcción, comportamiento operativo, formas de control y aplicaciones principales (Chapman, 2012; Krishnan, 2001; Sen, 1997).

Los motores CD se caracterizan por operar mediante alimentación en corriente continua y por permitir un control preciso de velocidad y par (Sen, 1997). En este tipo de motores, el rotor recibe energía eléctrica directamente mediante escobillas y un conmutador mecánico (Krishnan, 2001). Entre los motores CD más comunes se encuentran los motores serie, derivación (shunt), compuestos y los motores brushless (Chapman, 2012; Sen, 1997). Los motores serie presentan un alto par de arranque, razón por la cual son utilizados en aplicaciones que requieren grandes esfuerzos iniciales (Hughes, 2006). Por otro lado, los motores shunt ofrecen mejor regulación de velocidad, mientras que los motores compuestos combinan características de ambos (Sen, 1997). Los motores brushless destacan por eliminar el uso de escobillas mecánicas, reduciendo las pérdidas por fricción y necesidades de mantenimiento (Bose, 2002).

Por otra parte, los motores eléctricos CA funcionan mediante una fuente de alimentación alterna y representan el tipo de motor más utilizado en aplicaciones industriales debido a la disponibilidad de redes eléctricas monofásicas y trifásicas, así como a su robustez y facilidad de operación (Hughes, 2006), dentro de los cuales destacan principalmente los motores síncronos y los motores de inducción (Pyrhönen et al., 2014).

Los motores síncronos se caracterizan porque el rotor gira exactamente a la misma velocidad que el campo magnético giratorio generado por el estator (Krause et al., 2013). Este tipo de motor es utilizado en aplicaciones donde se requiere velocidad constante y alta precisión de sincronización (Boldea & Nasar, 2017). Por otro lado, los motores de inducción, también conocidos como motores asíncronos, funcionan mediante inducción electromagnética entre el estator y el rotor (Sen, 1997). En este tipo de motores, el rotor no recibe alimentación eléctrica directa, sino que las corrientes son inducidas debido al campo magnético giratorio generado por el estator (Ida & Bastos, 1997). Los motores de inducción más comunes son los motores de jaula de ardilla, debido a su bajo costo, facilidad de fabricación, robustez y reducido costo de mantenimiento (Boldea & Nasar, 2017; Thomson & Fenger, 2001).

Asimismo, existen motores eléctricos diseñados para aplicaciones específicas, como los motores paso a paso, los motores de reluctancia o los servomotores (Rashid, 2001). Los motores paso a paso convierten impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, por lo que son utilizados en sistemas de posicionamiento y automatización. Los motores de reluctancia producen movimiento debido a las variaciones en la reluctancia magnética del circuito electromagnético, mientras que los servomotores permiten un control preciso de posición, velocidad y aceleración (Bose, 2002; Rashid, 2001).

2.1.2 MOTORES DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción son máquinas eléctricas de corriente alterna ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales ya que poseen una alta robustez mecánica, bajo costo de mantenimiento y elevada confiabilidad operativa (Chapman, 2012; Hughes, 2006). Estas máquinas pertenecen al grupo de motores asíncronos, ya que la velocidad de rotación del rotor no es igual a la velocidad del campo magnético giratorio generado por el estator (Fitzgerald et al., 2003). Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de inducción electromagnética descrito por Faraday, mediante el cual las corrientes eléctricas son inducidas en el rotor debido a la variación del campo magnético producido por el estator (Krause et al., 2013).

A pesar de que los motores de inducción son máquinas sumamente robustas y confiables, no están exentos a fallas. Durante su operación pueden estar sometidos a esfuerzos mecánicos, eléctricos, térmicos, ambientales, entre otros, que favorecen la aparición de defectos en sus componentes (Garcia-Calva et al., 2022; Issa et al., 2024). Cuando una falla se presenta, pueden observase efectos como la pérdida de eficiencia, incremento de la temperatura, vibraciones, sobrecorrientes, ruido electromagnético, reducción de torque, degradación acelerada de rodamientos o devanados, entre otras consecuencias (Araújo et al., 2024; Garcia-Calva et al., 2022; Hamani et al., 2025; Issa et al., 2024).

En la Figura 2.1 se muestran las partes del motor de inducción y su ubicación dentro

de la máquina, en donde se aprecia la caja de conexiones, la carcasa, el estator, el rotor, el rodamiento, el eje del rotor y las tapas tanto delantera como trasera (Riera-Guasp et al., 2015).

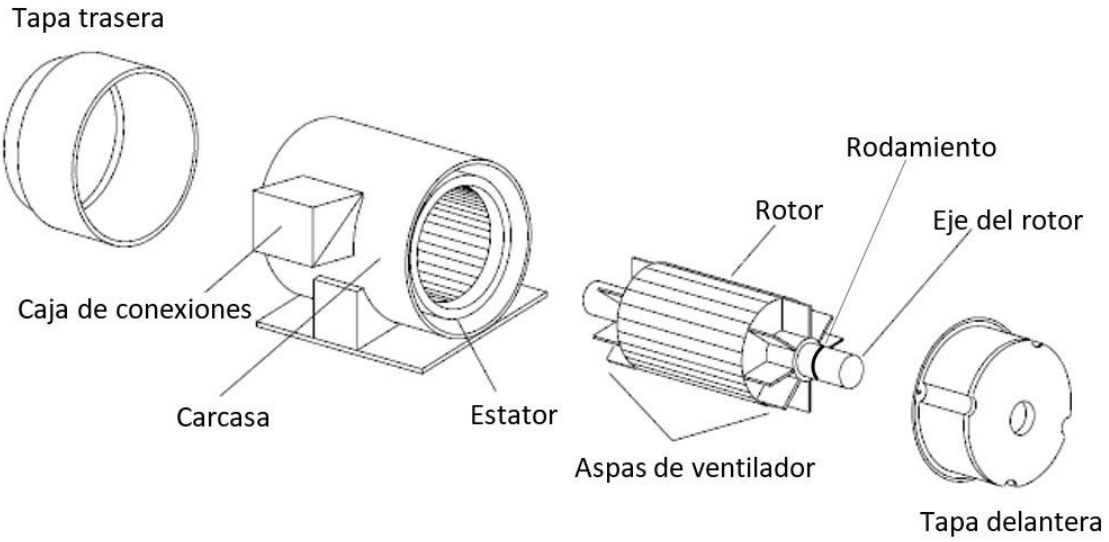


Figura 2.1. Motor de inducción y sus partes (Riera-Guasp et al., 2015)

Los motores de inducción tipo jaula de ardilla son los más utilizados en aplicaciones industriales y se ha reportado que más del 80% de motores eléctricos utilizados en la industria corresponden al motor jaula de ardilla (Hughes, 2006; Okwuosa & Hur, 2022). En este tipo de rotor, las barras conductoras se encuentran alojadas en ranuras y conectadas mediante anillos de cortocircuito en ambos extremos del rotor, formando una estructura similar a una jaula (Ida & Bastos, 1997). Esta configuración elimina la necesidad de escobillas o conexiones eléctricas móviles, reduciendo significativamente el mantenimiento y aumentando la confiabilidad del sistema (Hughes, 2006).

2.2 FALLAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Las fallas en motores de inducción pueden originarse por diversos factores de estrés presentes durante su operación (Nandi et al., 2005). Entre ellos se encuentran sobrecargas, variaciones de carga, fluctuaciones o desbalances en la tensión de alimentación, esfuerzos mecánicos, contaminación, humedad, lubricación deficiente, envejecimiento de materiales y

defectos de fabricación, entre otros, (Garcia-Calva et al., 2022). La acción prolongada de estos factores puede producir degradación progresiva en los componentes del motor y modificar su comportamiento electromecánico, y en casos severos, la salida total de operación de la máquina (Hughes, 2006). Debido a que los motores de inducción son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, la detección y diagnóstico oportuno de fallas son importantes para garantizar la continuidad operativa y reducir costos de mantenimiento (Thomson & Fenger, 2001). Diversos estudios indican que las fallas en motores de inducción pueden clasificarse en fallas de carácter eléctrico y mecánico (Vas, 1992).

2.2.1 FALLAS MECÁNICAS

Las fallas mecánicas corresponden a defectos asociados a los componentes físicos y estructurales del motor de inducción (Nandi et al., 2005). Este tipo de fallas puede producirse debido al desgaste mecánicos, desalineaciones, fatiga de materiales, vibraciones excesivas, condiciones inadecuadas de operación, defectos de fabricación, entre otros (Bellini et al., 2001; Blodt et al., 2006; Nandi et al., 2005).

Entre las fallas mecánicas más comunes se encuentran los defectos en los rodamientos, desbalance de rotor, desalineación de ejes y condiciones de excentricidad representando hasta el 62% del total de las fallas que se presentan en un motor de inducción (Riera-Guasp et al., 2015; Salah et al., 2017). Los rodamientos constituyen uno de los elementos más propensos a fallar, con una representación del 40% del total de las fallas que se presentan en motores de inducción (Riera-Guasp et al., 2015), debido a esfuerzos mecánicos continuos que provocan fracturas y agrietamientos, una lubricación deficiente, contaminación, erosión eléctrica, entre otras causas. Esta falla provoca incrementos de vibración, ruido mecánico e incluso provoca otro tipo de fallas como la excentricidad en el motor (Grupo SKF, 2017; Huang et al., 2022).

Por otro lado, el desbalance mecánico ocurre cuando existe una distribución no uniforme de masa en el rotor, provocando fuerzas centrífugas durante la rotación (Calderon-

Uribe et al., 2023). Asimismo, la desalineación de ejes se produce cuando el eje del motor y el sistema mecánico acoplado no se encuentran correctamente alineados, ocasionando esfuerzos adicionales y vibraciones mecánicas (Pavlović et al., 2024). Es importante destacar, tanto el desbalance mecánico como la desalineación de ejes, puede provocar la falla de excentricidad de acuerdo con (Corne et al., 2017).

Dentro de las fallas mecánicas, la excentricidad representa una condición que modifica la distribución del entrehierro entre el rotor y el estator (Petryna et al., 2021). Esta variación geométrica altera la distribución del flujo magnético dentro de la máquina, generando componentes armónicas características en las señales eléctricas del motor (Terron-Santiago et al., 2022). Debido a ello, la detección de excentricidad en un motor de inducción mediante el análisis espectral de corriente se ha convertido en una técnica utilizada para el monitoreo de la condición en motores de inducción (El Hachemi Benbouzid, 2000).

2.2.2 FALLAS ELÉCTRICAS

Las fallas eléctricas en motores de inducción están asociadas con alteraciones en los devanados del estator, el aislamiento eléctrico, las barras del rotor, los anillos terminales, la alimentación eléctrica y las condiciones de operación que producen esfuerzos eléctricos anormales. Estas fallas pueden originarse por sobrecargas, desbalances de tensión, armónicos, transitorios eléctricos, humedad, contaminación, envejecimiento térmico, defectos de fabricación o deterioro progresivo del aislamiento (Garcia-Calva et al., 2022; Nandi et al., 2005; Siddique et al., 2005). Cuando una falla eléctrica aparece, puede generar sobrecorrientes, puntos calientes, pérdida de eficiencia y degradación acelerada de los componentes eléctricos (M. Garcia et al., 2019; Garcia-Calva et al., 2022).

Algunas de las fallas eléctricas más comunes corresponden a las fallas en el estator, especialmente aquellas relacionadas con el aislamiento de los devanados. Dentro de estas fallas se encuentran cortocircuitos entre espiras y degradación del aislamiento (Garcia-Calva et al., 2022; Siddique et al., 2005). En (Garcia-Calva et al., 2022) se reporta que la ocurrencia de fallas en el estator depende del tamaño y nivel de tensión del motor; en motores de

inducción de alta tensión pueden alcanzar hasta el 65% de ocurrencia, mientras que en motores de baja tensión representan aproximadamente el 9% del total de las fallas. Las fallas eléctricas también pueden presentarse en el rotor, particularmente en las barras de la jaula de ardilla y en los anillos terminales. Las barras rotas pueden ser provocadas por esfuerzos térmicos, mecánicos y eléctricos (Garcia-Calva et al., 2022; Liang et al., 2020).

2.3 FALLA DE EXCENTRICIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN

La falla de excentricidad en motores de inducción se define como una condición en la que el entrehierro entre el rotor y el estator deja de ser uniforme. En condiciones ideales, el rotor debe encontrarse centrado respecto al estator, de manera que la distancia del entrehierro sea constante alrededor de toda la circunferencia. Sin embargo, debido a errores de fabricación, montaje inadecuado, desgaste de rodamientos, desalineación entre el eje del rotor y el eje de la carga, flexión del eje o vibraciones mecánicas, el rotor puede desplazarse de su posición ideal y generar una distribución asimétrica del entrehierro (Petryna et al., 2021; Tian et al., 2018).

Existen tres tipos de excentricidad: estática, dinámica y mixta. La excentricidad estática ocurre cuando la posición del entrehierro permanece fija respecto al estator; en este caso, el centro del rotor coincide con su centro de rotación, pero no coincide con el centro geométrico del estator. La excentricidad dinámica se presenta cuando el centro del rotor no coincide con el centro de rotación, por lo que la posición del entrehierro cambia conforme el rotor gira. Finalmente, la excentricidad mixta corresponde a la combinación de ambas condiciones, por lo que existe la desalineación simultánea entre los ejes involucrados (Petryna et al., 2021; Wang et al., 2022). En la Figura 2.2 se muestra la sección transversal de un motor de inducción con falla de excentricidad a) estática, b) dinámica y c) mixta. Se observa una representación de los tipos de excentricidad, estos se diferencian según la posición relativa de los ejes principales del motor: O_r corresponde al eje de simetría del rotor, O_s está asociado al eje de simetría del estator y O_w representa el eje de rotación del rotor (C. Zamudio-Ramirez et al., 2025).

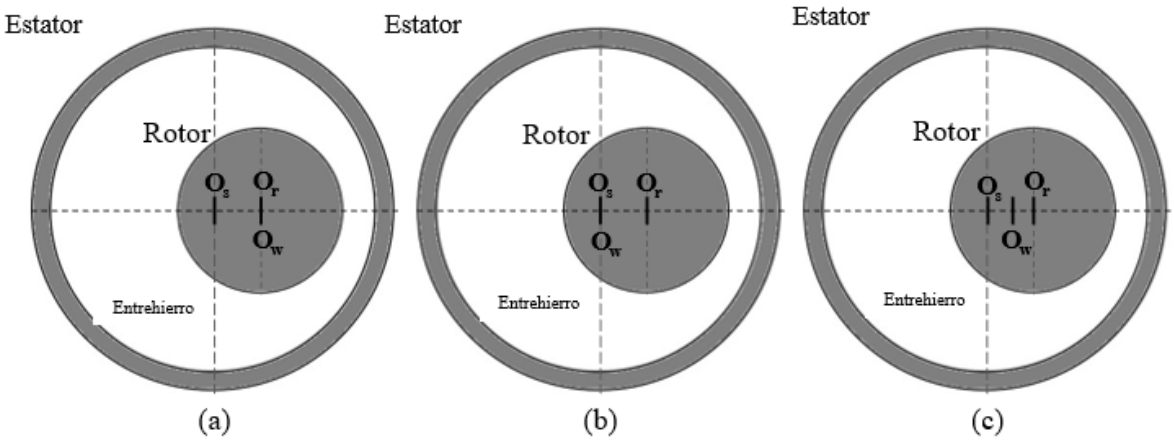


Figura 2.2. Sección transversal de un motor de inducción con falla de excentricidad: a) estática, b) dinámica y c) mixta (autoría propia)

La presencia de excentricidad modifica la distribución del flujo magnético en el entrehierro. Debido a que el entrehierro no es uniforme, la reluctancia magnética varía alrededor de la circunferencia del motor, generando una distribución asimétrica del campo magnético (Petryna et al., 2021; Terron-Santiago et al., 2022). Esta asimetría puede producir una fuerza desequilibrada de atracción magnética (UMP), cuya magnitud depende principalmente del grado de excentricidad, del voltaje de alimentación y del nivel de saturación magnética de la máquina (Dorrell, 2009; Faiz et al., 2009). La UMP puede incrementar los esfuerzos radiales sobre el rotor y acelerar la degradación de componentes mecánicos (Huang et al., 2022; Petryna et al., 2021).

Las consecuencias de la excentricidad pueden ser significativas para la operación del motor. Esta falla puede ocasionar vibraciones mecánicas, ruido electromagnético, incremento de la temperatura, sobrecorrientes, desgaste acelerado de rodamientos, esfuerzos adicionales sobre el eje, degradación del aislamiento e incluso colisión o contacto entre el rotor y el estator (Petryna et al., 2021; Terron-Santiago et al., 2022; Wang et al., 2022). Además, en (Hyun et al., 2012) se reporta que aproximadamente el 80% de las fallas mecánicas pueden provocar algún grado de excentricidad en el motor de inducción. Es decir, la falla de excentricidad en motores de inducción puede aparecer como consecuencia de otros defectos mecánicos y, al mismo tiempo, agravar el estado general de la máquina.

La excentricidad puede originarse durante el proceso de fabricación y ensamblaje del motor, debido a tolerancias geométricas inadecuadas, colocación incorrecta de rodamientos o desalineación entre el rotor y la carga. También puede desarrollarse durante la operación como consecuencia del desgaste de rodamientos, daño en el rotor, deterioro de la caja de engranes, vibraciones mecánicas o presencia de fuerzas electromagnéticas desequilibradas (Huang et al., 2022; Wang et al., 2022). Debido a ello, la excentricidad puede considerarse tanto una falla primaria como una consecuencia de otros defectos mecánicos (Hyun et al., 2012; Petryna et al., 2021).

De acuerdo con (Terron-Santiago et al., 2022; I. Zamudio-Ramirez et al., 2022), la ecuación que representa las frecuencias características de la falla de excentricidad mixta está dada por:

$$f_{ecc} = f_s \pm f_r \tag{1}$$

Donde f_s es la frecuencia de alimentación y f_r es la frecuencia de rotación mecánica del rotor.

2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El MEF es una técnica numérica que ha adquirido gran relevancia en distintas ramas de la ingeniería debido a su capacidad para resolver problemas físicos complejos regidos por ecuaciones diferenciales. Sus primeras aplicaciones surgieron durante la década de 1950 en el análisis estructural de componentes aeronáuticos, y posteriormente el método comenzó a extenderse hacia otras áreas como la ingeniería civil, térmica y electromagnética. En el área de la ingeniería eléctrica, el MEF comenzó a utilizarse para el análisis de fenómenos electromagnéticos a partir de trabajos desarrollados a finales de la década de 1960, permitiendo estudiar numéricamente sistemas descritos por las ecuaciones de Maxwell (Cardoso & Coelho, 2026). Actualmente, esta metodología es empleada en simulaciones electromagnéticas de máquinas eléctricas y dispositivos eléctricos, ya que permite

representar geometrías complejas, materiales con comportamiento no lineal y fenómenos variables en el tiempo (Bianchi, 2005; Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008; Meunier, 2008).

Esta técnica consiste en discretizar el dominio de análisis en pequeñas regiones denominadas elementos finitos, formando una malla sobre la cual las variables físicas son aproximadas mediante funciones de interpolación (Bianchi, 2005; Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008; Meunier, 2008). De acuerdo con (Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008), el MEF permite obtener soluciones aproximadas de problemas de campo electromagnético mediante la subdivisión del dominio en elementos simples conectados entre sí a través de nodos.

Este método numérico constituye una de las herramientas más importantes para el análisis de máquinas eléctricas modernas, ya que permite calcular con alta precisión variables como distribución de flujo magnético, densidad de corriente, torque electromagnético y pérdidas en diferentes condiciones de operación (Bianchi, 2005; Cardoso & Coelho, 2026). Como se muestra en la Figura 2.3, el procedimiento general del MEF inicia con la discretización de la geometría en una malla compuesta por elementos finitos. Posteriormente, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema electromagnético son transformadas en un sistema algebraico matricial mediante funciones de forma o interpolación. De acuerdo con (Kuczmann & Iványi, 2008), este proceso permite aproximar las variables de campo dentro de cada elemento y ensamblar un sistema global que posteriormente es resuelto numéricamente.

Asimismo, en la Figura 2.3, se muestran las tres etapas principales del MEF: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. En la etapa del preprocesamiento, se asignan las propiedades de los materiales, señales de excitación y demás parámetros necesarios para el análisis. La geometría del sistema, definida mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) puede simplificarse aprovechando simetrías para reducir el costo computacional. Después, el dominio de estudio se discretiza mediante una malla de elementos finitos, dividiendo la geometría en pequeños elementos de forma

definida, como triángulos o cuadriláteros en dos dimensiones, y tetraedros o hexaedros en tres dimensiones (Jin, 2014; Kuczmann & Iványi, 2008). Durante la etapa del procesamiento, se ensamblan y resuelven las ecuaciones del sistema mediante solucionadores numéricos, obteniendo las variables electromagnéticas de interés. Finalmente, en el postprocesamiento se analizan y visualizan los resultados obtenidos, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema y, en caso necesario, realizar modificaciones u optimizaciones en el modelo (Kuczmann & Iványi, 2008).

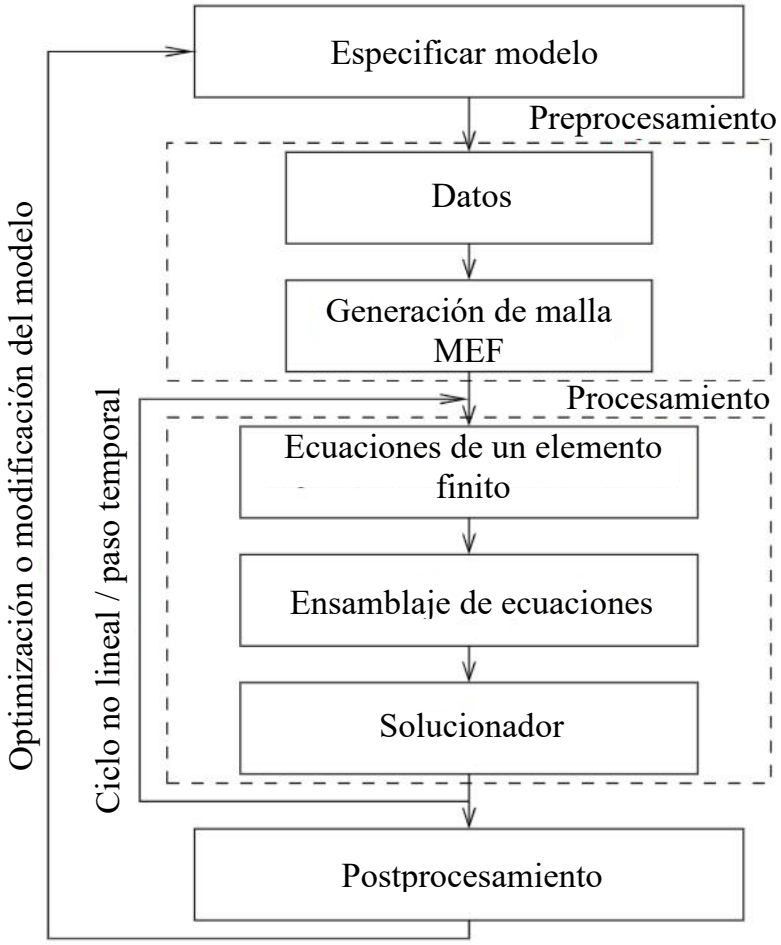
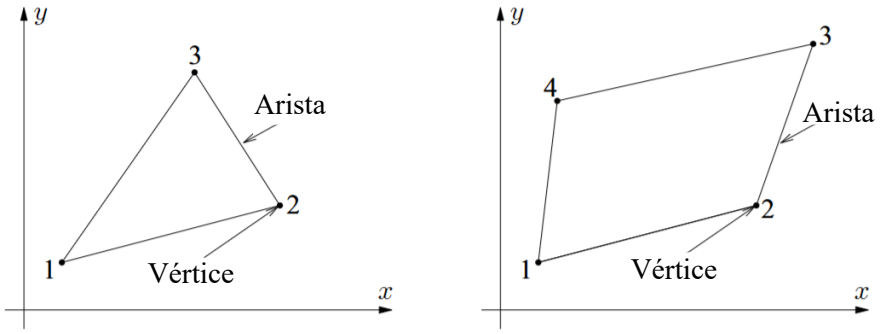


Figura 2.3. Pasos para la simulación mediante MEF (Kuczmann & Iványi, 2008)

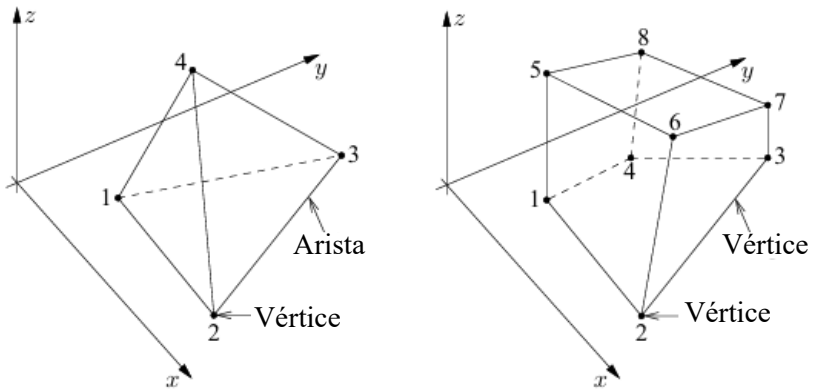
2.5.1 TIPOS DE ELEMENTO UTILIZADOS EN EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO EN SOLUCIONES ELECTROMAGNÉTICAS

La geometría del problema debe ser discretizada mediante una malla del MEF (Kuczmann & Iványi, 2008). Los tipos de elementos a emplear en un análisis con MEF dependen de la dimensionalidad de geometría del modelo, por ejemplo, de acuerdo con (Jin, 2014; Kuczmann & Iványi, 2008), un elemento finito puede ser un triángulo o un cuadrilátero para modelos 2D (véase la Figura 2.4), un tetraedro o un hexaedro para modelos 3D (véase la Figura 2.5).



a) Elemento triangular b) Elemento cuadrangular

Figura 2.4. Elementos típicos de MEF en el plano bidimensional x, y (Kuczmann & Iványi, 2008)



a) Elemento tetraédrico b) Elemento hexaédrico

Figura 2.5. Elementos típicos de MEF en el plano tridimensional x, y, z (Kuczmann & Iványi, 2008)

2.5 ECUACIONES DE MAXWELL

Las ecuaciones de Maxwell representan el fundamento teórico del electromagnetismo clásico y describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, así como su interacción con las cargas y corrientes eléctricas (Cardoso & Coelho, 2026; Krause et al., 2013; Kuczmann & Iványi, 2008; Mohan, 2002). Estas ecuaciones permiten modelar fenómenos como la inducción electromagnética, la distribución de flujo magnético y la generación de fuerzas electromagnéticas dentro de motores, generadores, sistemas de conversión de energía, transformadores, entre otros (Krause et al., 2013; Mohan, 2002). En el análisis de máquinas eléctricas, las ecuaciones de Maxwell describen cómo los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y cómo los campos variables en el tiempo inducen voltajes y corrientes en conductores (Cardoso & Coelho, 2026; Jin, 2014; Krause et al., 2013; Mohan, 2002).

Las ecuaciones de Maxwell pueden expresarse en su forma diferencial e integral. La forma diferencial describe el comportamiento de los campos electromagnéticos en cada punto del espacio y es ampliamente utilizada en simulaciones numéricas y métodos computacionales como MEF. Por otro lado, la forma integral permite analizar el comportamiento global de los campos sobre superficies y volúmenes definidos físicamente (Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008). Para el caso del análisis de geometrías en 2D, la forma diferencial es la forma recomendada para el análisis del sistema, debido a que facilita la formulación de ecuaciones parciales en la simulación (Cardoso & Coelho, 2026; Krause et al., 2013). Por ello, a continuación, se presenta una tabla de las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial (véase la Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial (autoría propia)

Ecuación	Ecuación representativa	Descripción de la ecuación

Ley de Gauss para el campo eléctrico	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	Establece que las cargas eléctricas son la fuente de los campos eléctricos (Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008)
Ley de Gauss para el magnetismo	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Indica que no existen monopolos magnéticos y que las líneas de flujo magnético forman trayectorias cerradas (Cardoso & Coelho, 2026)
Ley de Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$	Describe la inducción electromagnética causada por variaciones temporales del campo magnético (Krause et al., 2013; Kuczmann & Iványi, 2008)
Ley de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \boldsymbol{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$	Relaciona el campo magnético con las corrientes eléctricas y los campos eléctricos variables en el tiempo (Cardoso & Coelho, 2026; Kuczmann & Iványi, 2008)

Donde de la Tabla 2.1 las variables que se muestran representan: **E** representa el vector de campo eléctrico (V/m), **B** la densidad de flujo magnético (T), ρ la densidad volumétrica de la carga eléctrica (C/m^3) y $\boldsymbol{J}$ la densidad de corriente eléctrica (A/m^2). Asimismo, ε_0 corresponde a la permitividad eléctrica del vacío (F) y μ_0 a la permeabilidad magnética del vacío (H). Los operadores $\nabla \cdot$ y $\nabla \times$ representan la divergencia y el rotacional, respectivamente, mientras que $\frac{\partial}{\partial t}$ denota la derivada parcial con respecto al tiempo (Cardoso & Coelho, 2026; Krause et al., 2013; Kuczmann & Iványi, 2008).

2.6 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La Transformada de Fourier es una herramienta matemática que se ha utilizado en el análisis de señales y sistemas, ya que permite descomponer una señal en sus componentes frecuenciales e identificar qué frecuencias están presentes y con qué amplitud participan en la señal original. Mientras que en el dominio del tiempo una señal se observa como una variación temporal, en el dominio de la frecuencia puede analizarse como la suma de componentes sinusoidales de distintas frecuencias (James, 2011; Oppenheim et al., 1999; Smith, 1999).

Esta herramienta se utiliza en distintas áreas de la ciencia e ingeniería, tales como telecomunicaciones, procesamiento digital de señales, análisis de vibraciones mecánicas, sistemas biomédicos, procesamiento de imágenes y monitoreo de máquinas eléctricas, entre otras (Oppenheim et al., 1999; Smith, 1999). En particular, en el diagnóstico de fallas en motores de inducción, diversas anomalías mecánicas y eléctricas generan patrones característicos en determinadas frecuencias; por ello, el análisis frecuencial permite identificar defectos que pueden no ser evidentes al observar únicamente la señal en el dominio del tiempo (Cooley & Tukey, 1965; Riera-Guasp et al., 2015; C. Zamudio-Ramirez et al., 2025).

Cuando las señales son digitales y están compuestas por un número finito de muestras, se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform). Sin embargo, el cálculo directo de la DFT requiere una gran cantidad de operaciones computacionales, especialmente cuando se trabaja con señales largas. Para resolver este problema, Cooley y Tukey desarrollaron en 1965 un algoritmo eficiente denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform), un algoritmo eficiente para calcular la DFT y facilitar su implementación en aplicaciones de monitoreo y procesamiento digital en tiempo real (Cooley & Tukey, 1965; Smith, 1999).

De acuerdo con (Cooley & Tukey, 1965; Oppenheim et al., 1999), la DFT de una señal discreta $x[n]$ de N muestras se expresa como se muestra en la ecuación 2:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2)$$

Para $k = 0, 1, 2, \ldots, N-1$, donde $x[n]$ es la señal discreta en el tiempo, $X[k]$ representa a la componente de la señal en frecuencia, N ese el número de muestras, n es el índice de la muestra en el tiempo y k es el índice de la componente frecuencial.

3 METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente trabajo se compone de siete etapas principales orientadas al modelado, simulación y análisis electromagnético de un motor de inducción mediante MEF. Cada una de las etapas se encuentra directamente relacionada con la construcción del modelo geométrico bidimensional, la asignación de parámetros electromagnéticos y condiciones de operación, así como la implementación de la condición de falla por excentricidad mixta para el análisis de las señales de corriente generadas por la máquina. Asimismo, se considera el procesamiento de señales de corriente en el dominio del tiempo y su posterior análisis en frecuencia mediante la FFT, con el propósito de identificar las componentes armónicas asociadas a la condición de falla estudiada. Finalmente, los resultados obtenidos mediante la simulación por medio de métodos numéricos computacionales son comparados con datos experimentales para validar el comportamiento del modelo desarrollado. La Figura 3.1 muestra de manera esquemática el diagrama metodológico propuesto y seguido para el desarrollo del presente trabajo.

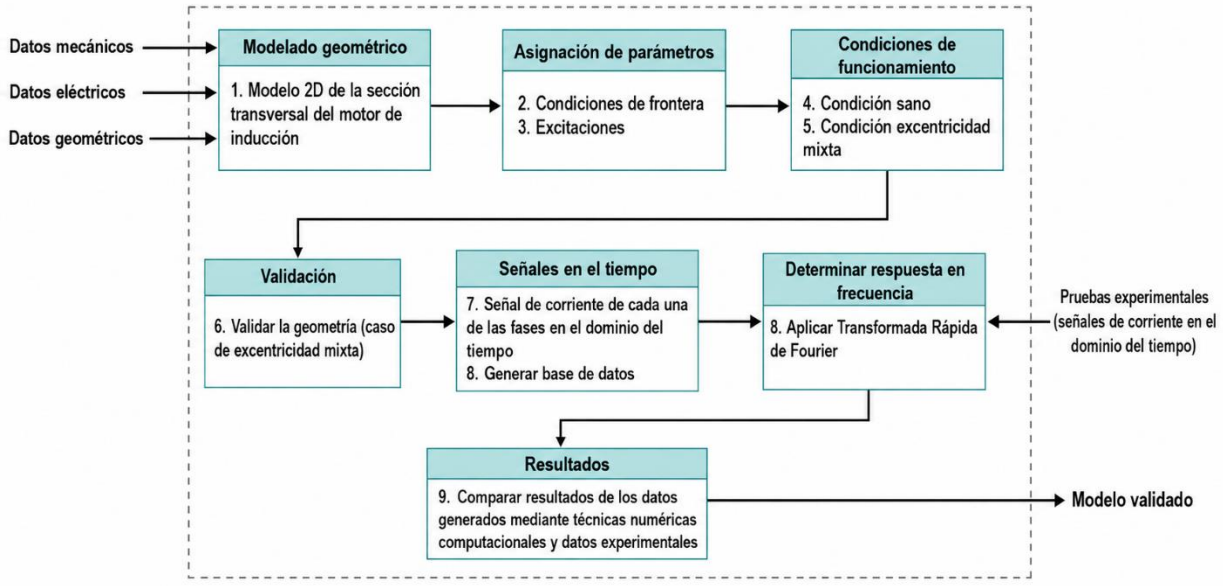


Figura 3.1. Diagrama metodológico (autoría propia)

Debido a que el MEF resuelve numéricamente un sistema algebraico definido por las condiciones de frontera, propiedades de material y parámetros del modelo, las simulaciones reproducen los mismos resultados mientras dichas condiciones permanezcan constantes (Jin,

2014), por tal razón, la matriz de pruebas para la generación de la base de datos mediante simulaciones en Ansys Maxwell se definió como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Matriz de pruebas para la generación de la base de datos mediante simulaciones MEF en Ansys Maxwell (autoría propia)

	Carga			
Condición de funcionamiento	0%	50%	78.6%	100%
Sano	1	1	1	1
Excentricidad mixta	1	1	1	1
			Total	8

3.1 MODELADO GEOMÉTRICO EN 2D DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Para realizar el modelado de un motor de inducción en Ansys Maxwell, es necesario contar con los parámetros geométricos, eléctricos y mecánicos del propio motor, basados en un equipo real. La importancia de emplear datos provenientes de un motor físico está en la posibilidad de validar el modelo desarrollado, garantizando que los resultados obtenidos en la simulación representen de manera adecuada el comportamiento real del sistema. En este sentido, diversos estudios han demostrado que la implementación de modelos basados en el método de elementos finitos, junto con la validación mediante datos experimentales, permite mejorar la precisión y confiabilidad de la simulación en máquinas eléctricas (Alberti et al., 2011; Liang et al., 2020; Zaabi et al., 2014).

Para ello, se toman las características de la placa de datos del motor de inducción modelo WEG W22, mostradas en la Tabla 3.2, en donde se incluyen parámetros tanto eléctricos como mecánicos. Dichas características fueron obtenidas directamente de la placa del motor de inducción, la cual proporciona información nominal necesaria para la correcta definición del modelo y su posterior análisis.

Tabla 3.2. Características del motor de inducción (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Número de fases	3	----
Número de polos	4	----
Potencia de salida nominal	1.1	kW
Voltaje entre terminales	400	V
Frecuencia nominal	50	Hz
Corriente nominal	2.88	A
Factor de potencia	0.73	----
Velocidad nominal	1450	rpm
Temperatura ambiente máxima	40	°C

Cabe destacar que no se encontró la hoja de datos completa del motor de inducción, por lo que la obtención de parámetros adicionales resulta indispensable para la implementación de un modelo basado en el MEF. En este contexto, se recurrió al uso de ecuaciones analíticas a partir de las características conocidas, mostradas en la Tabla 3.2, así como a la recopilación de información proporcionada por el fabricante a través de manuales técnicos.

La eficiencia del motor de inducción es una característica que tiene gran importancia en un motor eléctrico, ya que permite evaluar la relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida, siendo un indicador directo del desempeño energético y de las pérdidas internas del sistema. Diversos estudios han demostrado que la eficiencia influye directamente en la precisión del modelado electromagnético, así como en la estimación de pérdidas térmicas y el comportamiento operativo del motor bajo distintas condiciones de operación (Liang et al., 2020; Mecrow & Jack, 2008). En consecuencia, una adecuada determinación de esta característica del motor de inducción permite desarrollar modelos con mayor confiabilidad.

Es importante aclarar que la eficiencia del motor no se encuentra representada en la placa de datos disponible, por lo que se procedió a investigar su valor a partir de la información proporcionada por el fabricante. Como se muestra en la Figura 3.2, para un

motor de inducción WEG W22 de 4 polos, 50 Hz y potencia nominal de 1.1 kW, el porcentaje de eficiencia es aproximadamente del 76%. Este valor se obtuvo mediante la interpretación de la tabla correspondiente, realizando el cruce de información con la curva de eficiencia estándar del motor.

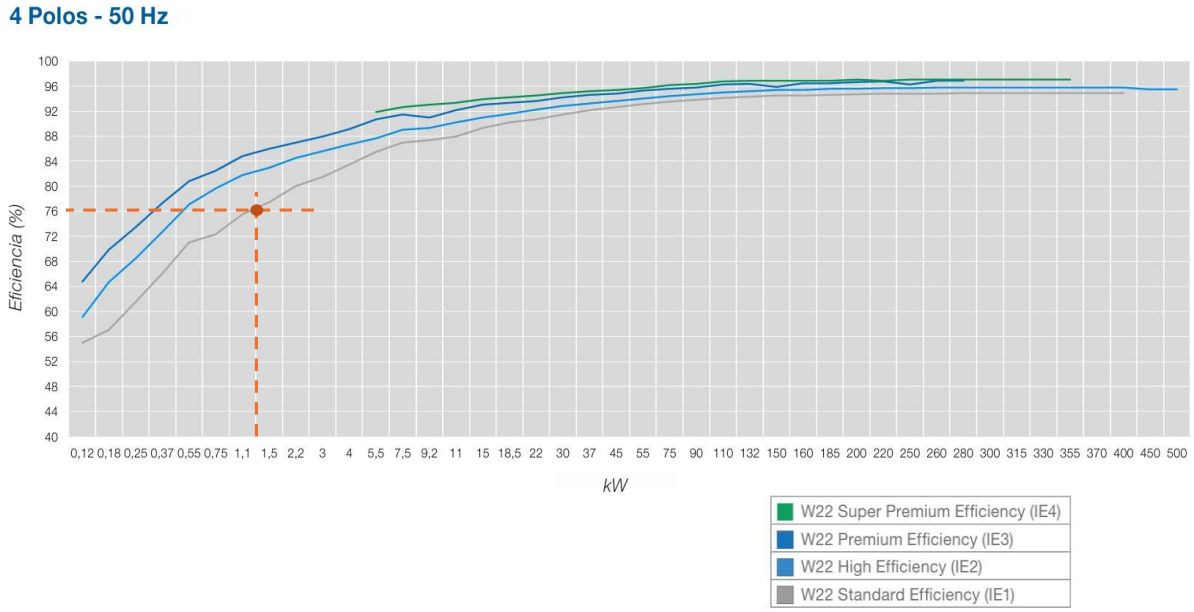


Figura 3.2. Niveles de eficiencia del motor de inducción trifásico WEG W22 de 4 polos para 50 Hz (Grupo WEG, 2023)

Además de las características eléctricas y mecánicas del motor de inducción, es necesario considerar sus características geométricas para desarrollar adecuadamente el modelo electromagnético en el software Ansys Maxwell. La definición precisa de los parámetros como dimensiones del estator, rotor, ranuras y entrehierro es importante para representar adecuadamente el comportamiento físico del motor de inducción durante la simulación.

A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para la generación de la geometría del estator y del rotor del motor. Es importante aclarar que debido a que el motor experimental utilizado como referencia no fue seccionado transversalmente, no fue posible obtener directamente las dimensiones internas de las ranuras del estator y del rotor. Por esta razón, la geometría bidimensional fue construida mediante una parametrización basada en dimensiones externas conocidas del motor y en configuraciones reportadas en la literatura

para motores de inducción de jaula de ardilla. De esta manera, los valores empleados no se plantean como una medición directa del motor físico, sino como una aproximación geométrica técnicamente sustentada para representar un motor de inducción de características equivalentes (Joksimović et al., 2020; Koçak et al., 2023; Pyrhönen et al., 2014).

Cabe mencionar que el material magnético utilizado en el núcleo del motor de inducción corresponde a acero eléctrico laminado no orientado, el cual es comúnmente empleado en máquinas eléctricas rotativas debido a que presenta propiedades magnéticas uniformes en todas las direcciones de la lámina. Este tipo de material se clasifica y caracteriza mediante normas como IEC 60404, enfocada en la medición de propiedades magnéticas de materiales, así como ASTM A677, las cuales especifican aceros eléctricos no orientados laminados en frío y totalmente procesados. Materiales comerciales como los Cogent Power se reportan bajo estas clasificaciones, además que está disponible en la librería de materiales de Ansys Maxwell, es por eso que, para el presente trabajo, el núcleo del motor de inducción está construido con el material "*Cogent Power M400"* disponible en Ansys Maxwell (ASTM International, 2023; International Electrotechnical Commission, 2022; International Electrotechnical Commission (IEC), 2022; Pyrhönen et al., 2014; Steiner Petrovic, 2010).

3.1.1 GEOMETRÍA DEL ESTATOR

Para realizar el modelo computacional del motor de inducción, se construyó la geometría bidimensional del estator, ya que este componente define el diámetro exterior de la máquina, la superficie interna asociada al entrehierro y la distribución de las ranuras donde se alojan los devanados trifásicos. De acuerdo con la literatura, la representación geométrica de ranuras y dientes influyen en la trayectoria del flujo magnético, la distribución de la fuerza magnetomotriz, la dispersión de flujo y el contenido armónico de la máquina (Cochran, 1989; Lipo, 2017; Ocak, 2023; Pyrhönen et al., 2014).

El estator fue construido a partir del diámetro exterior definido por la variable *OSD* con un valor de 140 mm y el diámetro interior se definió con un valor de 85 mm representado por la variable *D* como se muestra en la Figura 3.3. A partir de estos valores, se generó la región que corresponde al estator del motor de inducción siguiendo las referencias (Cochran,

1989; Lipo, 2017; Pyrhönen et al., 2014). Posteriormente, se definió el número total de ranuras del estator (N_s), este número es conocido con un valor de 36 ranuras. Con este valor se calculó el paso angular de las ranuras del estator dividiendo los 360° grados del círculo del estator entre 36 ranuras que corresponde a 10°. Este ángulo permitió construir una ranura de referencia sobre el eje x y replicarla mediante un patrón polar hasta completar las 36 ranuras totales con las que cuenta el estator.

La geometría de la ranura se definió mediante parámetros de apertura, profundidad y ancho de diente, lo cuales se indican en la Figura 3.3 y se resumen en la Tabla 3.3. Estos parámetros permitieron representar una ranura no rectangular, más cercana a la geometría empleada en motores de inducción. En el modelo, a las ranuras del estator se le asignó el material cobre, utilizado de la librería de materiales del software Ansys Maxwell y no se modificó alguna característica de este material, el cobre es el material de uso común en devanados de máquinas eléctricas (Cochran, 1989; Lipo, 2017; Pyrhönen et al., 2014; Tavner et al., 2008).

Finalmente, la geometría del estator se mantuvo centrada respecto al eje de referencia del modelo, con el fin de representar inicialmente el motor en condición saludable. Esta configuración permitió establecer una geometría base para los análisis posteriores con excentricidad, en los cuales se modifica la posición relativa entre el rotor y el estator.

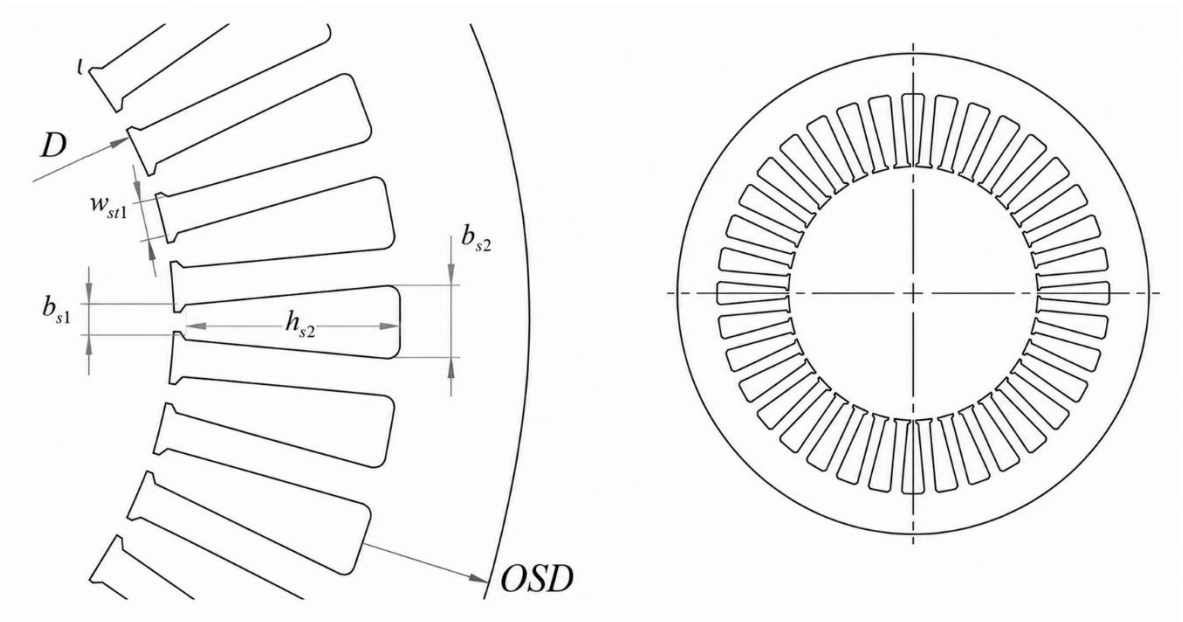


Figura 3.3. Geometría bidimensional empleada para el estator del motor de inducción (autoría propia)

A continuación, se muestra la Tabla 3.3 de los parámetros principales utilizados para la construcción del estator.

Tabla 3.3. Parámetros principales empleados para la construcción del estator del modelo bidimensional del motor de inducción (autoría propia)

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
OSD	Diámetro externo	140	mm
D	Diámetro interno	85	mm
h_{s2}	Profundidad de la ranura	14	mm
w_{st1}	Ancho de diente	3.3	mm
b_{s1}	Ancho de la ranura, zona interna	6.9	mm
b_{s2}	Ancho de la ranura, zona externa	4.4	mm
N_s	Número de ranuras	36	----
----	Paso angular entre ranuras	10°	----
----	Material	Cobre	----

3.1.2 GEOMETRÍA DEL ROTOR

Después de construir el estator, se realizó el modelado geométrico bidimensional del rotor. Para ello, se tomó como referencia el diámetro interno del estator *D* y el entrehierro *g* que tiene un valor de 0.4 mm, de modo que el diámetro externo del rotor se definió mediante la relación *D-2g* obteniendo un valor de 84.2 mm. Esta condición permitió conservar un entrehierro uniforme en el modelo saludable, necesario para establecer una referencia antes de introducir la falla de excentricidad (Lipo, 2017; Pyrhönen et al., 2014; Weili et al., 2007).

El rotor fue modelado como una estructura tipo jaula de ardilla. El diámetro del eje se definió con la variable D_{sh} con un valor de 45 mm como se muestra en la Figura 3.4. La región comprendida entre el eje y el diámetro exterior del rotor fue asignada al núcleo del

rotor, dentro de la cual se generaron las ranuras correspondientes a la jaula de ardilla siguiendo las referencias (Cochran, 1989; Lipo, 2017; Pyrhönen et al., 2014). El número total de ranuras del rotor es de 26 (N_r). A partir de este valor se calculó el paso angular entre ranuras del rotor dividiendo los 360 grados del rotor entre las 26 ranuras, dando un valor de 13.84°. La geometría de las ranuras del rotor se definió mediante parámetros de profundidad, ancho de barra y radios de redondeo como se muestra en la Figura 3.4 y resumidos en la Tabla 3.6.

Primero se realizó una ranura base sobre el eje *x* del modelo, y posteriormente fue replicada 26 veces mediante un arreglo polar. En el modelo bidimensional se representó principalmente la sección transversal de las barras, mientras que los anillos de corto circuito se pierden en esta representación. Para las ranuras del rotor se asignó aluminio como material conductor, ya que las jaulas de ardilla de motores de inducción se fabrican comúnmente con aluminio o cobre (Finley & Hodowanec, 2000). El material asignado se tomó de la biblioteca de materiales del software Ansys Maxwell sin modificar alguna característica de este.

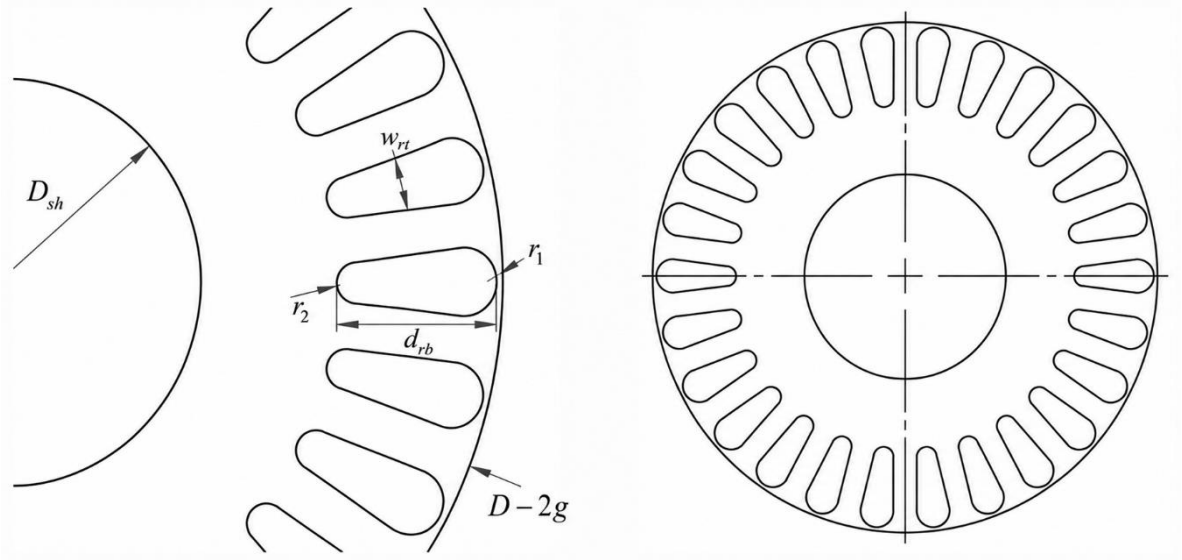


Figura 3.4. Geometría bidimensional empleada para el rotor del motor de inducción (autoría propia)

A continuación, se muestra la Tabla 3.4 de los parámetros principales utilizados para la construcción del rotor.

Tabla 3.4. Parámetros principales empleados para la construcción del rotor del modelo bidimensional del motor de inducción (autoría propia)

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
D_{sh}	Diámetro del eje	45	mm
$D\text{-}2g$	Diámetro exterior	84.2	mm
w_{rt}	Ancho de barra	4.6	mm
d_{rb}	Profundidad de barra	3.3	mm
r_1	Radio de redondeo exterior	2.5	mm
r_2	Radio de redondeo interior	2	mm
N_r	Número de ranuras	26	----
----	Paso angular entre ranuras	13.84°	----
----	Material	Aluminio	----

Como se muestra en la Figura 3.5, el rotor y el estator fueron integrados en un mismo plano bidimensional, manteniendo el entrehierro uniforme para la condición saludable, se observa la configuración geométrica final para el modelo del motor de inducción, incluyendo elementos como eje, rotor, estator, ranuras de rotor y ranuras de estator.

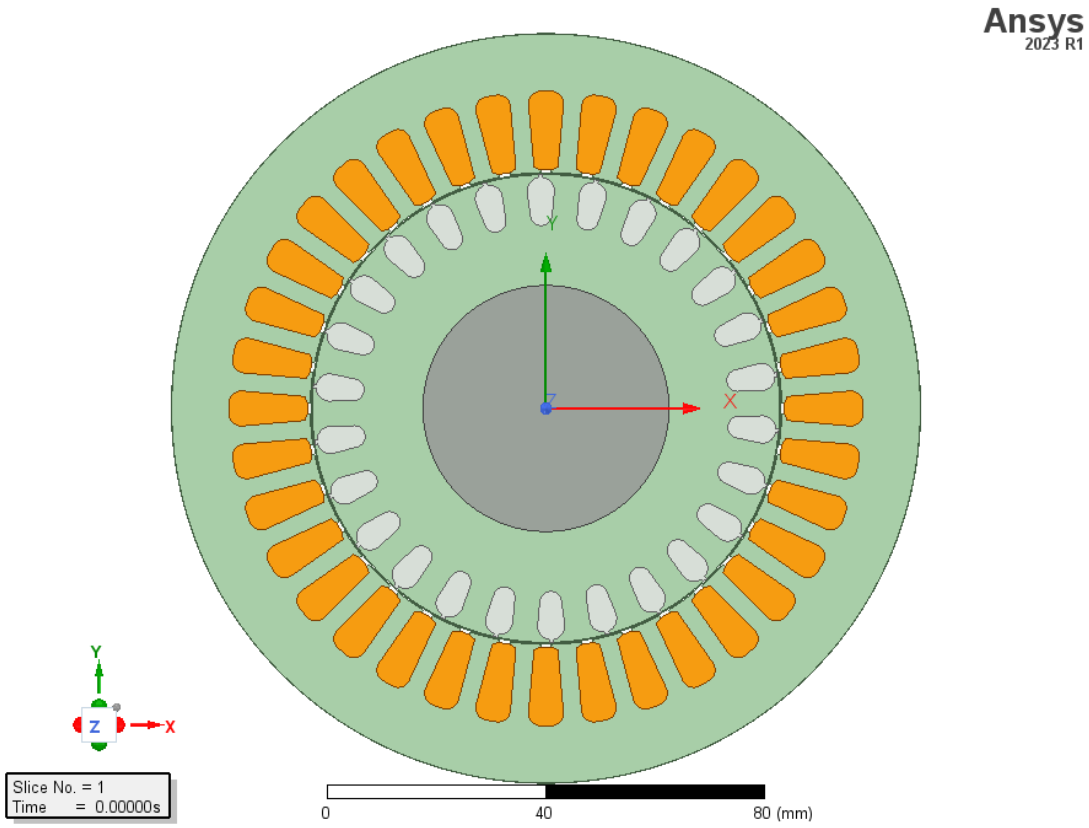


Figura 3.5. Geometría bidimensional del motor de inducción (autoría propia)

3.2 ASIGNACIÓN DE CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales permiten definir el estado del sistema previo al inicio de la simulación, estableciendo los valores de las variables eléctricas y magnéticas del modelo. En máquinas eléctricas, estas condiciones influyen en el comportamiento transitorio del sistema, por lo que su correcta asignación es necesaria para obtener resultados consistentes en modelos basados en el método de elementos finitos como se menciona en (Tikhonova et al., 2017).

3.2.1 CONFIGURACIÓN DEL MOVIMIENTO

El comportamiento de las máquinas eléctricas está directamente relacionado con la interacción entre campos magnéticos y conductores en movimiento. De acuerdo con la teoría electromagnética, el movimiento de cargas en presencia de un campo magnético genera

fuerzas y campos inducidos que constituyen la base de la conversión electromecánica. Por esta razón, la inclusión del movimiento del rotor en el modelo es indispensable para representar adecuadamente el funcionamiento del sistema (Lipo, 2017). La configuración del movimiento en Ansys Maxwell permite incorporar la rotación del rotor dentro del modelo, lo que hace posible analizar la interacción electromecánica del motor de inducción. Para ello, se definen los parámetros momento de inercia, torque de la carga, coeficiente de amortiguamiento mecánico y tipo de movimiento, los cuales determinan el comportamiento del sistema durante la simulación.

Una de las características principales a conocer del motor de inducción es el torque de salida, de acuerdo con (Chapman, 2012) para obtener el torque de salida del motor de inducción se utiliza la siguiente la ecuación 3.

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (3)$$

Donde T_{out} corresponde al torque de salida nominal (Nm), P_{out} la potencia de salida nominal (W) y ω_m la velocidad mecánica angular (rad/s). De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 3.2, se conoce el valor de la potencia de salida nominal, pero se desconoce la velocidad mecánica angular, para ello se hace uso de la ecuación 4.

$$\omega_m = (2\pi)\ (RPS) \quad (4)$$

Donde el valor RPS se desconoce, pudiéndose calcular de la siguiente manera de acuerdo con la ecuación 5.

$$RPS = \frac{RPM}{60} \quad (5)$$

El valor de RPM es conocido como la velocidad nominal del motor de inducción, con un valor de 1450 rpm de acuerdo con su placa de datos, sustituyendo este valor en la ecuación 3 se tiene que:

$$RPS = \frac{1450\ rpm}{60}$$

$$RPS \approx 24.17\ rps$$

Sustituyendo el valor de RPS en la ecuación 4 se obtiene:

$$\omega_m = (2\pi)\ (24.17\ rps)$$

$$\omega_m \approx 151.86\ rad/s$$

Finalmente, el valor de ω_m se sustituye en la ecuación 1 para obtener el valor del torque de salida nominal:

$$T_{out} = \frac{1100\ W}{151.86\ rad/s}$$

$$\boldsymbol{T_{out} \approx 7.24\ Nm}$$

De acuerdo con la base de datos experimentales, la variación de la carga se indujo mediante un motor DC acoplado al eje del motor de inducción, por tanto, se asume que el tipo de carga que se toma en cuenta es una carga constante, de tal modo que, para definir el valor del torque de la carga se utiliza la ecuación 6.

$$T_{load} = -(T_{out})(K_L) \qquad (6)$$

Donde T_{load} es el torque de la carga (Nm), T_{out} representa al torque de salida del motor de inducción (Nm) y K_L es el valor constante de la carga. El signo que define la ecuación está relacionado con el sentido de rotación del rotor. Si se establece un movimiento positivo del rotor sobre el eje *z*, el torque de carga tendrá signo negativo, debido a que este debe oponerse al movimiento generado; de manera inversa, si el sentido de giro es negativo, el torque de carga será positivo (Chapman, 2012). Por otra parte, el coeficiente de carga K_L, representado mediante un valor constante, determina el porcentaje de carga aplicado al motor de inducción. En el presente trabajo se consideran niveles de carga del 0, 50, 78.6 y 100%, los cuales corresponden a valores de K_L dentro del intervalo de 0 a 1 según corresponda.

Por otro lado, para determinar el valor del momento de inercia del motor de inducción se recurrió al uso de la ecuación 7, obtenida de (Chapman, 2012), debido a que dicho parámetro no se encuentra especificado en la placa de datos del motor. Además, como se mencionó anteriormente, no fue posible obtener la hoja de datos del fabricante, por lo que no se contó con información adicional relacionada con el valor del momento de inercia. Es importante aclarar que el uso de la siguiente ecuación representa una aproximación teórica del valor del momento de inercia.

$$J = \frac{\tau}{\alpha} \tag{7}$$

Donde J es el momento de inercia del motor de inducción (kgm^2), τ representa el par neto aplicado (Nm) y α representa a la aceleración angular resultante (rad/s^2).

El par neto aplicado se puede interpretar como el torque de salida cuyo valor ya es conocido, por otro lado, se desconoce el valor de la aceleración angular, por tanto, la aceleración angular se define mediante la ecuación 8.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \tag{8}$$

La ecuación 8 se interpreta de la siguiente manera, la aceleración angular es la tasa de cambio de la velocidad angular (rad/s) con respecto al tiempo (s) (Chapman, 2012).

Debido a que no se cuenta con una medición experimental detallada de la velocidad instantánea durante el arranque, la aceleración angular promedio se estima utilizando la velocidad síncrona del motor. Esta aproximación se obtiene considerando la ecuación 9.

$$\alpha \approx \frac{\omega_s}{t_{arranque}} \tag{9}$$

Donde ω_s corresponde a la velocidad angular síncrona (rad/s) calculada a partir de la frecuencia de alimentación y el número de polos del motor de inducción, a su vez, $t_{arranque}$ representa al tiempo de arranque del motor (s).

Para obtener el valor de la velocidad angular síncrona, se hace referencia a la ecuación 10 obtenida de (Chapman, 2012).

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (10)$$

En donde n_s corresponde a la velocidad síncrona (rpm). Para calcular la velocidad síncrona se utiliza la ecuación 11 (Chapman, 2012).

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (11)$$

Donde f corresponde a la frecuencia nominal del motor de inducción (Hz) y P corresponde al número de polos del motor de inducción, ambos valores son conocidos y presentados en la Tabla 3.2. Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación 11 se tiene que:

$$n_s = \frac{(120)(50\ Hz)}{4}$$

$$n_s \approx 1500\ rpm$$

Ahora se conoce el valor de la velocidad síncrona, sustituyendo dicho valor en la ecuación 8 se obtiene:

$$\omega_s = \frac{(2\pi)(1500\ rpm)}{60}$$

$$\omega_s \approx\ 157.07\ rad/s$$

Como ya se tiene el valor de la velocidad angular síncrona, este valor se sustituye en la ecuación 9. Es importante mencionar que, para calcular el tiempo de arranque del motor de inducción, se realiza una aproximación en base a la experimentación real con carga al 100%, en donde el tiempo que se fija es de aproximadamente 1.5 segundos.

$$\alpha \approx \frac{157.07\frac{rad}{s}}{2.8\ s}$$

$$\alpha \approx 56.0964\ rad/s$$

Sustituyendo el valor de la velocidad angular síncrona en la ecuación 7 se obtiene el valor del momento de inercia del motor de inducción, teniendo:

$$J = \frac{7.24\ Nm}{56.0964\ rad/s}$$

$$\boldsymbol{J \approx 0.1290635\ kgm^2}$$

El coeficiente de amortiguamiento mecánico (damping), es un parámetro que se debe considerar en el modelo de motores de inducción, debido a que representa las pérdidas mecánicas rotacionales asociadas a la fricción y ventilación que se oponen al movimiento del rotor, englobando efectos como las pérdidas mecánicas del eje y la resistencia viscosa de la carga (Ogata, 1993), además, estos parámetros permiten describir cuánto par o fuerza de resistencia se genera de acuerdo a la velocidad del motor (ANSYS, Inc, s. f.-b). Estas pérdidas influyen directamente en la respuesta transitoria, la estabilidad dinámica y el comportamiento electromecánico del motor durante el proceso de arranque y desaceleración o estado estable, así como las fluctuaciones de la carga (Krause et al., 2013).

De acuerdo con la norma IEC 60034-2-1, las pérdidas rotacionales corresponden principalmente a pérdidas por fricción y ventilación obtenidas mediante ensayos normalizados de eficiencia y pérdidas mecánicas en contextos experimentales (International Electrotechnical Commission (IEC), 2007). Aunque, cuando no se cuentan con las especificaciones del fabricante mediante hojas técnicas o manuales de maquinaria, es difícil determinar los parámetros o características de fricción ya que dependen de diversos factores (ANSYS, Inc, s. f.-b).

Para determinar el damping se parte de la ecuación 3 propuesta por (Chapman, 2012). Asimismo, en el modelado dinámico de sistemas electromecánicos se emplea un modelo de fricción viscosa proporcional a la velocidad angular, representado mediante la educación 12.

$$T_f = D\omega \quad (12)$$

Donde T_f es el torque de fricción mecánica (Nm), D es el coeficiente de amortiguamiento mecánico o damping (Nms/rad) y ω la velocidad mecánica angular (rad/s). La ecuación 12 se obtiene de la formulación dinámica presentada en (Krause et al., 2013). A partir de la sustitución del torque de fricción mecánica en la ecuación 3 por el torque de salida del motor, se obtienen las pérdidas rotacionales del motor de inducción (p_{rot}) y sabiendo la representación de T_f, se obtiene la ecuación 13.

$$p_{rot} = D\omega^2 \tag{13}$$

Debido a que el fabricante no proporciona información relacionada con las pérdidas mecánicas rotacionales del motor, estas se estimaron a partir de la eficiencia nominal y de distribuciones típicas reportadas en la literatura. Considerando que el motor utilizado para el presente trabajo presenta una eficiencia nominal del 76% (véase la Figura 3.2), las pérdidas totales representan un aproximado del 24% de la potencia de entrada. De acuerdo con (Mohan, 2002), las pérdidas por fricción y ventilación constituyen típicamente entre el 5 al 10% de las pérdidas totales en los motores de inducción. Bajo esta consideración, se realiza una estimación de las pérdidas mecánicas por fricción y ventilación esperadas, que oscilan entre 1.2 a 2.4% de la potencia nominal, por lo que se adoptó un valor del 2% para estimar las pérdidas mecánicas rotacionales y calcular el coeficiente de amortiguamiento mecánico del modelo.

Sabiendo que la velocidad mecánica angular (ω) tiene un valor de $151.86\ rad/s$ y el 2% de la potencia nominal de salida del motor de inducción que indica las pérdidas por fricción y ventilación (p_{rot}) es de $22\ W$ ya se puede calcular el coeficiente de amortiguamiento mecánico, haciendo uso de la ecuación 11 y despejando D se tiene:

$$D = \frac{22\ W}{(151.86\ rad/s)^2}$$

$$\boldsymbol{D \approx 0.00099541\ Nms/rad}$$

En el modelo geométrico del motor de inducción desarrollado en Ansys Maxwell, se asigna una banda de movimiento (motion band) como se muestra en la Figura 3.6, en donde el círculo central de color verde oscuro y azul representa a esta banda con su respectiva configuración dinámica (parámetros mostrados en la Tabla 3.5). Dicha banda corresponde a la región encargada de definir el movimiento del rotor. Esta se establece una vez definida la geometría del motor, debido a que permite modelar el desplazamiento angular del rotor durante la simulación electromagnética. La banda se extiende desde el centro del sistema hasta la parte interna del estator, cubriendo completamente la región del entrehierro.

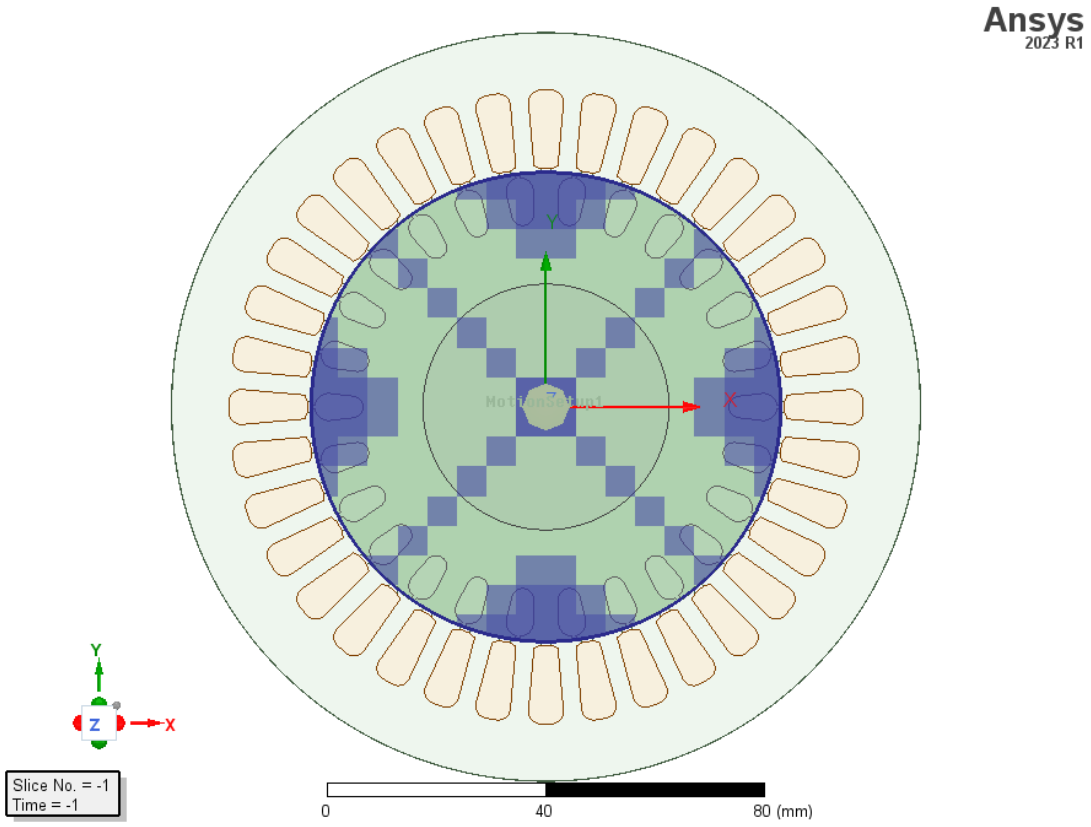


Figura 3.6. Configuración del movimiento del motor de inducción (autoría propia)

A modo de resumen, se presenta una tabla con los parámetros a considerar para realizar la configuración del movimiento del motor de inducción en el software Ansys Maxwell (véase la Tabla 3.5). Cabe recalcar que el torque de la carga se ajusta mediante un coeficiente asociado al nivel de carga deseado. De esta manera, para representar distintas condiciones de operación, el torque nominal de carga se multiplica por un factor de escala correspondiente al porcentaje de carga requerido. Por ejemplo, para simular una condición equivalente al 25%

de la carga, el torque de carga se multiplica por un factor de 0.25.

Tabla 3.5. Parámetros utilizados para la configuración del movimiento del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Velocidad angular inicial	0	rpm
Momento de inercia	0.1290	kgm^2
Coeficiente de amortiguamiento mecánico	0.00099541	Nms/rad
Torque de salida	7.24	Nm
Movimiento de rotación	+	----

3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL LÍMITE DE POTENCIAL VECTORIAL

El límite de potencial vectorial (*vector potential*) o vector potencial, representa una condición de frontera forzosa en el modelado electromagnético, ya que permite definir el comportamiento del campo magnético sobre determinadas regiones del dominio de simulación delimitadas mediante un borde o contorno (ANSYS, Inc, s. f.-f).

De acuerdo con la documentación oficial de Ansys Maxwell, el vector potencial se representa mediante $\boldsymbol{A}$ y se utiliza para establecer un valor constante sobre una frontera específica, siendo comúnmente aplicado en los límites exteriores del modelo electromagnético (ANSYS, Inc, s. f.-f). La fórmula que se emplea para determinar el vector potencial magnético se basa en la relación entre la densidad de flujo magnético y el potencial vector magnético, descritos en la ecuación 14, donde el campo magnético $\boldsymbol{A}$ satisface dicha ecuación.

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \qquad (14)$$

Donde $\boldsymbol{A}$ representa al vector potencial definido ($weber/m$) y **B** la densidad de flujo magnético (T). Esta ecuación establece que el campo magnético puede obtenerse a partir del rotacional de potencial vector magnético y posteriormente le permite resolver las ecuaciones de Maxwell que se presentan en la Tabla 2.1. En Ansys Maxwell, el software resuelve internamente esta formulación diferencial junto con las condiciones de frontera y las propiedades electromagnéticas de los materiales, permitiendo calcular la distribución de flujo magnético.

Asimismo, el vector potencial magnético permite definir un espacio confinado dentro del modelo, ya que las condiciones de frontera aplicadas sobre $\boldsymbol{A}$ pueden utilizarse para representar regiones magnéticamente aisladas o límites artificiales del problema electromagnético. En este sentido, se define la estructura magnéticamente aislada con un valor de 0 $weber/m$ para evitar que el flujo magnético se propague indefinidamente fuera de la región de análisis y a su vez, mejorar la estabilidad numérica de la simulación (ANSYS, Inc, s. f.-f; Jin, 2014).

A modo de resumen, se presenta una tabla con los parámetros utilizados para definir el vector potencial del modelo (véase la Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Parámetros utilizados para la configuración del límite de potencial vectorial del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Vector potencial	0	$weber/m$

Como se muestra en la Tabla 3.6, la delimitación del vector potencial requiere únicamente de un parámetro, lo cual, lo vuelve una configuración sencilla de realizar. Para mostrar gráficamente la estructura magnéticamente aislada gracias al vector potencial, se presenta la Figura 3.7, en donde la línea azul exterior al estator representa al límite de potencial configurado.

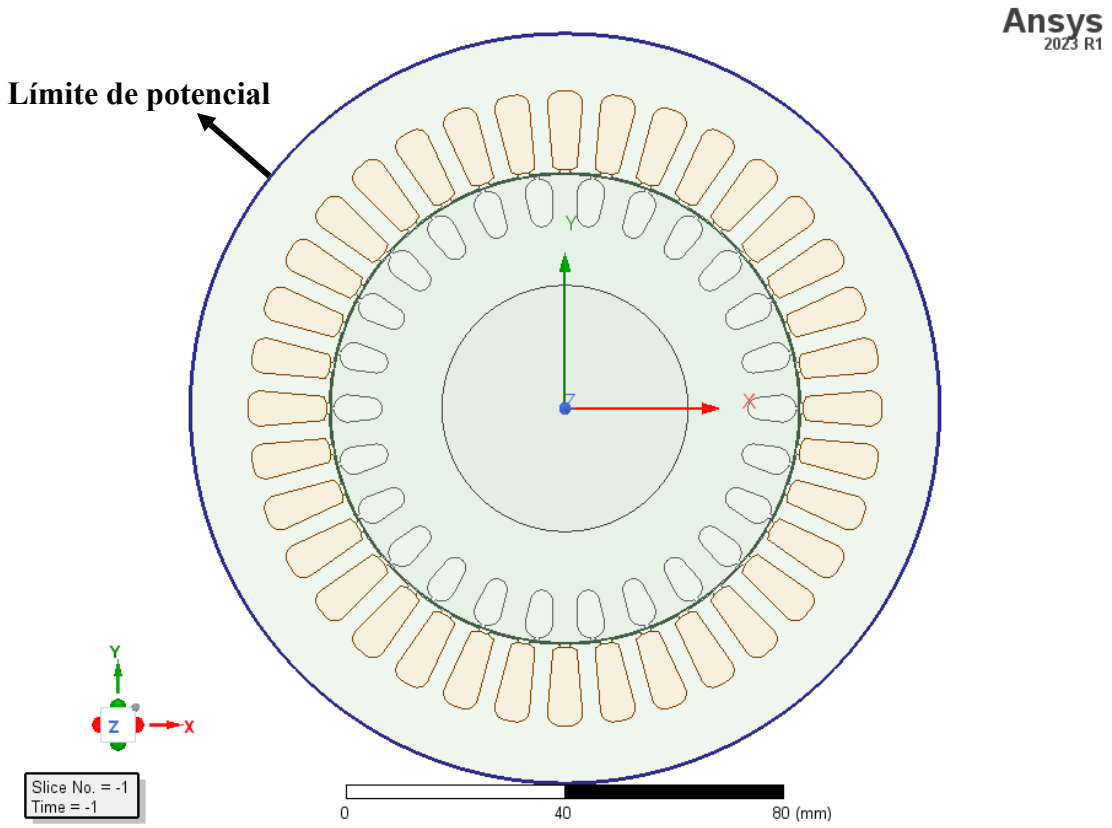


Figura 3.7. Configuración del límite de potencial vectorial del motor de inducción (autoría propia)

3.2.3 ASIGNACIÓN DE LAS FASES

Durante la etapa de asignación de fases en el modelado electromagnético de máquinas eléctricas, se definen las excitaciones trifásicas asociadas a los devanados del estator con el fin de representar las condiciones reales de alimentación y operación del motor de inducción (Lipo, 2017). Esta configuración permite establecer la secuencia de las fases y el desfase angular entre corrientes, lo cual, es importante para generar el campo magnético giratorio responsable del funcionamiento de la máquina eléctrica (Chapman, 2012; Pyrhönen et al., 2014).

De acuerdo con la configuración del motor real empleado como referencia en el presente trabajo de investigación, el devanado del estator se encuentra conectado en configuración estrella (Y). Bajo esta disposición, la corriente de línea o corriente de terminal

es igual a la corriente de la fase, mientras que el voltaje de línea corresponde a $\sqrt{3}$ veces el voltaje de fase (Chapman, 2012; Fitzgerald et al., 2003). La aseveración anterior, se describe en las ecuaciones 15-16.

$$I_L = I_{\emptyset} \tag{15}$$

Donde I_L es la corriente de línea (A) e $I_{\emptyset}$ es la corriente de fase (A). La ecuación 16 demuestra que en una conexión en Y, la corriente que circula por cada línea es igual a la corriente que fluye en la fase correspondiente (Chapman, 2012).

$$V_{LL} = \sqrt{3}V_{\emptyset} \tag{16}$$

Donde V_{LL} es el voltaje de línea a línea (V) y de acuerdo con la Tabla 3.2 este valor se establece en $400\,V$, por su parte, $V_{\emptyset}$ es el voltaje de fase o voltaje de línea-neutro y representa al voltaje medido entre una fase y el neutro (V) (Chapman, 2012).

Se considera como referencia un sistema trifásico balanceado, debido a que las tres fases presentan la misma amplitud de voltaje y frecuencia, además de un desfase eléctrico de 120° entre cada una de ellas (Chapman, 2012). Las ecuaciones 17-19 representan las señales senoidales de voltaje instantáneo de cada una de las fases del sistema trifásico balanceado, estas ecuaciones se utilizaron para la asignación de las fases en el modelo numérico.

$$V_a(t) = V_{pico}\sin(\omega t) \tag{17}$$

$$V_b(t) = V_{pico}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{18}$$

$$V_c(t) = V_{pico} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (19)$$

Donde $V_a(t)$, $V_b(t)$ y $V_c(t)$ representan el voltaje instantáneo de cada una de las fases (V), V_{pico} representa al voltaje pico o valor máximo de amplitud del voltaje de fase (V), ω representa a la frecuencia angular de la señal senoidal (rad/s) y t el tiempo (s). Donde la frecuencia angular está definida por la ecuación 20.

$$\omega = 2\pi f \quad (20)$$

De la ecuación 18 y en referencia a la Tabla 3.2 se establece que la frecuencia f es de 50Hz. Asimismo, para obtener el V_{pico} de la señal, se utiliza la ecuación 21.

$$V_{pico} = \sqrt{2} V_{\emptyset} \quad (21)$$

Donde $V_{\emptyset}$ se obtiene despejando la ecuación 16.

$$V_{\emptyset} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\emptyset} = \frac{400\ V}{\sqrt{3}}$$

$$\boldsymbol{V_{\emptyset} \approx 230.9401\ V}$$

Para configurar el valor del V_{pico}, este se definió mediante una ecuación dentro del software de Ansys Maxwell, la cual, se presenta como la ecuación 21. Esta implementación permite automatizar el proceso de simulación, de manera que cualquier modificación en el valor del voltaje de fase actualice automáticamente el valor de V_{pico} evitando la necesidad de realizar cambios manuales en múltiples parámetros del modelo.

Una vez definido el procedimiento para obtener el valor del voltaje de cada una de las

fases, se procede a realzar la asignación manual de las fases en las ranuras del estator. Durante este proceso, es necesario considerar el cambio de polaridad entre devanados con el fin de generar un campo magnético giratorio dentro de la máquina eléctrica, condición sumamente importante para el funcionamiento de los motores de inducción (Chapman, 2012; Pyrhönen et al., 2014).

Para la generación del campo magnético giratorio, inicialmente se considera que el estator cuenta con 36 ranuras distribuidas uniformemente en su periferia. Debido a que se desea representar un motor de inducción trifásico, las ranuras del estator se distribuyen equitativamente entre las tres fases, correspondiendo 12 ranuras a cada fase. Asimismo, de acuerdo con las especificaciones del motor mostradas en la Tabla 3.2, el motor de inducción posee 4 polos; por lo tanto, a cada polo de cada fase se le asignan 3 ranuras del estator.

La asignación de las fases se realiza siguiendo la secuencia A-C-B, iniciando con polaridad negativa en la fase A en el primer cuadrante del motor de inducción, posteriormente polaridad positiva en la fase C y finalmente polaridad negativa en la fase B, esto en sentido antihorario. Esta distribución se efectúa considerando que dos polos adyacentes no deben presentar la misma polaridad, ya que la alternancia de polaridades es la que permite producir el campo magnético giratorio dentro de la máquina eléctrica (Chapman, 2012; Pyrhönen et al., 2014).

La correcta disposición espacial de las fases y sus polaridades influye directamente en la formación del campo magnético rotatorio del motor de inducción. En la Figura 3.8 se muestra gráficamente la configuración de las fases y sus respectivas polaridades asignadas en el motor de inducción de estudio.

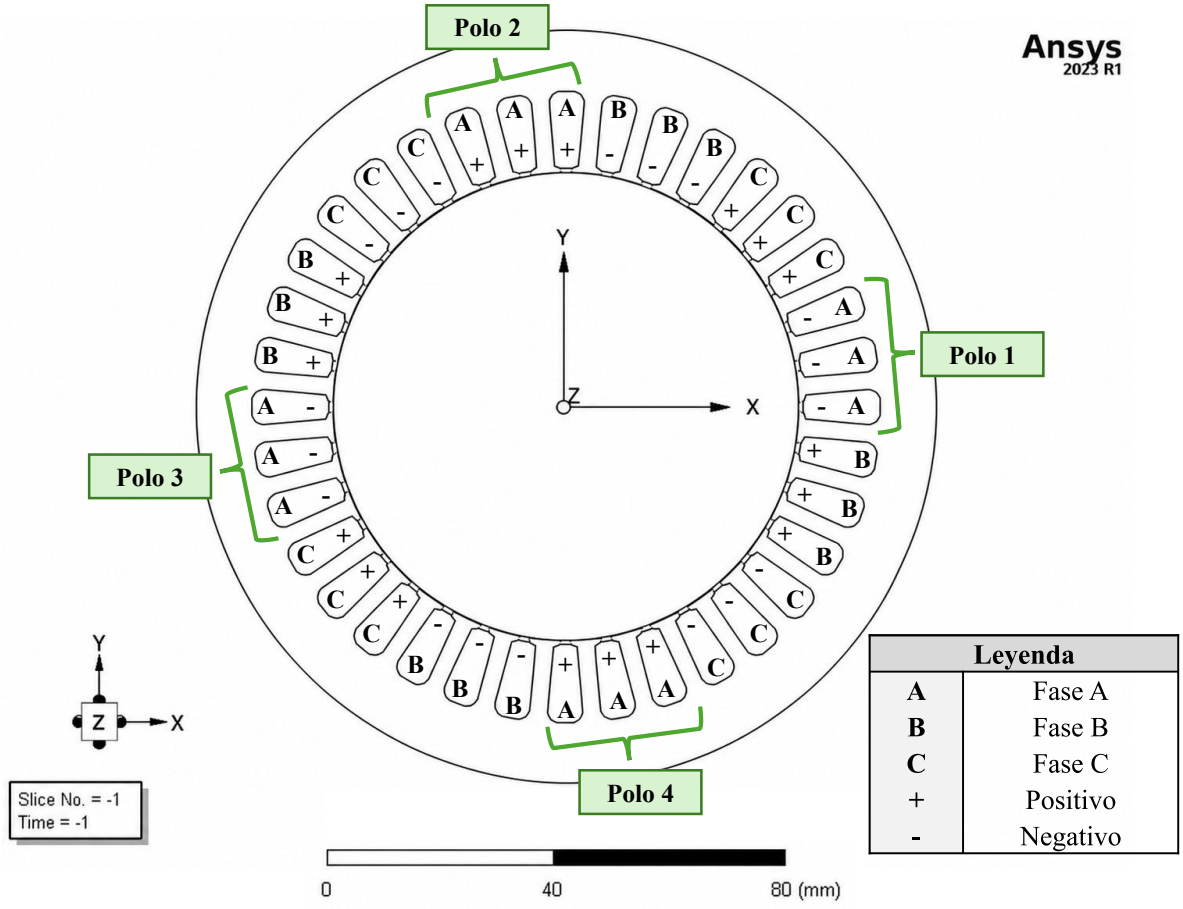


Figura 3.8. Distribución de las fases A, B y C y asignación de polaridades en el motor de inducción trifásico (autoría propia)

Un ejemplo gráfico de una de las fases del motor de inducción, fase A, se presenta en la Figura 3.9, en donde los bordes de las ranuras asignadas a esta fase se muestran en color azul dentro del software Ansys Maxwell. Asimismo, puede observarse que la distribución de la fase contempla los 4 polos correspondientes del motor, de acuerdo con las especificaciones establecidas para el modelo electromagnético y mostradas en la Tabla 3.2. Para las fases B y C se sigue el mismo procedimiento de configuración, variando únicamente las ranuras del estator asignadas a cada fase.

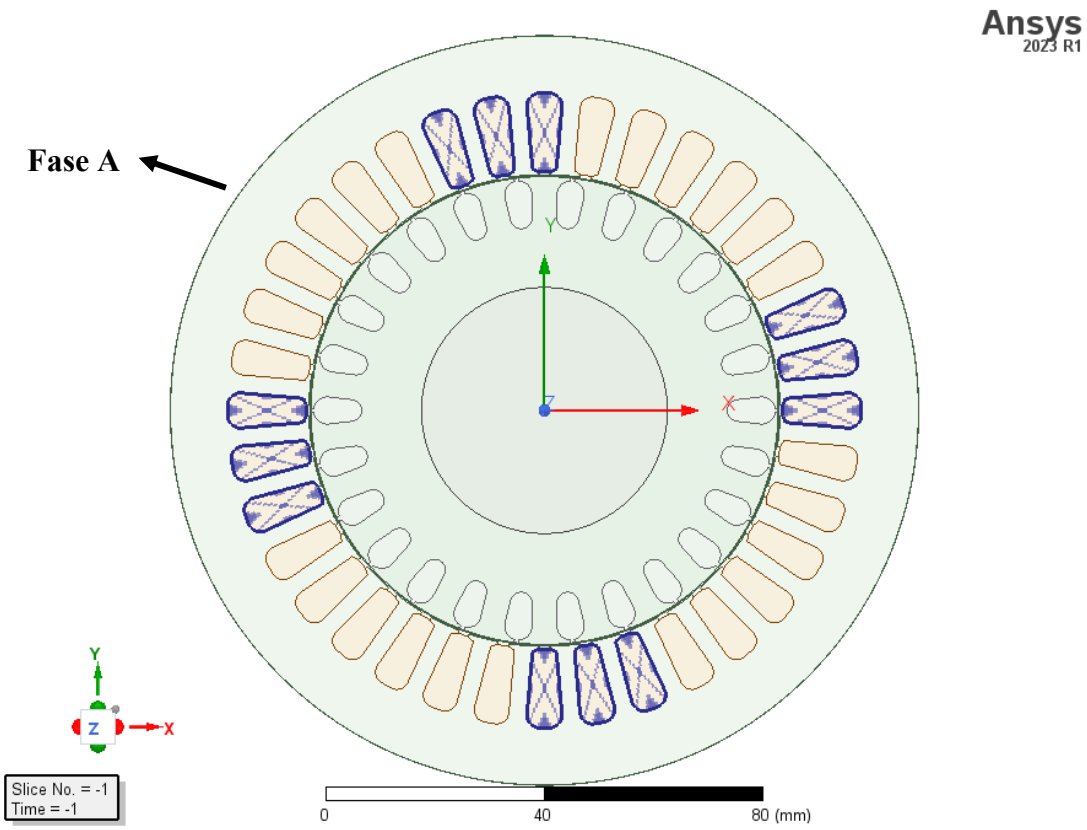


Figura 3.9. Configuración de la fase A del motor de inducción mediante Ansys Maxwell (autoría propia)

A modo de resumen en la Tabla 3.7 se presentan los parámetros utilizados para la asignación de las fases A, B y C del motor de inducción. Cabe destacar que, además de definir el valor RMS del voltaje de fase, esta etapa requiere de intervención manual, ya que es necesario seleccionar individualmente cada una de las ranuras del estator y asignar la fase correspondiente, el polo al que pertenece y la polaridad asociada a cada devanado, ya sea positiva o negativa. Asimismo, las ecuaciones 17-19 se implementan en forma de expresiones dentro del software Ansys Maxwell con el propósito de automatizar parcialmente el procedimiento, permitiendo que cualquier modificación en los parámetros eléctricos actualice automáticamente las variables relacionadas sin necesidad de reajustar manualmente múltiples configuraciones del modelo electromagnético.

Tabla 3.7. Parámetros utilizados para la configuración de las fases A, B y C del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Voltaje RMS de fase	230.9401	V

3.2.4 CONFIGURACIÓN DE LA CONEXIÓN FINAL

En modelos bidimensionales de motores de inducción tipo jaula de ardilla es necesario representar la conexión final (end connection) para representar el efecto eléctrico de los anillos de cortocircuito del rotor, ya que estos se pierden al ser una representación de una sección transversal del motor de inducción, por lo que las partes axiales del rotor como los anillos extremos que interconectan las barras conductoras de la jaula de ardilla, no son representadas geométricamente, perdiendo así este efecto que se presenta en la vida real (ANSYS, Inc, s. f.-c; Climente-Alarcon et al., 2016; Dorrell, 2005; Yamaguchi et al., 2004).

Los anillos de cortocircuito del rotor tienen relación directa con la distribución de corrientes inducidas y con los parámetros eléctricos equivalentes del rotor (Climente-Alarcon et al., 2016; Yamaguchi et al., 2004). De acuerdo con (Pyrhönen et al., 2014), los modelos bidimensionales requieren elementos equivalentes adicionales para representar los efectos longitudinales y las conexiones terminales de los conductores del rotor que no aparecen en la discretización transversal del MEF. Por su parte (Bianchi, 2005) señala que en el análisis mediante MEF de las máquinas de inducción, los anillos de cierre del rotor deben modelarse mediante resistencias e inductancias equivalentes para reproducir adecuadamente el comportamiento de la jaula de ardilla.

En este contexto, en esta sección se incorpora la conexión final para añadir los parámetros equivalentes asociados a los anillos extremos del rotor, compensando así las limitaciones geométricas inherentes de un modelo bidimensional y permitiendo representar el circuito cerrado característico del rotor tipo jaula de ardilla. Para representar la conexión final del motor de inducción en Ansys Maxwell, el software requiere del valor de la resistencia eléctrica del anillo extremo, para encontrar ese valor se utiliza la ecuación 22

(Lipo, 2017).

$$R_{er} = \rho_{er} \frac{\pi(D - h_r)}{A_{er}} \quad (22)$$

Donde R_{er} representa la resistencia eléctrica del anillo extremo (Ω), ρ_{er} representa la resistividad eléctrica del material del anillo extremo (Ωm), D es el diámetro de referencia del rotor (m), h_r representa la altura/profundidad del anillo final (m) y A_{er} representa el área transversal del anillo extremo (m^2). De la ecuación 20 se conoce que D tiene un valor de 85 mm, h_r tiene un valor de 18.3 mm, además de A_{er} de 183.6437 mm^2.

La resistencia eléctrica (ρ_{er}) de materiales conductores como aluminio (material del que están hechas las ranuras del rotor de acuerdo con la Tabla 3.4) o cobre aumenta con la temperatura, por lo que las resistencias del rotor deben corregirse considerando la temperatura real de operación del motor. Esta corrección se realiza mediante una relación lineal entre resistividad y temperatura, utilizada en fuentes bibliográficas sobe el diseño de máquinas eléctricas y el cálculo de resistencia de barras y anillos de cortocircuito del rotor (Lipo, 2017; Pyrhönen et al., 2014).

$$\rho_{er} = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20°C)] \quad (23)$$

Donde ρ_{er} representa la resistividad del rotor a temperatura de operación (Ωm), ρ_{20} representa a la resistividad del material a 20°C (Ωm), α es el coeficiente térmico de resistividad y T es la temperatura de trabajo del rotor ($°C$).

La temperatura de 20°C se utiliza como referencia debido a que constituye el estándar internacional empleado para reportar propiedades eléctricas de conductores metálicos (ASTM International, 2002). De acuerdo con (Lide, 2000), la resistividad del aluminio a 20°C es de aproximadamente $2.650x10^{-8}\ \Omega m$. Asimismo, en (ASTM International, 2002) se obtiene que el coeficiente de térmico de resistividad del aluminio (α) a 20°C es de 0.00377. Finalmente, de acuerdo con la Tabla 3.2, el motor trabaja a una temperatura ambiente de

40°C, además, la norma IEC 60034-1:2004 establece que la temperatura de operación puede evaluarse considerando la suma de la temperatura ambiente de referencia y el incremento térmico correspondiente (International Electrotechnical Commission, 2004), en este sentido, se considera un incremento térmico de 40°C, por lo tanto, se tiene que T resulta de la suma de la temperatura ambiente y del incremento térmico del motor dando un total de 80°C. Sustituyendo estos datos en la ecuación 23 se tiene que:

$$\rho_{er} = 2.650x10^{-8}\ \Omega m[1 + 0.00377(80°C - 20°C)]$$

$$\rho_{er} \approx 3.2494x10^{-8}\ \Omega m$$

Sustituyendo el valor de ρ_{er} y demás valores ya conocidos en la ecuación 22 se tiene que:

$$R_{er} = 3.2494x10^{-8}\ \Omega m \frac{\pi(0.085\ m - 0.0183m)}{0.000183647\ m^2}$$

$$R_{er} \approx 3.7076x10^{-5}\ \Omega$$

La resistencia eléctrica del anillo extremo calculada con un valor de $3.7076x10^{-5}\ \Omega$ se introduce posteriormente en el software de Ansys Maxwell para representar el efecto eléctrico de los anillos de cortocircuito del rotor mediante la configuración de *end connection* como se muestra en la Figura 3.10. Sin embargo, debido a que el modelo distribuye esta resistencia entre las 26 ranuras presentes en la máquina, el valor ingresado en Maxwell corresponde a la resistencia equivalente por ranura obtenida mediante:

$$\boldsymbol{R_{er,slot} = \frac{3.7076x10^{-5}\ \Omega}{26}}$$

La configuración de conexión final se aplica únicamente a las barras del rotor, ya que estas representan la jaula de ardilla del motor de inducción y requieren la incorporación del efecto eléctrico de los anillos extremos que no son modelados geométricamente en la representación bidimensional del sistema.

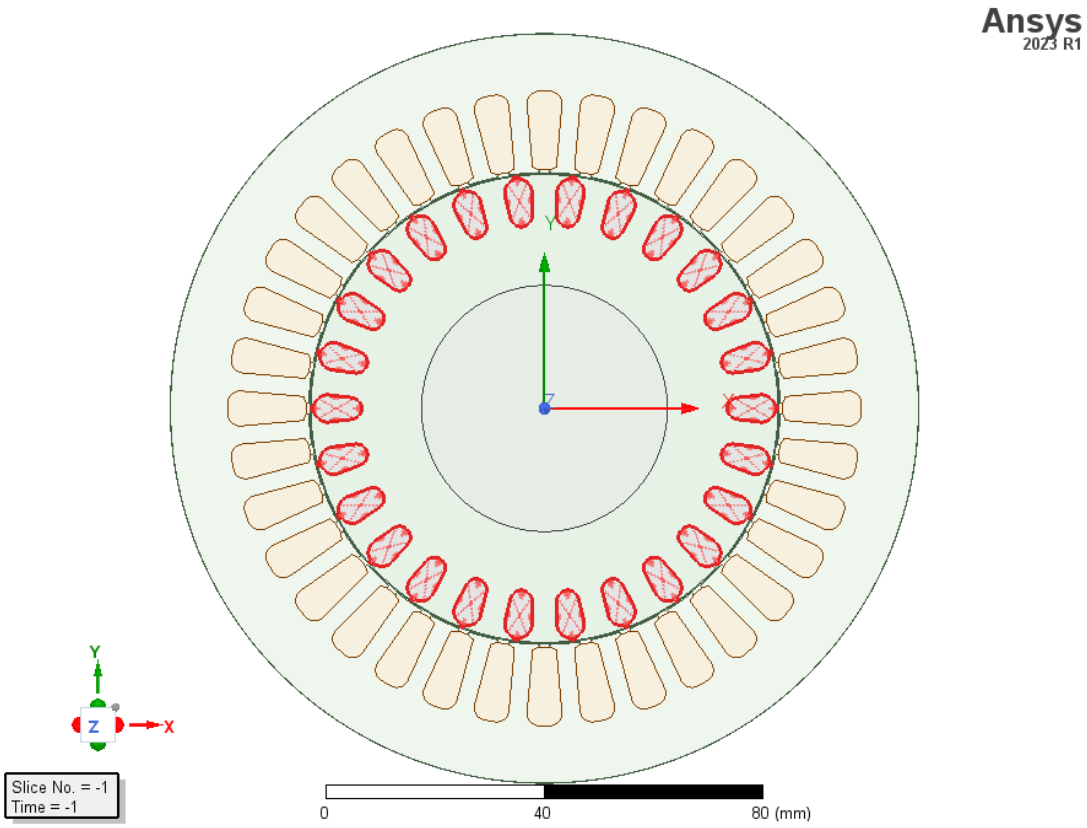


Figura 3.10. Configuración de la conexión final del motor de inducción (autoría propia)

Finalmente, a manera de resumen, la Tabla 3.8 presenta el parámetro empleado para la configuración de la conexión final del motor de inducción. Esta configuración es importante dentro del modelo desarrollado en Ansys Maxwell, ya que permite representar eléctricamente los anillos de cortocircuito del rotor en la simulación bidimensional. Es importante destacar que, si esta condición inicial no es definida, el software no permite ejecutar la simulación transitoria correspondiente.

Tabla 3.8. Parámetros utilizados para la configuración de la conexión final del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Resistencia eléctrica del anillo extremo por barra del rotor	$\frac{3.7076x10^{-5}}{26}$	Ω

3.3 MALLADO Y SOLUCIÓN DE CONFIGURACIÓN

El proceso de mallado representa una etapa indispensable dentro del análisis por MEF, debido a que permite subdividir la geometría del motor de inducción en un conjunto de elementos discretos sobre los cuales se realiza la solución numérica de las ecuaciones de Maxwell (Zienkiewicz et al., 2005). La calidad y densidad de la malla influyen directamente en la precisión de los resultados electromagnéticos obtenidos, especialmente en regiones donde existen elevados gradientes de campo magnético o variaciones bruscas de flujo (Ida & Bastos, 1997). En Ansys Maxwell, la generación de la malla puede realizarse mediante un mallado automático, el cual crea y ajusta los elementos de manera adaptativa dependiendo de la geometría y las condiciones físicas del modelo (ANSYS, Inc, s. f.-d). Este procedimiento permite refinar automáticamente la malla mediante un *slicer*, manteniendo una discretización menos densa en regiones donde el error electromagnético es reducido, optimizando así el tiempo computacional y la estabilidad numérica de la solución (ANSYS, Inc, s. f.-g).

Para el modelo del motor de inducción realizado en el presente trabajo, se asignó una malla automática debido a que este método permite generar una discretización conveniente en el entrehierro, barras del rotor y regiones conductoras sin necesidad de definir manualmente el tamaño de cada elemento. Adicionalmente, se implementó la operación denominada "*Cylindrical Gap Treatment*", la cual corresponde a una técnica especial de mallado, empleada en simulaciones transitorias con movimiento rotacional (ANSYS, Inc, s. f.-a). Esta técnica se aplica sobre la región tipo *Band* localizada en el rotor (incluyendo el entrehierro), esto permite generar una malla uniforme y continua en el entrehierro durante el desplazamiento angular del rotor (ANSYS, Inc, s. f.-a). De acuerdo con la documentación oficial de Ansys Maxwell, el *Cylindrical Gap* mejora la calidad de los elementos en regiones cilíndricas estrechas, como el entrehierro, evitando distorsiones en la malla conforme el rotor cambia de posición, debido a que la malla se va actualizando conforme el rotor va rotando, de esta manera se facilita la transferencia adecuada de campos electromagnéticos entre las partes móviles y estacionarias de la máquina (ANSYS, Inc, s. f.-a, s. f.-e).

Respecto al proceso de convergencia, en Maxwell no se emplea una herramienta de

convergencia independiente como ocurre en otros softwares de simulación numérica, sino que esta se encuentra integrada implícitamente dentro del solucionador adaptativo del MEF. Durante el proceso iterativo, el software resuelve las ecuaciones de Maxwell (véase la Tabla 2.1) sobre la malla generada y evalúa continuamente el comportamiento de las variables electromagnéticas, particularmente en regiones donde existen gradientes elevados de densidad de flujo magnético, intensidad de campo o corrientes inducidas (ANSYS, Inc, s. f.-g). Cuando el solucionador detecta variables abruptas, errores numéricos elevados o inestabilidades entre iteraciones consecutivas, la simulación puede detenerse automáticamente debido a problemas de convergencia numérica o dificultades pata obtener una solución físicamente estable (ANSYS, Inc, s. f.-g; Zienkiewicz et al., 2005). Esto ocurre porque el sistema algebraico derivado del MEF deja de satisfacer los criterios internos de estabilidad y resolución del solucionador.

Asimismo, Maxwell monitorea internamente la calidad de la solución y la distribución del error numérico durante el refinamiento adaptativo de la malla (ANSYS, Inc, s. f.-g). Por ello, aunque el software permite configurar parámetros explícitos como el porcentaje de error o el número de pasos adaptativos, gran parte del proceso de convergencia y refinamiento es realizado automáticamente por el solucionador (ANSYS, Inc, s. f.-g). De acuerdo con (Zienkiewicz et al., 2005), en el MEF, regiones con gradientes elevados o discontinuidades físicas pueden provocar dificultades de convergencia debido al incremento del error de aproximación entre elementos adyacentes.

En la Figura 3.11 se muestra gráficamente el mallado del motor de inducción en Ansys Maxwell, como se observa, los elementos que se utilizan son de tipo triangulares y existe un refinamiento de la malla en el rotor, debido al *Cylindrical Gap* implementado, ya que esa región (junto con el entrehierro) es la de mayor interés en este trabajo. Se implementó una malla automática estándar, para evitar mayor tiempo de procesamiento y mayor costo computacional. A su vez, los únicos parámetros que requiere el software es la profundidad del rotor (en mm) y el número de pasos adaptativos, además, se tiene que la profundidad del rotor es de 75 mm, mientras que se configuró un total de 4096 pasos adaptativos tomando muestras cada 1 ms.

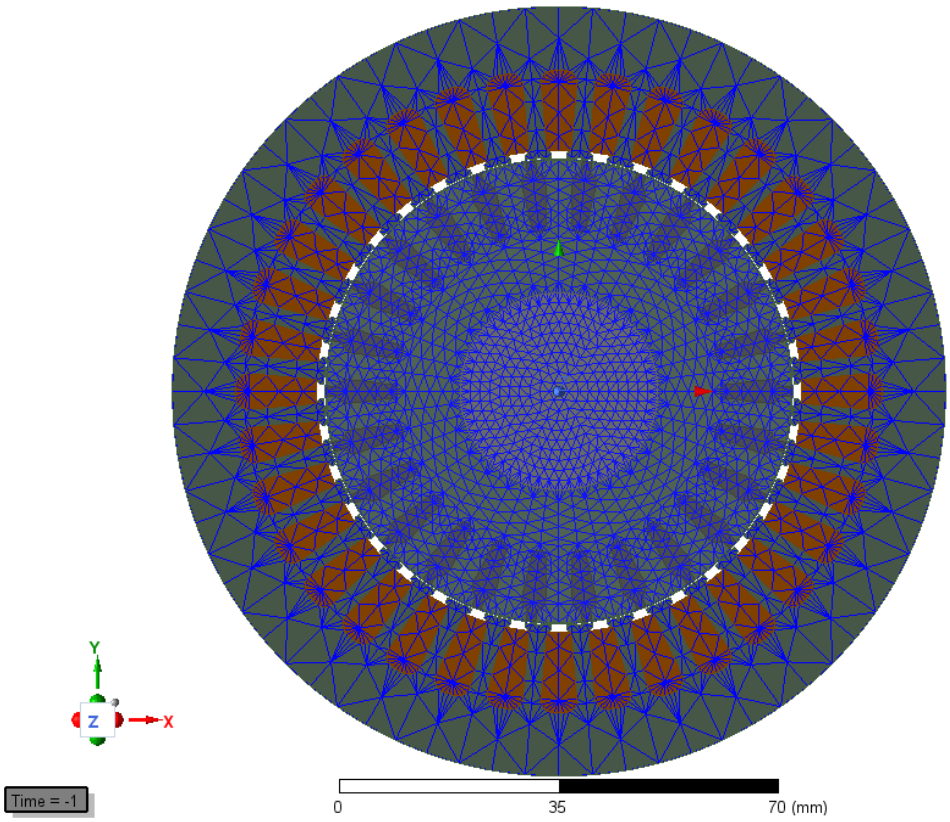


Figura 3.11. Mallado del modelo del motor de inducción (autoría propia)

A modo de resumen, la Tabla 3.9 presenta los parámetros utilizados para el mallado del motor de inducción, así como para la configuración de solución del modelo. Es importante mencionar que la configuración de solución se determina una vez se haya realizado el mallado del motor.

Tabla 3.9. Parámetros utilizados para el mallado y configuración de solución del motor de inducción en Ansys Maxwell (autoría propia)

Característica	Valor	Unidad
Profundidad del rotor	75	mm
Pasos adaptativos de la solución	4096	----
Tiempo de toma de muestras	1	ms

3.4 CONFIGURACIÓN DE LA FALLA DE EXCENTRICIDAD MIXTA

La excentricidad en motores de inducción corresponde a una condición de desalienación entre eje del rotor y el estator que provoca una distribución no uniforme del entrehierro. Esta condición modifica el comportamiento electromagnético de la máquina debido a las variaciones espaciales del flujo magnético, generando alteraciones en las corrientes inducidas, fuerzas electromagnéticas asimétricas y componentes armónicas características en las señales eléctricas del motor (Alimardani et al., 2025; Nandi et al., 2005). Las fallas de excentricidad se clasifican como estática, dinámica y mixta, sin embargo, diversos estudios reportan que en condiciones reales de operación las excentricidades estática y dinámica rara vez se presentan de manera aislada, sino que normalmente aparecen de manera simultánea, dando lugar a una condición de excentricidad mixta (Alimardani et al., 2025; Nandi et al., 2005; Thomson & Fenger, 2001).

Debido a lo anterior, en el presente trabajo únicamente se implementa la condición de excentricidad mixta dentro del modelo electromagnético del motor de inducción, ya que esta representa la forma más adecuada de comportamiento observado en motores de inducción reales con falla de excentricidad. Para realizar la configuración de la excentricidad mixta, inicialmente se configura la excentricidad estática. Este procedimiento se realiza desplazando únicamente el estator una distancia de 0.2 mm sobre el eje *x*, manteniendo sin modificación el resto de los componentes del sistema.

Posteriormente, sobre el mismo plano geométrico previamente modificado con la excentricidad estática, se induce la excentricidad dinámica. Para ello, se desplaza el rotor con todos sus componentes junto con el eje del motor una distancia de 0.1 mm sobre el eje *x* y 0.09 mm sobre el eje *y*, manteniendo sin alteración el resto de la geometría del modelo. De esta manera, la combinación secuencial de ambas configuraciones permite generar una condición de excentricidad mixta dentro del modelo del motor de inducción. En la literatura se menciona que la excentricidad mixta afecta directamente a la distribución del flujo magnético de la máquina, produciendo componentes armónicas asociadas a defectos mecánicos que pueden ser analizados posteriormente mediante técnicas de diagnóstico de fallas (Thomson & Fenger, 2001).

En la Figura 3.12 se presenta la configuración correspondiente a la falla de excentricidad mixta implementada en el modelo del motor de inducción. Puede observase que el entrehierro no mantiene una separación uniforme a lo largo de toda la circunferencia de la máquina, ya que en el lado derecho del modelo se aprecia una región más angosta en comparación con el lado izquierdo. Esta variación geométrica del entrehierro se debe al desplazamiento aplicado principalmente sobre el eje *x* durante la inducción de las excentricidades estática y dinámica, provocando así una distribución asimétrica entre el rotor y el estator.

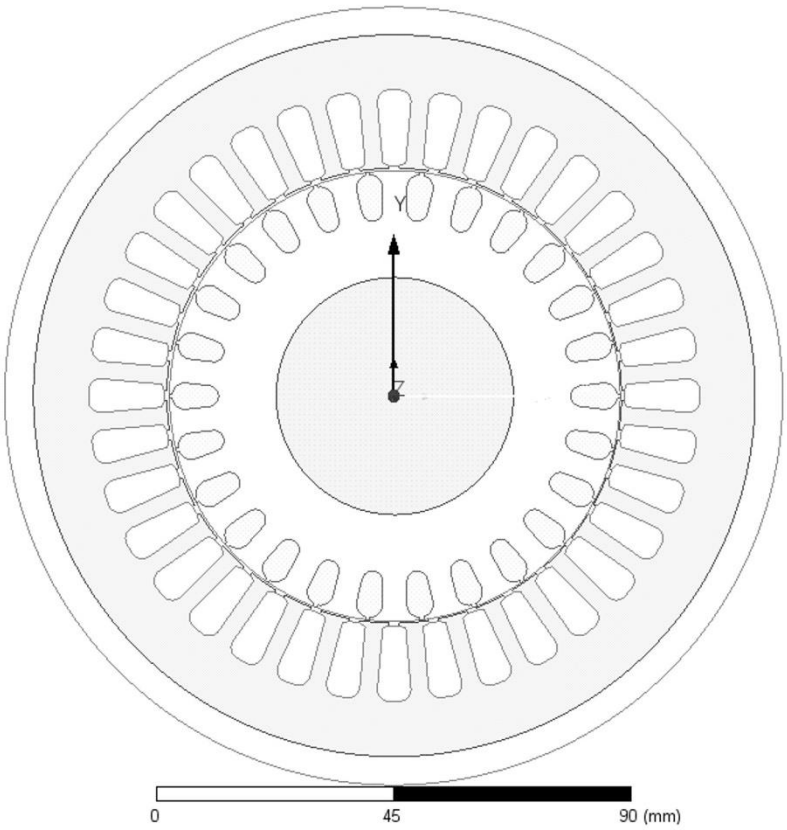


Figura 3.12. Configuración de la falla de excentricidad mixta en el motor de inducción (autoría propia)

Debido a que el entrehierro del motor posee una separación muy reducida (0.4 mm), la variación geométrica provocada por la excentricidad mixta no puede apreciarse a simple vista en la geometría general del modelo. Por esta razón, en la Figura 3.13 se presenta un acercamiento a la región donde la excentricidad resulta más visible. En dicha figura puede

observarse que, sobre el eje *x*, el rotor se encuentra más próximo al estator, ocasionando una disminución del área correspondiente al entrehierro. En contraste, sobre el eje *y* se aprecia una separación mayor entre ambos componentes, generando una región con mayor presencia de aire. Esta distribución asimétrica de entrehierro corresponde a una condición de excentricidad mixta y produce una alteración en la distribución espacial del flujo magnético dentro de la máquina.

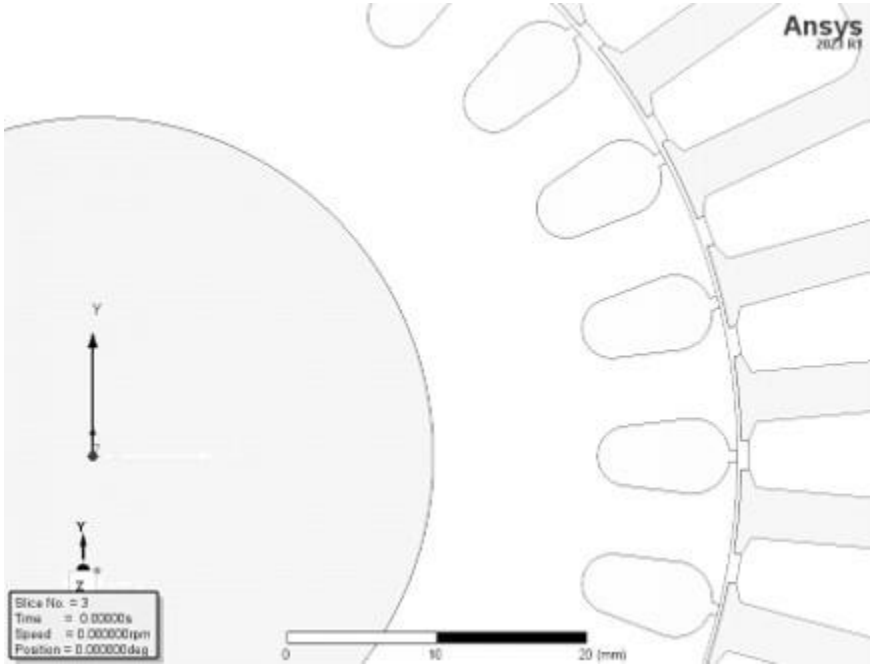


Figura 3.13. Acercamiento a la configuración de la falla de excentricidad mixta en el motor de inducción (autoría propia)

3.5 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las señales de corriente obtenidas mediante simulación y de forma experimental fueron procesadas en el dominio de la frecuencia para identificar las componentes asociadas con la falla de excentricidad mixta, el procesamiento se realizó en el lenguaje de programación Python con el entorno Spyder, por ello, se muestra un diagrama de la metodología seguida para el procesamiento de las señales (véase la Figura 3.14), en donde se aplicó la misma lógica tanto para las señales obtenidas mediante simulación como aquellas obtenidas de manera experimental.

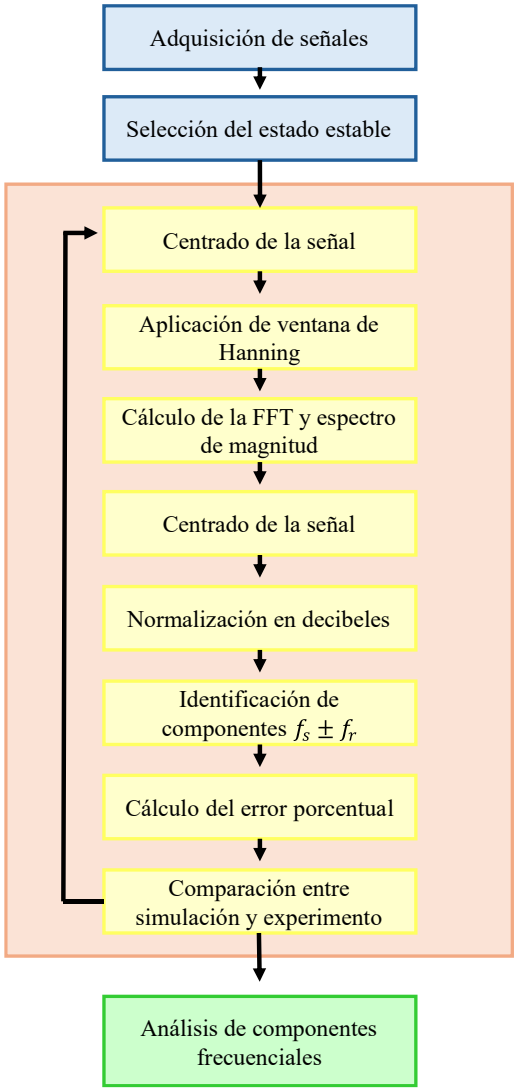


Figura 3.14. Metodología para el procesamiento de señales y aplicación de la FFT (autoría propia)

Es importante mencionar que, hasta este punto se deben tener ya construidas las bases de datos necesarias para el procesamiento mediante la adquisición de las señales. En primer lugar, se seleccionó la región en estado estable de cada señal y posteriormente se aplicó un centrado respecto al valor medio para eliminar la componente DC, debido a que un desplazamiento de la señal respecto al cero puede generar una componente dominante de 0 Hz dentro del espectro, la cual no aporta información útil para el análisis de la falla. Para el centrado de la señal se utilizó la ecuación 24.

$$x_c[n] = x[n] - \bar{x} \quad (24)$$

Donde $x[n]$ representa a la señal original en el dominio del tiempo, $\bar{x}$ es el valor medio de dicha señal y $x_c[n]$ es la señal centrada. De esta manera, la señal conserva sus variaciones de corriente, pero se elimina el desplazamiento promedio que pudiera afectar el espectro.

Después del centrado, se aplicó una ventana de Hanning a la señal. Esta etapa se utiliza para reducir la fuga espectral, la cual aparece cuando se analiza una señal finita mediante FFT. Debido a que la señal se toma dentro de un intervalo limitado de tiempo, pueden generarse discontinuidades en los extremos de las ventanas de análisis. La ventana Hanning suaviza los extremos de la señal y mejora la representación de las componentes frecuenciales. Una vez acondicionada la señal, se le aplicó la FFT para obtener su representación en el dominio de la frecuencia. En el presente trabajo se analiza únicamente la parte positiva de la señal, ya que para señales reales la información del espectro positivo y negativo es simétrica.

Para comparar adecuadamente las señales simuladas y experimentales, el espectro de magnitud fue normalizado respecto al valor máximo de cada espectro, que en este caso es el valor de la componente fundamental. Esta normalización permite que la componente de mayor amplitud tome un valor de 0 dB, mientras que el resto de las componentes se expresan en función de dicha referencia. La magnitud normalizada en decibeles se obtuvo mediante la ecuación 25.

$$M_{dB}(f) = 20\log_{10}\left(\frac{|X(f)|}{max(|X(f)|)}\right) \quad (25)$$

Donde $|X(f)|$ es la magnitud de la componente frecuencial analizada y $max(|X(f)|)$ corresponde al valor máximo del espectro. Esta representación en decibeles facilita la observación de componentes de menor amplitud, las cuales pueden no ser evidentes en escala

lineal.

Posteriormente se identificaron las componentes frecuenciales asociadas con la falla de excentricidad mixta. En este tipo de falla, como se mencionó anteriormente, se amplifican las componentes frecuenciales $f_s \pm f_r$, que de acuerdo con la teoría y para este caso en específico, $f_s + f_r$ se encuentra en 74.16 Hz y $f_s - f_r$ se encuentra en 25.83 Hz. Estos valores se obtienen de sumar o restar f_r, que de acuerdo con la ecuación 5, la frecuencia rotacional tiene un valor de 24.16 Hz, al valor de la componente fundamental f_s y que para este caso es de 50 Hz.

Para evaluar la similitud entre los resultados obtenidos por simulación y los obtenidos experimentalmente, se calculó el error porcentual entre las frecuencias identificadas en ambos espectros. Este error permite cuantificar qué tan cercana es la frecuencia detectada en la simulación respecto a la frecuencia obtenida en la señal experimental. El cálculo se realizó mediante la ecuación 26.

$$\%E_f = \left| \frac{f_{sim} - f_{exp}}{f_{exp}} \right| \times 100 \qquad (26)$$

Donde f_{sim} es la frecuencia identificada en la señal simulada y f_{exp} es la frecuencia identificada en la señal experimental, esto tanto para $f_s + f_r$ como para $f_s - f_r$. El uso del valor absoluto permite considerar únicamente la magnitud de la diferencia, sin importar si la frecuencia simulada se encuentra por encima o por debajo de la experimental.

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del modelo bidimensional desarrollado en Ansys Maxwell para el motor de inducción en estado sano y con falla de excentricidad mixta. Para cada condición de operación se obtuvieron señales de corriente correspondientes a diferentes niveles de carga, con el fin de analizar el efecto de la carga sobre el espectro de frecuencia del motor de inducción estudiado bajo dos condiciones de operación.

A partir de estas señales se aplicó el análisis en el dominio de la frecuencia, lo que permitió observar el comportamiento de las componentes frecuenciales asociadas a la operación en estado sano del motor y a la presencia de excentricidad mixta. Las gráficas que se presentan muestran los espectros de frecuencia obtenidos en las simulaciones, así como los obtenidos en la puesta experimental, permitiendo comparar la respuesta del motor en estado sano y con falla, así como identificar la influencia del nivel de carga en la amplitud de las componentes características de falla.

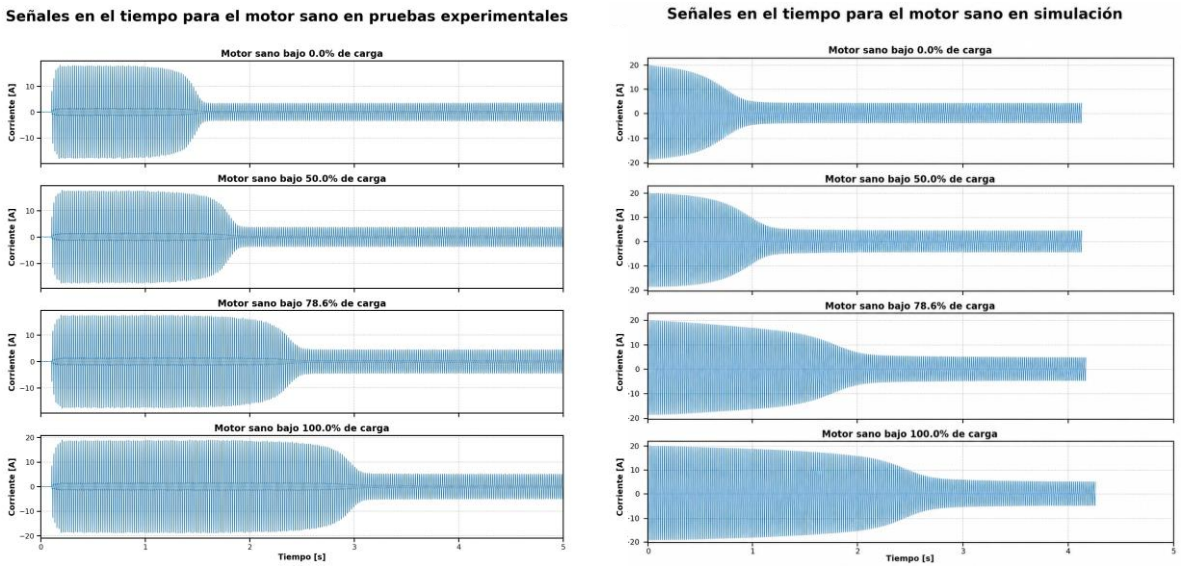
4.1 SEÑALES EN EL TIEMPO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el dominio del tiempo, tanto para las señales generadas mediante simulación como para las adquiridas experimentalmente. El propósito de esta comparación es observar el comportamiento temporal de las señales en cada condición analizada.

Es importante señalar que, por sí sola, una señal en el dominio del tiempo no proporciona información suficiente para determinar la presencia o ausencia de una falla en un motor de inducción. Por esta razón, las gráficas mostradas en esta sección se utilizan únicamente como una comparación visual entre las señales simuladas y experimentales, sin realizar un análisis directo o diagnóstico sobre ellas.

4.1.1 MOTOR DE INDUCCIÓN EN CONDICIÓN SANO

En la Figura 4.1 se presentan las señales de corriente en el dominio del tiempo correspondientes al motor de inducción en estado sano, considerando tanto los resultados obtenidos experimentalmente como los generados mediante simulación en Ansys Maxwell. De manera general, se observa una similitud visual en la forma de las señales simuladas y experimentales para las distintas condiciones de carga analizadas. Asimismo, se aprecia que el tiempo requerido para alcanzar el estado estable varía conforme se modifica el nivel de carga.



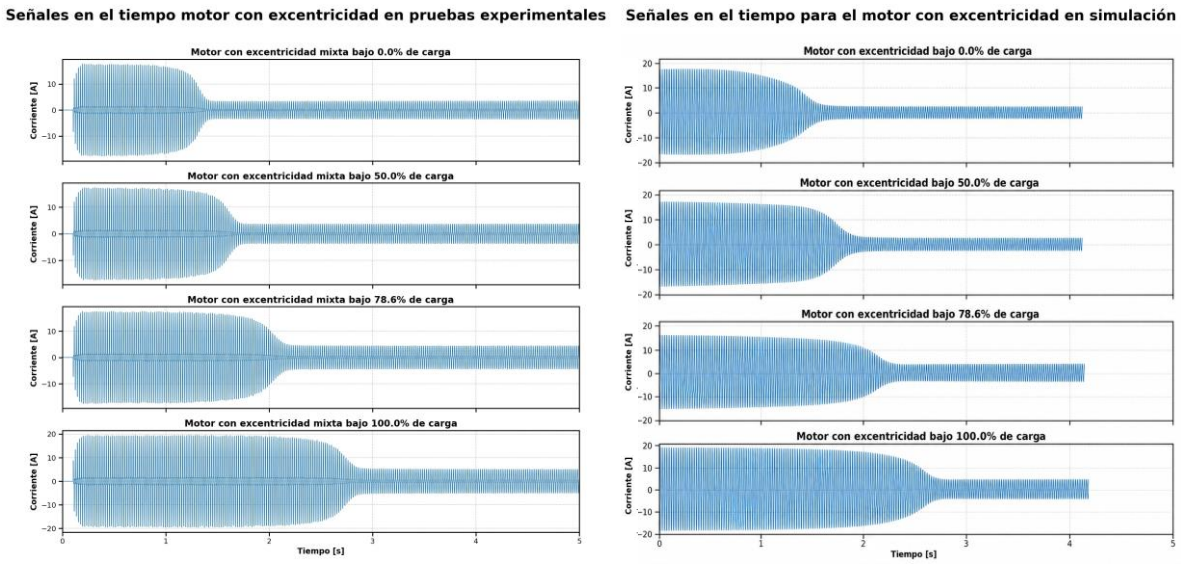
a) b)

Figura 4.1. Señales en el tiempo del motor sano con diferentes niveles de carga en: a) pruebas experimentales y b) pruebas simuladas en Ansys Maxwell (autoría propia)

4.1.2 MOTOR DE INDUCCIÓN CON FALLA DE EXCENTRICIDAD MIXTA

Por su parte, en la Figura 4.2 se presentan las señales en el tiempo del motor de inducción con falla de excentricidad mixta, obtenidas mediante simulación en Ansys Maxwell y en pruebas experimentales. De manera general, se observa que las señales presentan un comportamiento similar entre ambos casos. De la misma manera que en el caso del motor en estado sano, se observa que el tiempo de establecimiento cambia conforme aumenta la carga

aplicada al motor, por lo que, las gráficas temporales no aportan información suficiente para saber si el motor presenta falla u opera en estado sano, ya que a simple vista las señales se observan muy similares en todos los casos (comparando mismos niveles de carga).



a) b)

Figura 4.2. Señales en el tiempo del motor con excentricidad mixta con diferentes niveles de carga en: a) pruebas experimentales y b) pruebas simuladas en Ansys Maxwell (autoría propia)

4.2 FFT EN SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis en el dominio de la frecuencia de las señales de corriente generadas mediante el modelo bidimensional del motor de inducción en Ansys Maxwell. Para ello, se aplicó la FFT a las señales simuladas correspondientes a distintos niveles de carga, tanto en condición sano como en presencia de falla de excentricidad mixta. Las gráficas incluidas permiten observar el comportamiento espectral del motor bajo diferentes escenarios de operación, considerando las comparaciones entre las cuatro cargas en estado sano, las cuatro cargas bajo condición de falla y la comparación entre el estado sano y el estado con excentricidad mixta para cada nivel de carga. A partir de estos resultados se busca identificar la variación de las componentes

frecuenciales asociadas a la falla, así como analizar la influencia de la carga sobre la amplitud de dichas componentes en las señales de simulación.

4.2.1 FFT CONDICIÓN DE EXCENTRICIDAD MIXTA

En la Figura 4.3 se presentan los espectros de frecuencia obtenidos de las señales de corriente simuladas del motor de inducción con falla de excentricidad mixta bajo diferentes niveles de carga. En todos los casos se observa la componente fundamental de alimentación f_s, ubicada en 50 Hz, la cual presenta la mayor magnitud del espectro debido a que corresponde a la frecuencia principal de operación del motor. Asimismo, se identifican las bandas laterales asociadas a la excentricidad mixta, ubicadas en $f_s \pm f_r$, y que, de acuerdo con la teoría, $f_s - f_r$ se presenta en 25.8 Hz y $f_s + f_r$ se presenta en 74.1 Hz.

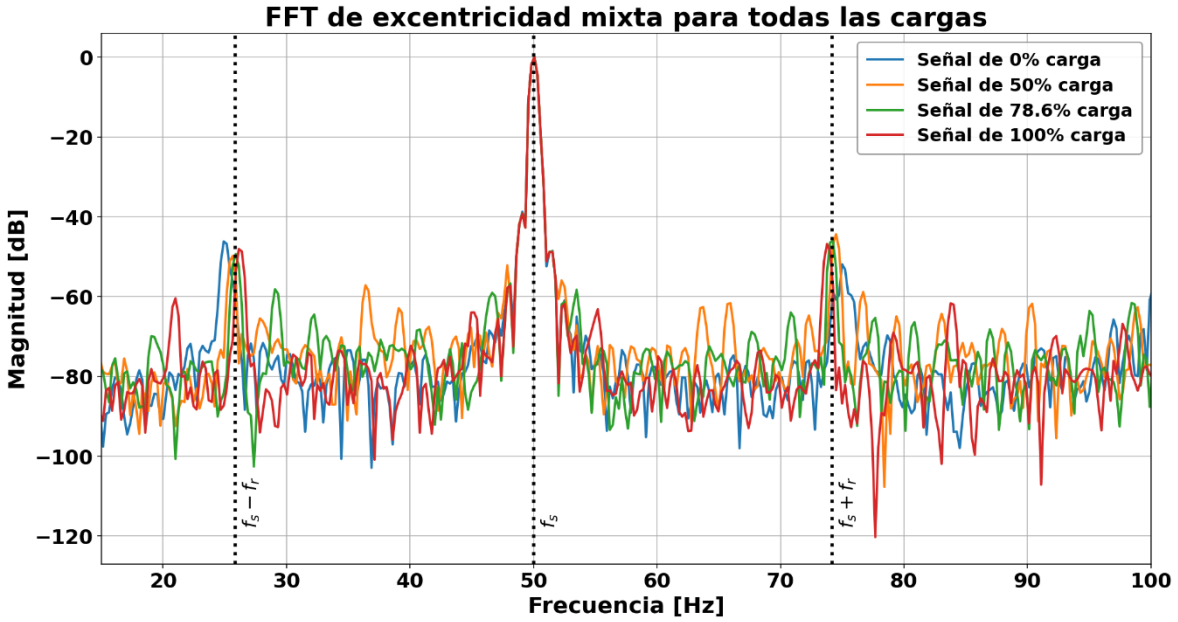


Figura 4.3. Espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor con excentricidad mixta bajo diferentes niveles de carga (autoría propia)

A partir de la comparación entre los distintos niveles de carga, se aprecia que las componentes relacionadas con la falla se mantienen presentes en todas las condiciones de operación. Sin embargo, su magnitud presenta variaciones dependiendo del nivel de carga aplicado. La componente $f_s + f_r$ muestra una amplificación más evidente y un

comportamiento relativamente similar entre las señales de 50%, 78.6% y 100% de carga, mientras que la señal sin carga presenta una magnitud ligeramente menor en esta zona. En el caso de la componente $f_s - f_r$, también se observa un incremento de magnitud.

Este comportamiento se atribuye a que la falla de excentricidad mixta modifica la distribución del entrehierro entre el rotor y el estator, generando variaciones en el campo magnético que se reflejan como componentes frecuenciales alrededor de la frecuencia fundamental. Además, el nivel de carga influye en el deslizamiento y en la velocidad del rotor, lo que puede modificar tanto la posición como la magnitud de las bandas laterales asociadas a la falla. Por ello, las diferencias observadas entre las cargas indican que la severidad de las componentes de excentricidad no depende únicamente de la falla, sino también de las condiciones de operación del motor.

4.2.2 FFT CONDICIÓN ESTADO SANO

En la Figura 4.4 se muestran los espectros de frecuencia obtenidos de las señales de corriente simuladas del motor de inducción en estado sano bajo diferentes niveles de carga. En todos los casos se identifica la componente frecuencial f_s, ubicada en 50 Hz. Al tratarse de un modelo en estado sano, no se observa una amplificación definida de las componentes $f_s \pm f_r$, por lo que no se presenta un patrón frecuencial asociado directamente a la falla de excentricidad mixta.

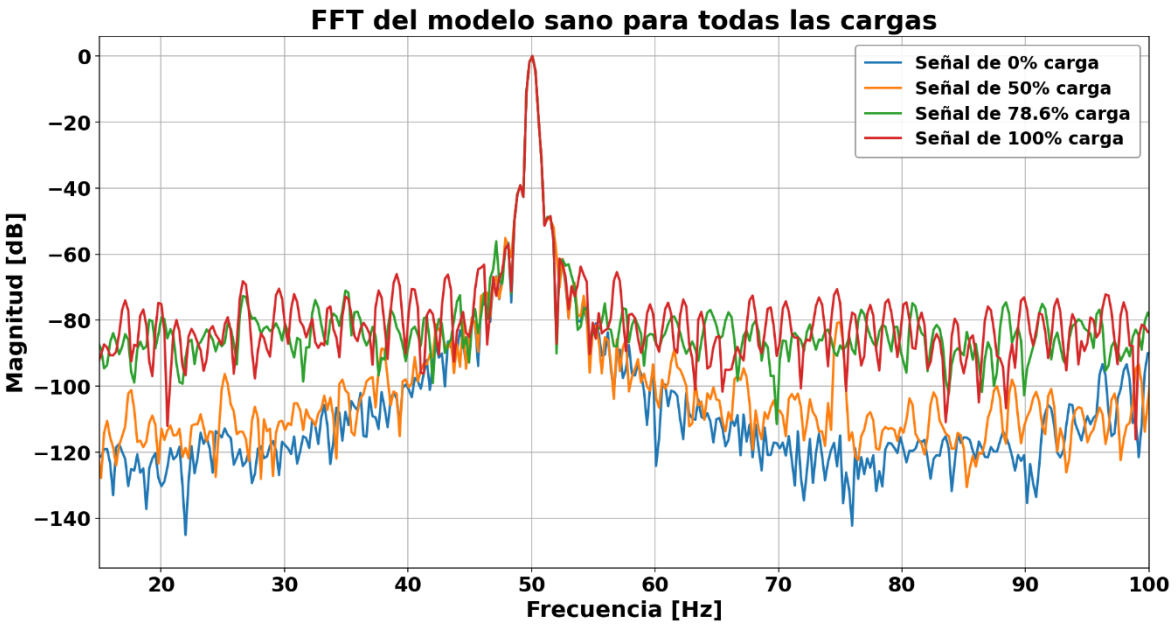


Figura 4.4. Espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano bajo diferentes niveles de carga (autoría propia)

Uno de los aspectos más relevantes que se observan en la Figura 4.4 es que el nivel de carga modifica la magnitud general del espectro de la señal. Este efecto se observa principalmente a partir de cargas superiores al 50%, ya que las señales correspondientes a 78.6% y 100% de carga presentan niveles de magnitud más altos en gran parte del intervalo de frecuencia analizado, en comparación con las señales de 0% y 50% de carga. Esto indica que, aun en ausencia de falla, el incremento de carga influye en el contenido frecuencial de la corriente simulada.

El comportamiento observado se puede atribuir a que, al aumentar la carga mecánica aplicada al motor, también se incrementa la corriente demandada por la máquina y se modifican las variables de operación. Como consecuencia, la señal de corriente presenta mayor contenido energético y un incremento en la magnitud de distintas componentes del espectro. Por esta razón, la carga debe considerarse como una variable importante en el análisis frecuencial, ya que puede modificar la amplitud de las señales incluso cuando el motor se encuentra en estado sano.

4.2.3 COMPARATIVA FFT EXCENTRICIDAD MIXTA EN ESTADO SANO

En esta sección se observan las comparaciones entre los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor de inducción en estado sano y con falla de excentricidad mixta, considerando distintos niveles de carga. Estas gráficas permiten observar de manera directa el efecto de la falla sobre la respuesta frecuencial del motor, principalmente en las componentes laterales ubicadas alrededor de la frecuencia fundamental; en particular, se analizan las componentes de excentricidad $f_s \pm f_r$. La comparación por nivel de carga permite identificar cómo la magnitud de estas componentes varía no solo por la presencia de la falla, sino también por la condición de carga mecánica aplicada a la máquina.

Para analizar la comparación entre el modelo en estado sano y con falla de excentricidad mixta con 0% de carga mecánica, se muestra la Figura 4.5; en donde se observa que en ambos espectros la componente fundamental está en 50 Hz; sin embargo, la señal con excentricidad mixta presenta una magnitud mayor en prácticamente todo el intervalo de frecuencia analizado. Además, se identifican incrementos claros en las componentes $f_s \pm f_r$, las cuales se encuentran amplificadas respecto al espectro del motor en estado sano. Esta diferencia indica que, aun sin carga aplicada, la excentricidad mixta genera una alteración en el entrehierro que modifica el campo magnético del motor y se refleja en la aparición de componentes frecuenciales alrededor de la frecuencia de alimentación.

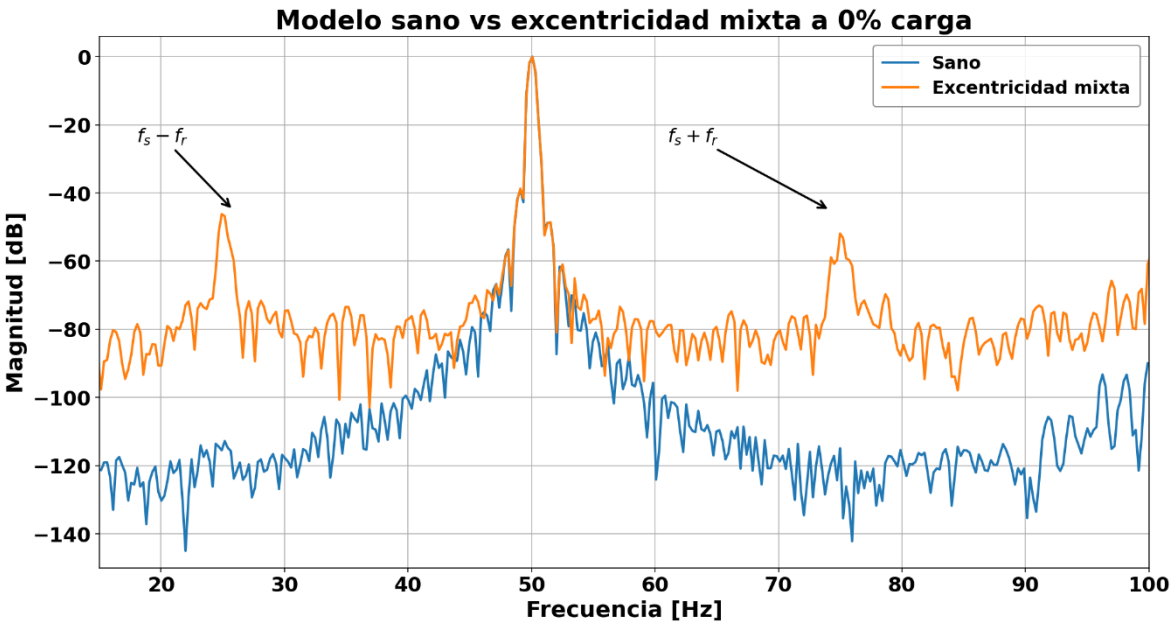


Figura 4.5. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 0% de carga (autoría propia)

En la Figura 4.6 se presenta la comparación correspondiente al 50% de carga. De forma similar al caso sin carga, la señal con excentricidad mixta muestra mayores magnitudes que la señal en estado sano, principalmente en zonas cercanas a las componentes $f_s \pm f_r$. En esta condición, ambas componentes asociadas a la falla continúan siendo visibles. Este comportamiento puede estar relacionado con el incremento de carga, ya que, al aumentar el par requerido por el motor, también se modifica el deslizamiento y la interacción entre los campos magnéticos. Como resultado, las componentes frecuenciales asociadas a la excentricidad mixta pueden variar en magnitud respecto a la condición de operación sin carga.

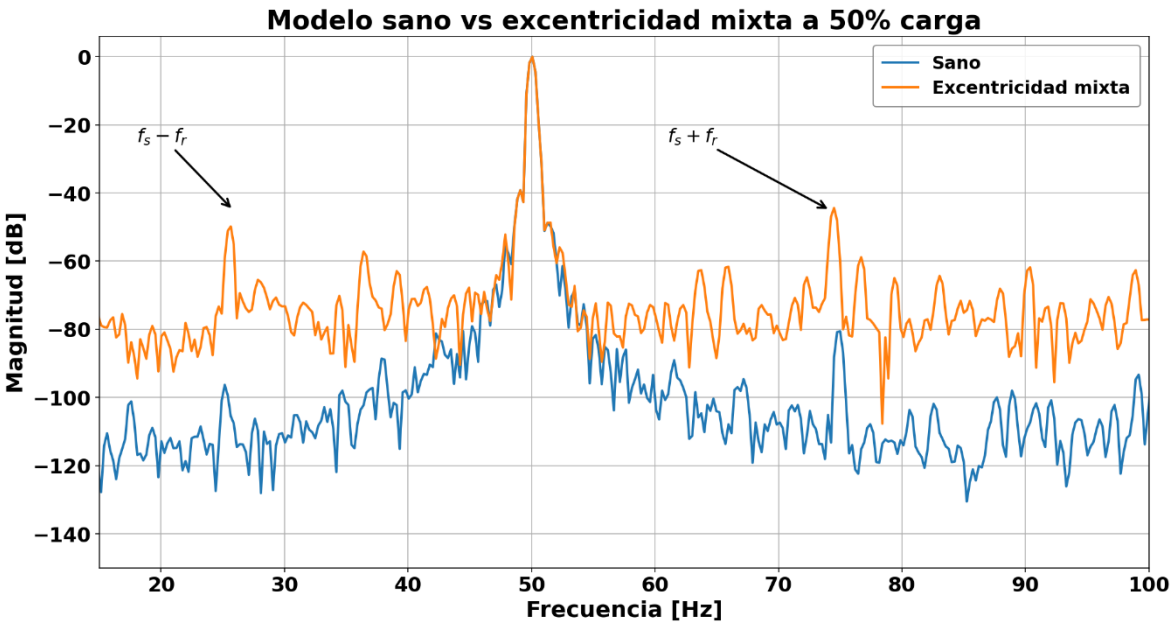


Figura 4.6. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 50% de carga (autoría propia)

A su vez, en la Figura 4.7 se muestra la comparación entre el estado sano y el estado de operación del motor con falla de excentricidad mixta para 78.6% de carga. En este caso, se observa que la diferencia general entre ambos espectros disminuye en comparación con las condiciones de 0% y 50% de carga, debido a que el espectro de corriente del motor en estado sano presenta un incremento de magnitud asociado al aumento de carga. A pesar de ello, la señal de excentricidad mixta conserva incrementos de magnitud localizados en las componentes características de la falla ($f_s \pm f_r$), lo que permite distinguir claramente la presencia de la falla en el motor de inducción. Este resultado demuestra que, conforme se aumenta la carga, el espectro del motor sano también se modifica.

Con esta comparación se reafirma que en cargas superiores al 50%, la magnitud de la señal de corriente en el espectro en frecuencia del motor de inducción en estado sano aumenta, resultando similar al espectro que se genera cuando el motor trabaja bajo falla de excentricidad mixta, la diferencia son las componentes asociadas con la falla, ya que estas son se amplifican en presencia de la excentricidad.

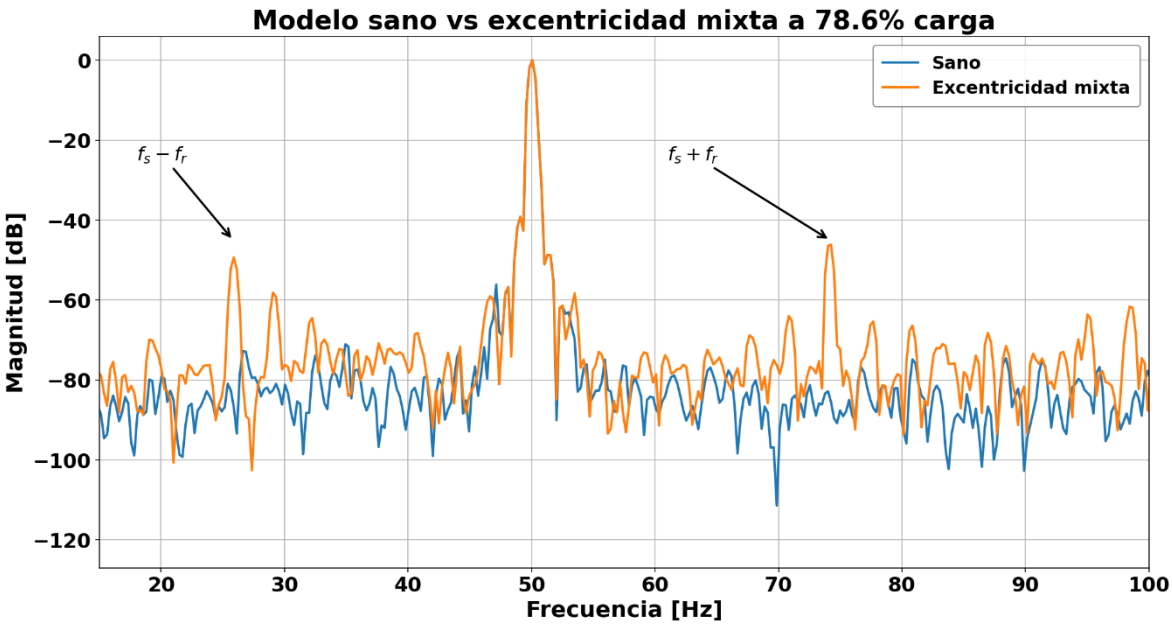


Figura 4.7. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 78.6% de carga (autoría propia)

Finalmente, en la Figura 4.8 se presenta la comparación correspondiente al 100% de carga. En esta condición, los espectros del motor sano y del motor con excentricidad mixta presentan niveles de magnitud más similares en gran parte del intervalo analizado. Sin embargo, las componentes asociadas a la falla continúan destacándose en la señal con excentricidad mixta, especialmente en comparación con la señal sana en las mismas frecuencias. Esto indica que, aunque la carga nominal incrementa el contenido frecuencial general de la señal en estado sano y puede reducir visualmente la diferencia entre ambas condiciones, las bandas laterales asociadas a la excentricidad siguen siendo identificables.

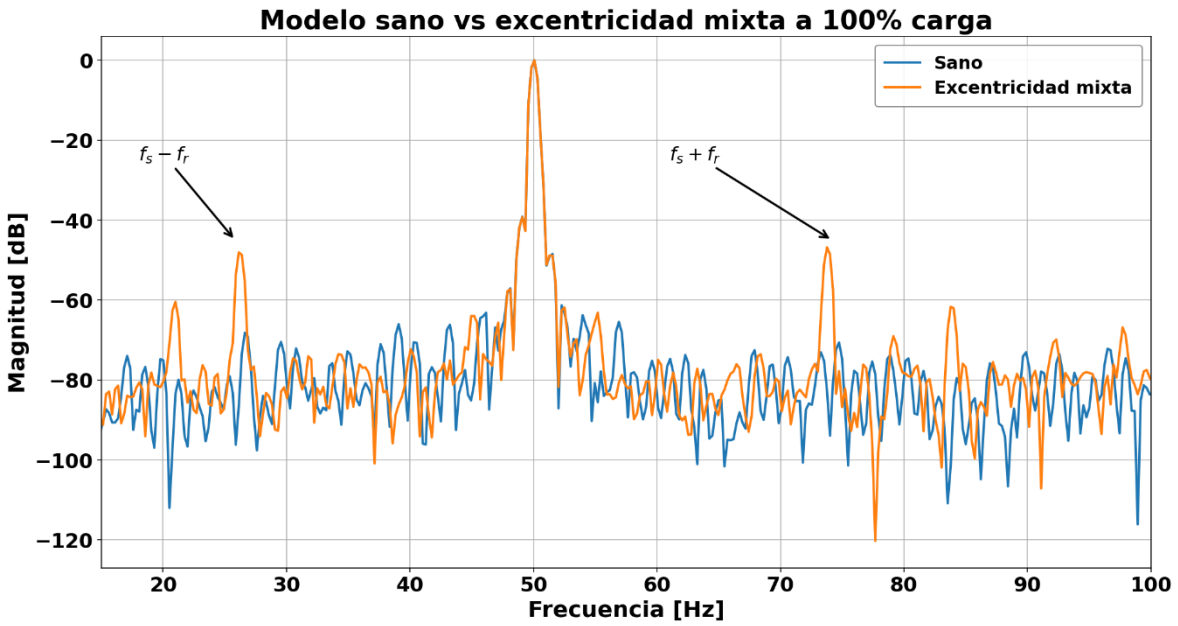


Figura 4.8. Comparación de los espectros de frecuencia de las señales de corriente simuladas del motor en estado sano y con excentricidad mixta con 100% de carga (autoría propia)

De manera general, las comparaciones muestran que la falla de excentricidad mixta produce una amplificación de las componentes frecuenciales $f_s \pm f_r$, validando lo que se menciona en el estado del arte, en donde se afirma que estas son las componentes frecuenciales asociadas a la falla de excentricidad mixta. La amplificación de estas componentes se observa en todos los niveles de carga analizados, lo que confirma que la alteración del entrehierro generada por la excentricidad mixta modifica la respuesta frecuencial de la corriente simulada. No obstante, también se aprecia que la carga mecánica aplicada influye de manera considerable en la magnitud del espectro, incluso en el motor operando en estado sano. Este efecto es más evidente en las cargas altas, donde el nivel general de la señal sana aumenta y puede acercarse al comportamiento observado en la condición con falla.

En base a lo anterior, los resultados sugieren que la carga es una variable que debe considerarse en el diagnóstico de fallas por excentricidad mixta, ya que puede modificar la amplitud de las componentes frecuenciales asociadas a la falla y afectar la diferencia observada entre una condición sana y una condición con falla. En particular, las cargas bajas

permiten distinguir con mayor claridad el incremento de la magnitud producido por la excentricidad mixta, mientras que en cargas elevadas la comparación requiere un análisis más específico de las frecuencias características, debido al aumento general del contenido espectral del motor en estado sano.

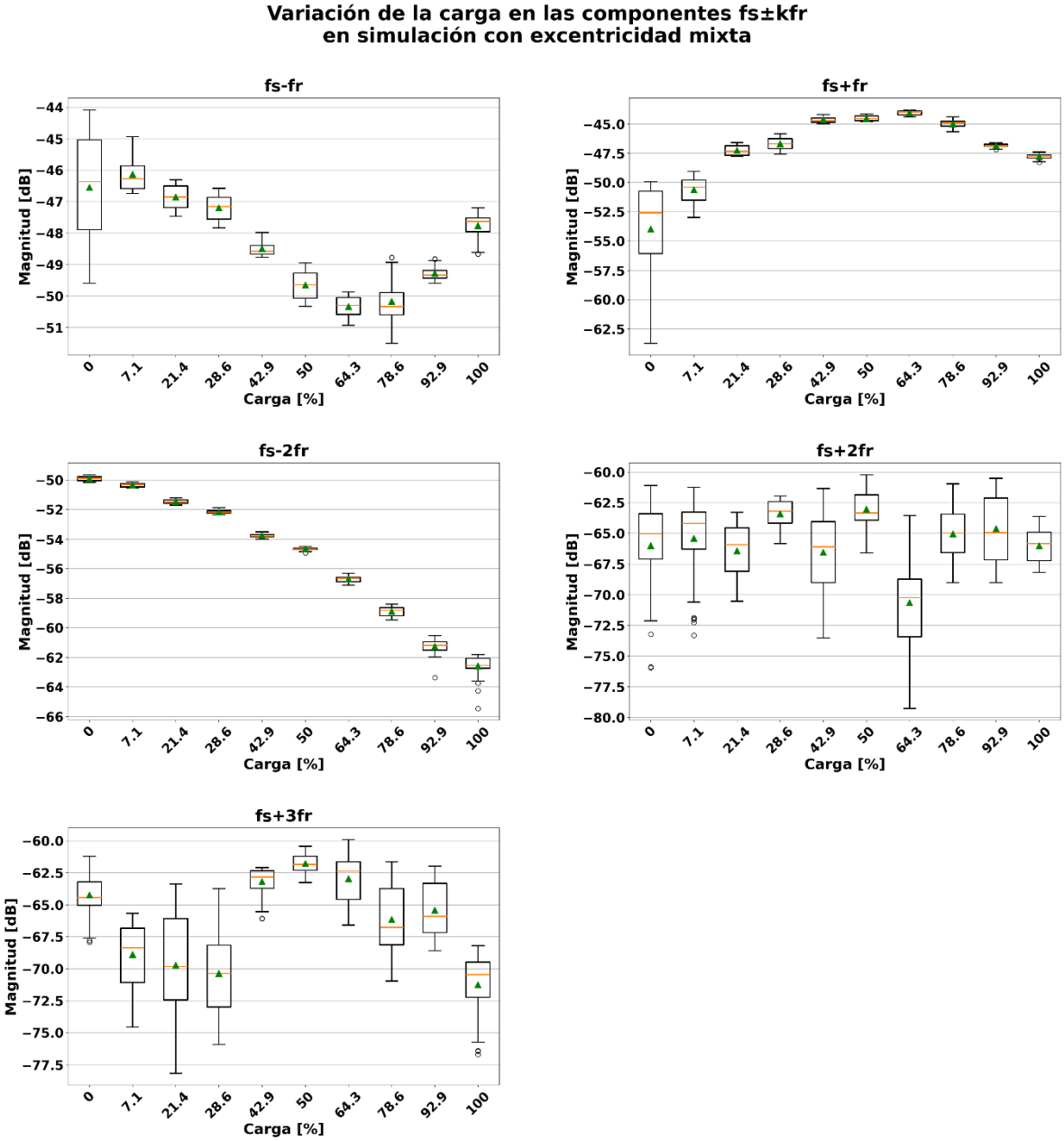


Figura 4.9. Variación de la magnitud de las componentes frecuenciales $f_s \pm kf_r$ obtenidas mediante FFT en las señales de corriente simuladas del motor de inducción con falla de excentricidad mixta, para distintos niveles de carga (autoría propia)

La Figura 4.9 muestra la variación de la magnitud de las componentes frecuenciales $f_s \pm kf_r$ de las señales obtenidas en simulación del motor de inducción operando bajo falla de excentricidad mixta para diez niveles de carga. Se observa que estas componentes presentan comportamientos diferenciados a medida que cambia la carga, evidenciando que la relación entre la amplitud de las componentes características y la carga mecánica no es lineal. Las mayores variaciones se presentan entre las condiciones de vacío y las cargas intermedias, mientras que, para niveles cercanos a la carga nominal, algunas componentes tienden a disminuir su amplitud.

En particular, las componentes $f_s \pm f_r$ son las que muestran mayor claridad una tendencia curva en función de la carga, alcanzando máximos o mínimos en condiciones intermedias y alejándose de un comportamiento lineal. Para la componente $f_s + f_r$, la mediana aumenta progresivamente hasta aproximadamente el 50%-78.6% de carga y posteriormente disminuye al acercarse a la carga nominal. Por su parte, $f_s - f_r$ presenta una reducción de magnitud en la zona media de operación y luego experimenta un incremento hacia condiciones de plena carga. Este efecto también puede apreciarse en las componentes de orden superior, como $f_s + 2f_r$ y $f_s + 3f_r$; sin embargo, la tendencia resulta menos definida que en aquellas frecuencias relacionadas con la falla de estudio.

La variación no lineal de la carga observada puede atribuirse a la interacción entre los campos magnéticos presentes en la máquina y a los cambios de deslizamiento producidos por el incremento de la carga. En medida en que se modifica la carga, las corrientes inducidas en el rotor modifican la distribución espacial del flujo magnético y la intensidad de las componentes asociadas a la distribución del entrehierro generada por la excentricidad mixta; se puede coincidir en un punto donde la modulación del entrehierro inducida por la excentricidad mixta se minimiza debido a los efectos de cancelación entre los componentes de excentricidad estática y dinámica.

Este resultado es importante porque evidencia que una misma condición de falla puede producir amplitudes espectrales significativamente diferentes dependiendo de la carga de operación. Este efecto aumenta el riesgo de generar falsos diagnósticos, ya sea al interpretar una reducción de la severidad de la falla o una disminución natural de la amplitud asociada

a la carga, así como atribuir a una condición defectuosa variaciones que en realidad responden a cambios operativos. Los resultados muestran que la amplitud de las componentes características de excentricidad depende a su vez de la condición de carga del motor.

4.3 FFT EN PRUEBAS EXPERIMENTALES

En esta sección se presenta la comparación entre los resultados obtenidos mediante simulación en Ansys Maxwell y los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales del motor de inducción. Para ello, se analizan los espectros de frecuencia de las señales de corriente en dos condiciones de operación del motor de inducción, en estado sano y con falla de excentricidad mixta. Las comparaciones se realizan para los cuatro niveles de carga considerados. En cada una de las gráficas se muestra el espectro en frecuencia obtenido de la señal experimental y el obtenido mediante las señales de simulación, con el propósito de evaluar la similitud entre ambos resultados e identificar si el modelo numérico reproduce las componentes frecuenciales observadas experimentalmente.

Esta comparación permite analizar el alcance del modelo bidimensional desarrollado en el presente trabajo de investigación, así como verificar si las componentes frecuenciales asociadas a la operación en estado sano del motor y a la falla de excentricidad mixta aparecen en posiciones similares dentro del espectro, así como analizar si las frecuencias características de la falla de excentricidad se amplifican en ambos análisis, así, permite observar las posibles diferencias en magnitud entre las señales simuladas y las experimentales.

4.3.1 COMPARATIVA CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CONDICIÓN CON EXCENTRICIDAD MIXTA

En la Figura 4.10 se presenta la comparación entre el espectro de frecuencia obtenido mediante simulación y el espectro experimental del motor con excentricidad mixta en condición sin carga. En ambos casos se observa la componente fundamental en alrededor de los 50 Hz, así como las componentes frecuenciales relacionadas con la falla de excentricidad

mixta ($f_s \pm f_r$). A partir del cálculo del error entre frecuencias identificadas en la simulación respecto a las experimentales, se obtuvo una similitud del 99.8% para la componente frecuencial fundamental, 99.4% para la componente $f_s - f_r$ y 99.9% para la componente $f_s + f_r$. Estos valores indican que el modelo numérico desarrollado reproduce adecuadamente la ubicación frecuencial de las componentes características de la falla.

De manera general, se observa que ambas señales presentan un comportamiento similar en la ubicación de las principales componentes frecuenciales, además, en ambos espectros se aprecia la amplificación de las componentes asociadas a la falla, lo cual coincide con el comportamiento esperado para un motor con presencia de excentricidad mixta.

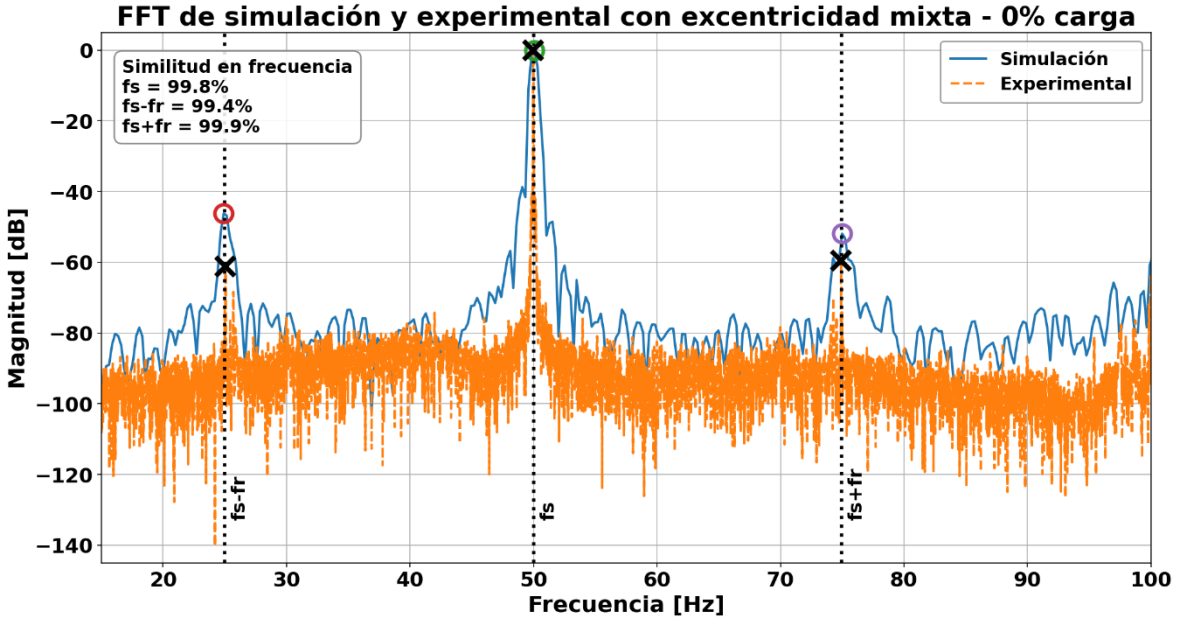


Figura 4.10. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 0% de carga (autoría propia)

En la Figura 4.11 se presenta la comparación entre el espectro de frecuencia de la señal de corriente obtenido experimentalmente y la obtenida mediante simulación del motor de inducción con excentricidad mixta al 50% de carga. En ambos espectros se identifica la componente fundamental alrededor de los 50 Hz, así como las componentes frecuenciales asociadas a la falla de excentricidad mixta, ubicadas en $f_s \pm f_r$. A partir del cálculo del error entre las frecuencias identificadas en la simulación respecto a las experimentales, se obtuvo una similitud del 99.9% para la componente fundamental, 98.8% para $f_s - f_r$ y 99.7% para

$f_s + f_r$.

Se observa que ambas señales presentan coincidencia en la ubicación de las componentes frecuenciales principales del espectro. La señal simulada y la señal experimental muestran una amplificación visible en las bandas laterales correspondientes a $f_s \pm f_r$. Sin embargo, visualmente también se aprecia que la señal experimental presenta una forma espectral mejor definida, debida a la frecuencia de muestreo utilizada para la adquisición de las señales, en comparación con la frecuencia de muestreo simulada en la señal obtenida mediante MEF. Por otra parte, la alta similitud frecuencial obtenida en las componentes frecuenciales de interés obtenida indica que, para esta condición de carga, las frecuencias características identificadas en la simulación se encuentran muy próximas a las obtenidas experimentalmente.

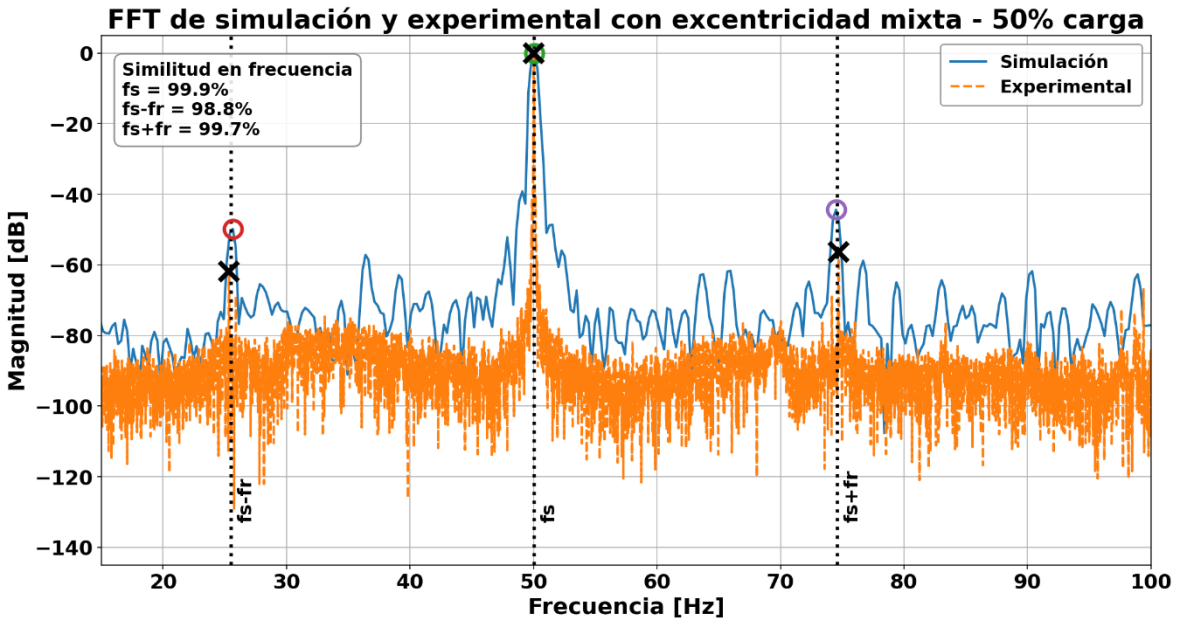


Figura 4.11. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 50% de carga (autoría propia)

Por su parte, en la Figura 4.12 se observa la comparación entre la señal en el espectro de frecuencia del modelo simulado y la obtenida experimentalmente del motor de inducción con excentricidad mixta al 78.6% de carga. En esta condición se observa que la componente fundamental se mantiene localizada alrededor de los 50Hz en ambas señales, con una similitud frecuencial del 99.8%. Asimismo, las componentes laterales asociadas a la

excentricidad mixta presentan una alta cercanía en frecuencia, con similitudes del 99.0% para $f_s - f_r$ y 99.8% para $f_s + f_r$. Con esto, se demuestra que con el 78.6% de carga aplicada, las tres componentes de interés permanecen ubicadas en regiones muy próximas entre simulación y experimento, por lo que el resultado muestra una correspondencia adecuada.

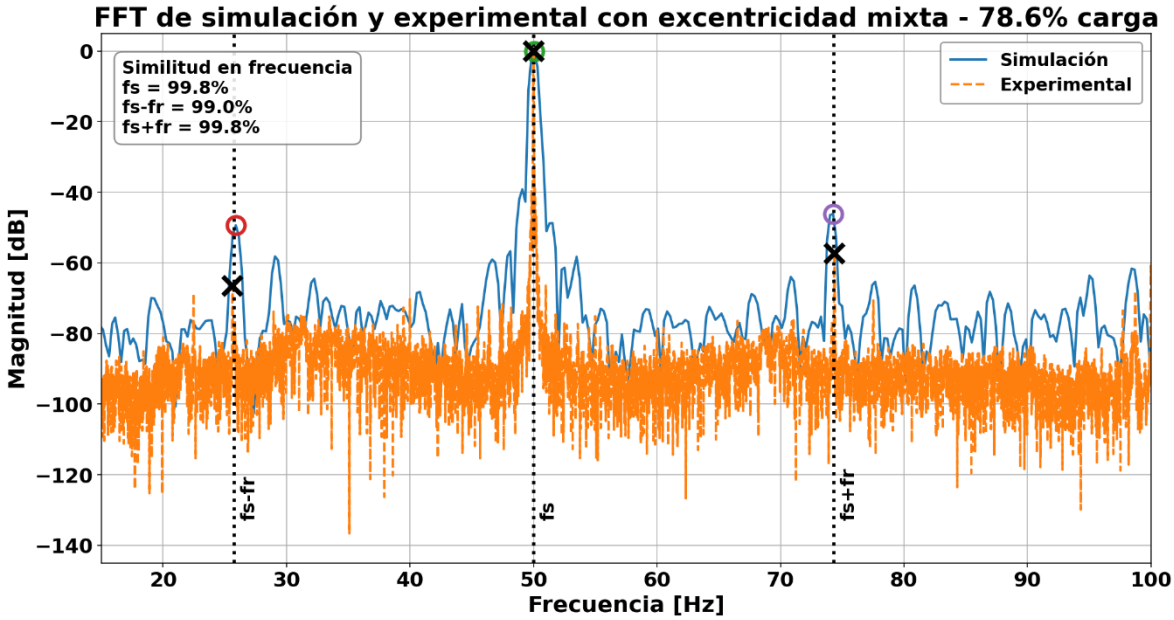


Figura 4.12. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 78.6% de carga (autoría propia)

Finalmente, en la Figura 4.13, se muestra la comparación en el espectro de la frecuencia ente la señal simulada y la obtenida experimentalmente del motor de inducción bajo la condición de excentricidad de falla con el 100% de carga aplicada. En esta condición, la similitud de la componente frecuencial fundamental entre la señal de simulación con respecto a la señal de experimentación es del 99.9%, además, se obtuvo una similitud del 99.0% para la componente frecuencial $f_s - f_r$ y del 99.2% para la componente $f_s + f_r$; lo que indica que las frecuencias de interés siguen presentando una correspondencia adecuada entre el modelo simulado y la señal experimental.

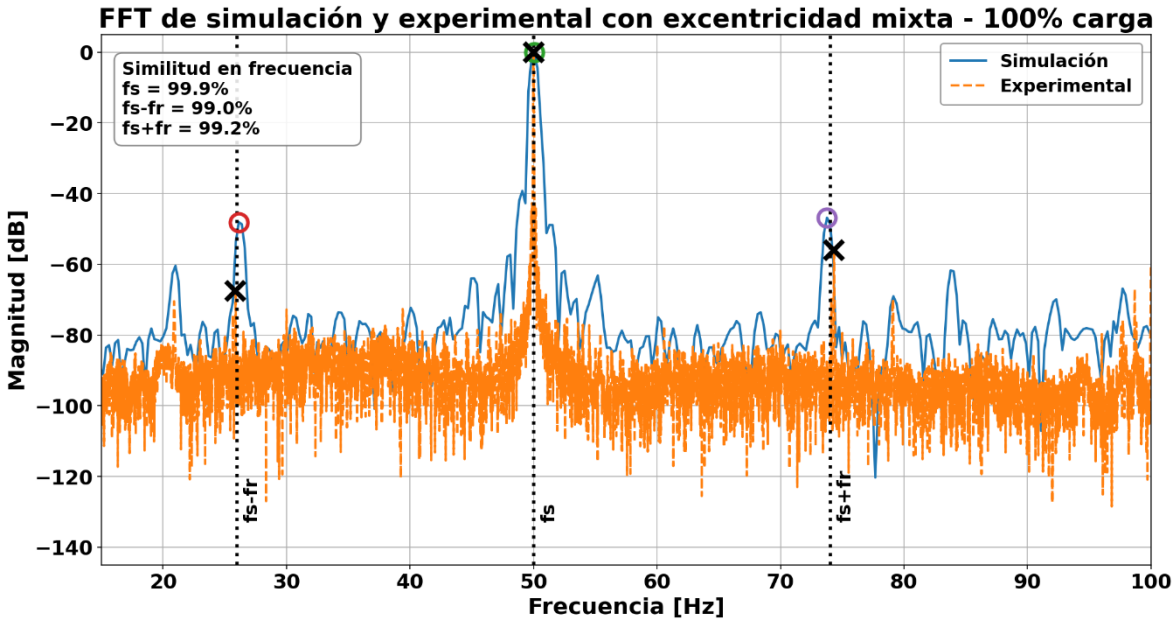


Figura 4.13. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor con excentricidad mixta con 100% de carga (autoría propia)

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las componentes frecuenciales f_s y $f_s \pm f_r$, obtenidas a partir de los resultados de la FFT aplicada a las señales de corriente de simulación y aquellas obtenidas de manera experimental en el motor de inducción con falla de excentricidad mixta (véase la Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Resultados comparativos entre frecuencias de la señal de simulación y pruebas experimentales con excentricidad mixta (autoría propia)

Carga aplicada	**Componente frecuencial**					
	f_s		$f_s - f_r$		$f_s + f_r$	
	Simulación (Hz)	Experimental (Hz)	Simulación (Hz)	Experimental (Hz)	Simulación (Hz)	Experimental (Hz)
0 %	50.07	49.98	24.91	25.06	74.99	74.91
50%	50.07	50.03	25.65	25.35	74.50	74.71
78.6%	50.07	49.99	25.89	25.63	74.26	74.37
100%	50.07	50.0	26.14	25.87	73.77	74.34

Considerando que, de acuerdo con la teoría, la falla de excentricidad produce una amplificación de las componentes frecuenciales $f_s - f_r$ y $f_s + f_r$, cuyos valores calculados para este caso específico son 25.83 Hz y 74.14 Hz respectivamente.

Se observa que las componentes frecuenciales asociadas a $f_s \pm f_r$ aparecen amplificadas tanto en la simulación como en la puesta experimental, en frecuencias predichas en base a la teoría. Sin embargo, las magnitudes obtenidas en la simulación son mayores que las registradas experimentalmente, especialmente en la componente $f_s - f_r$. Esta diferencia puede atribuirse a que el modelo simulado representa una condición ideal, en la cual el grado de excentricidad impuesto puede ser no exactamente igual que el presente en el motor experimental. Además, el modelo omite no linealidades y condiciones propias del sistema real; tales como las variaciones no lineales del entrehierro, originadas por tolerancias mecánicas, desalineación o pequeñas deformaciones, las cuales alteran la distribución del campo magnético; así como fluctuaciones de carga, ruido de medición, asimetrías eléctricas, que pueden modificar la magnitud de las bandas laterales $f_s \pm f_r$. Por ello, aunque existe una diferencia en magnitud entre ambas respuestas, la coincidencia en frecuencia de las bandas laterales permite validar que el comportamiento espectral característico de la excentricidad mixta se reproduce en ambos casos.

4.3.2 COMPARATIVA CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN CONDICIÓN SANO

El análisis de esta condición es importante, ya que establece una referencia del comportamiento ideal del motor de inducción y se compara con el comportamiento real de este. En el estado sano no se espera una amplificación marcada de las componentes frecuenciales asociadas a la falla de excentricidad, por lo que la comparación se enfoca principalmente en verificar si el modelo reproduce adecuadamente la ubicación de la componente frecuencial fundamental, así como el efecto que tiene la carga sobre la magnitud y distribución del espectro.

En la Figura 4.14 se muestra la gráfica de comparación entre la señal en el espectro de frecuencia del modelo simulado y la obtenida experimentalmente del motor de inducción operando en estado sano con 0% de carga.

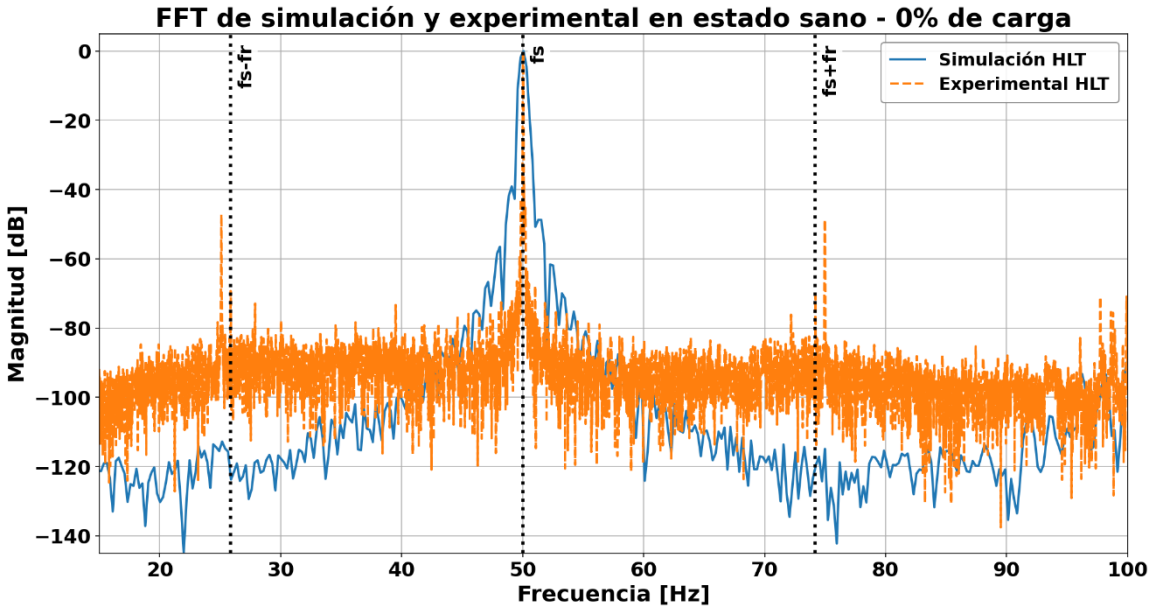


Figura 4.14. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 0% de carga (autoría propia)

En la Figura 4.15 se muestra la comparación entre la señal de corriente obtenida en simulación y la obtenida de manera experimental del motor de inducción en estado sano, en el espectro de la frecuencia con una carga aplicada del 50%.

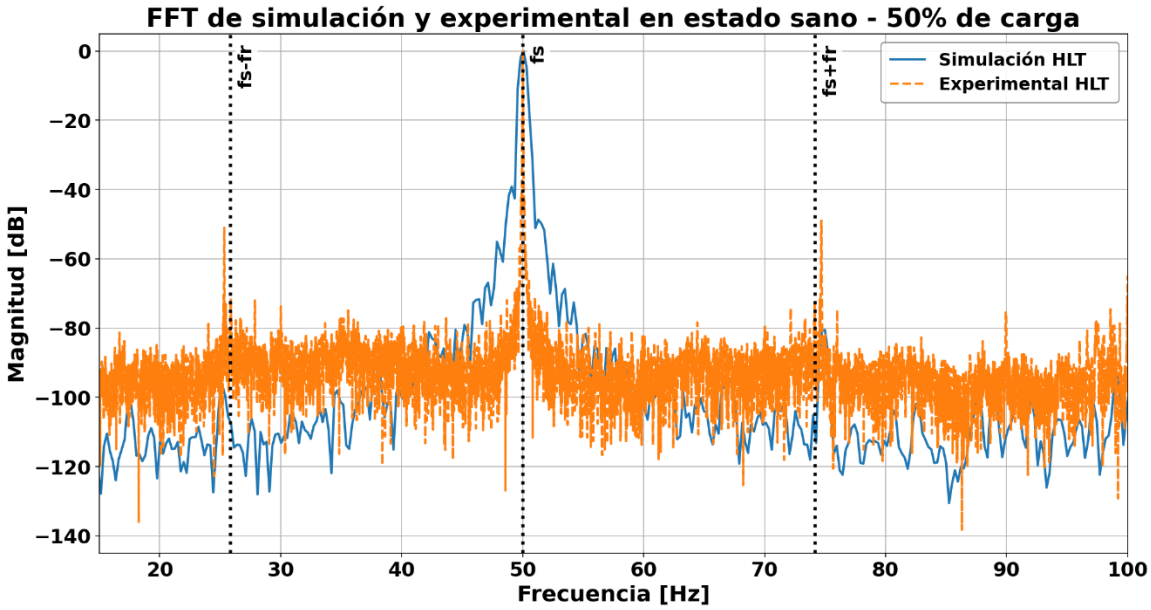


Figura 4.15. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 50% de carga (autoría propia)

Además, en la Figura 4.16, de igual manera se muestra una comparación en el espectro de la frecuencia entre la señal obtenida mediante simulación y aquella obtenida en un banco de pruebas experimental, ambas de un motor de inducción funcionando en estado sano con 78.6% de carga.

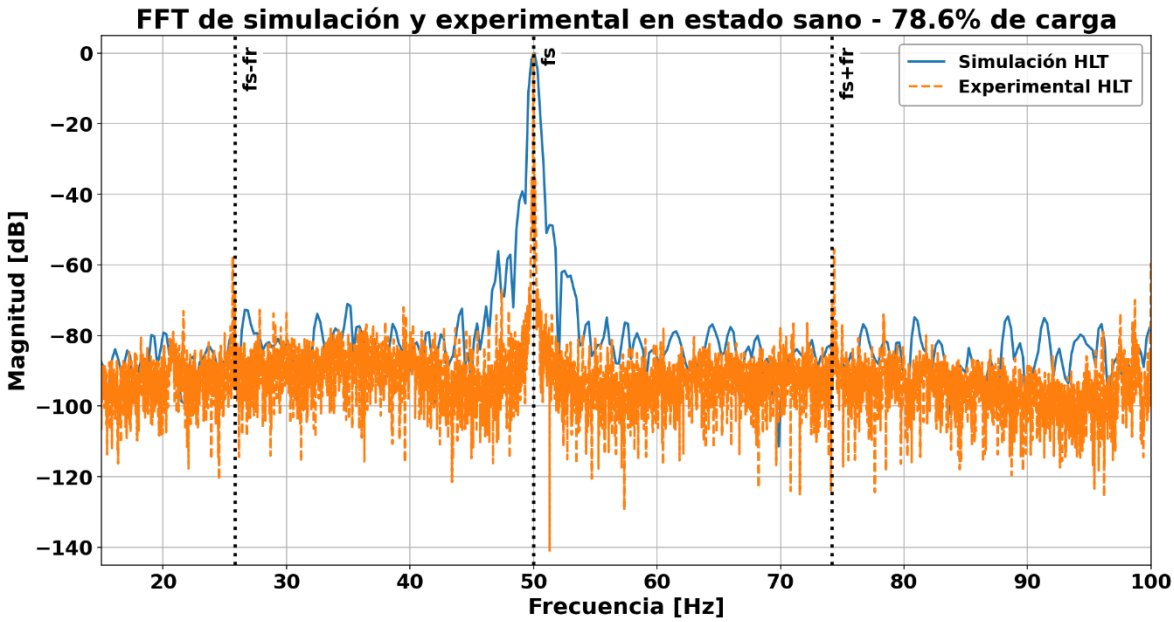


Figura 4.16. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 78.6% de carga (autoría propia)

Por su parte, en la Figura 4.17 se muestra la gráfica de comparación entre la señal de corriente obtenida mediante simulación y la obtenida mediante experimentación, del motor de inducción operando en estado sano con el 100% de carga.

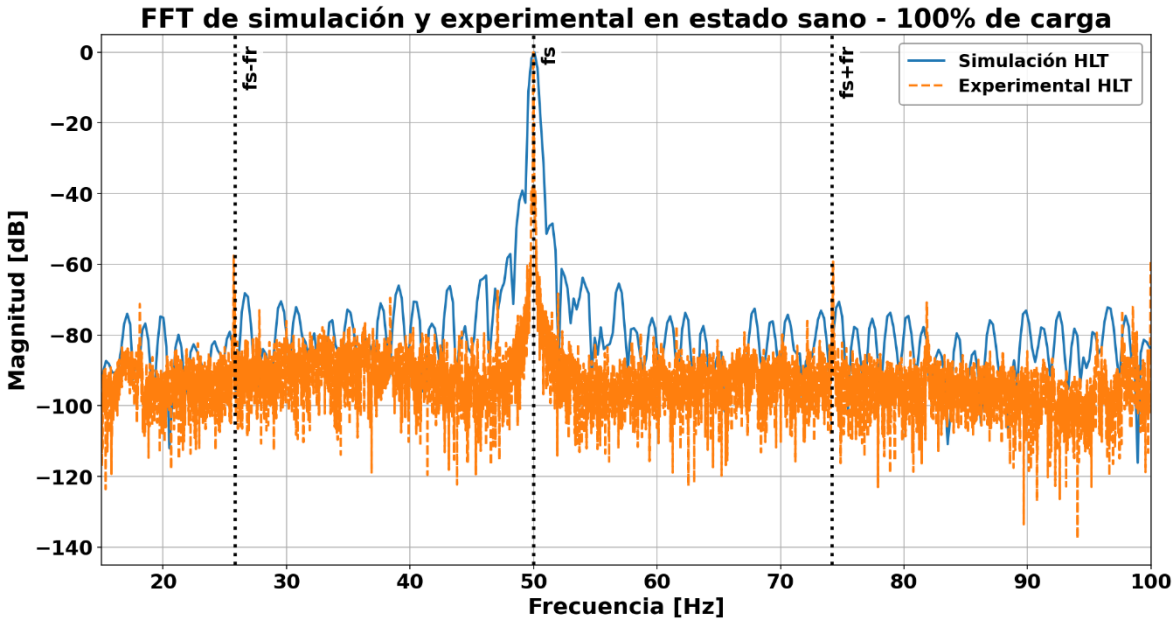


Figura 4.17. Comparación de los espectros de frecuencia simulados y experimentales del motor en estado sano con 100% de carga (autoría propia)

Al comparar visualmente los espectros de frecuencia del modelo sano simulado con los obtenidos experimentalmente, se observan diferencias importantes en las regiones cercanas a las componentes asociadas a la falla de excentricidad ($f_s \pm f_r$). En el modelo sano simulado, estas componentes no presentan una amplificación claramente definida, lo cual corresponde al comportamiento esperado para una condición ideal sin falla. En cambio, en las señales experimentales se aprecia la presencia de picos alrededor de dichas frecuencias. Este comportamiento sugiere que el motor experimental considerado como sano podría no encontrarse completamente libre de asimetrías mecánicas o electromagnéticas, ya que la teoría indica que las variaciones en el entrehierro, incluso cuando son pequeñas, pueden reflejarse en el espectro de corriente mediante componentes laterales alrededor de la frecuencia fundamental.

Esta diferencia entre el modelo sano simulado y el comportamiento experimental puede atribuirse a que la simulación representa una condición idealizada del motor, en el cual se considera una geometría perfectamente centrada y condiciones de operación controladas, además que no se toman en cuenta no linealidades. Por el contrario, el motor real puede presentar pequeñas imperfecciones propias de fabricación, montaje, desgaste de rodamientos,

desalineación, desbalance o excentricidad residual. En este sentido, la aparición de componentes $f_s \pm f_r$ en el espectro experimental no necesariamente implica una falla severa, pero sí puede indicar la existencia de pequeñas asimetrías inherentes al sistema físico. Esto coincide con lo reportado en la literatura, donde se menciona que los motores en condición saludable pueden presentar cierto nivel de excentricidad debido a imperfecciones de fabricación o montaje.

También se observa que, conforme aumenta el nivel de carga, la forma general del espectro simulado y experimental tiende a ser más parecida, especialmente a partir de 50% de carga. En las condiciones de 78.6% y 100% de carga, ambas señales presentan un nivel espectral más cercano en gran parte del intervalo analizado, en comparación con la condición sin carga. Esto puede relacionarse con el efecto de la carga sobre la corriente del motor, ya que al aumentar la carga se modifican el deslizamiento, la corriente del rotor y la interacción electromagnética entre el estator y el rotor. Por ello, el incremento de carga puede hacer que la respuesta frecuencial del modelo y la experimenta se aproximen visualmente.

Sin embargo, aun cuando la similitud visual entre ambas señales mejora con el aumento de la carga, la amplificación de las componentes $f_s \pm f_r$ permanece presente en los espectros experimentales. No obstante, también se observa que la amplitud de estas componentes tiende a disminuir a medida que aumenta la carga aplicada al motor. En las condiciones de carga reducida, especialmente en vacío, los picos asociados a $f_s \pm f_r$ son más notorios y presentan una amplificación más evidente. A medida que la carga aumenta, estas componentes siguen siendo identificables, pero su amplitud dentro del espectro disminuye. Este comportamiento sugiere que la influencia de las posibles asimetrías o excentricidades presentes en el motor experimental resulta más perceptible en condiciones de carga ligera.

Este resultado es importante porque indica que dichas componentes no aparecen únicamente en las pruebas con excentricidad mixta, sino también en la señal experimental considerada sana; además, pone en evidencia que su amplitud puede variar con la condición de operación del motor. Por lo tanto, las gráficas de la Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17, muestra que el análisis de la falla no debe basarse solo en la presencia de las componentes $f_s \pm f_r$, sino también en su magnitud, su evolución frente a la carga y su comparación con una referencia sana, como un modelo realizado mediante técnicas

numéricas computacionales. De esta manera, se evita interpretar como falla severa una componente que puede estar asociada a excentricidad residual, asimetrías propias del motor o condiciones reales del banco experimental.

5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación con MEF en Ansys Maxwell, el procesamiento de las señales de corriente mediante la FFT y su comparación con los resultados experimentales, se confirma la hipótesis planteada, ya que los resultados demuestran que, mediante técnicas numéricas computacionales es posible determinar el efecto de una falla por excentricidad mixta bajo distintos niveles de carga en un motor de inducción, a partir del análisis de la respuesta en frecuencia de la corriente del estator. Se observó que las componentes asociadas a la falla aparecen en las frecuencias esperadas, con una coincidencia aproximada del 99% entre las frecuencias identificadas en el modelo numérico y aquellas obtenidas experimentalmente. Esto indica que el modelo propuesto reproduce adecuadamente la ubicación de las componentes de falla en el espectro de corriente, aunque las magnitudes pueden variar debido a las idealizaciones propias de la simulación y a las condiciones reales presentes en el banco experimental.

La metodología implementada permitió obtener señales de corriente en el dominio del tiempo a partir del modelo numérico y posteriormente analizarlas en el dominio de la frecuencia mediante FFT. Este procesamiento permitió identificar las componentes asociadas a la falla y comparar su comportamiento bajo diferentes niveles de carga. En las señales simuladas con excentricidad mixta, la amplificación de las componentes $f_s \pm f_r$ se presentó en todos los niveles de carga analizados, lo que confirma que la alteración del entrehierro generada por la falla se refleja en la corriente del estator. Asimismo, se observó que la carga modifica la amplitud de estas componentes, por lo que no debe considerarse como una variable independiente en el diagnóstico de fallas de excentricidad.

En la condición de excentricidad mixta, el efecto de la carga sobre las componentes frecuenciales no presentó un comportamiento lineal conforme el porcentaje de carga aplicado. Para la componente $f_s + f_r$, la magnitud tendió a incrementarse desde la condición sin carga hasta cargas intermedias, aproximadamente 50% y 78%, y posteriormente disminuyó al acercarse a la carga nominal. Por otro lado, la componente $f_s - f_r$ presentó una reducción de magnitud en la zona media de porcentaje de carga y un incremento hacia condiciones cercanas al 100% de carga. Este comportamiento demuestra que una misma

condición de falla puede generar amplitudes distintas dependiendo del porcentaje de carga aplicado al motor, por lo que la magnitud de las bandas laterales no debe interpretarse de forma aislada como un indicador directo de severidad de falla.

En el caso del motor en estado sano simulado, no se observó una amplificación claramente definida de las componentes de falla, lo cual corresponde al comportamiento esperado para una condición ideal sin falla. Sin embargo, si se identificó que el incremento de carga modifica la magnitud general del espectro de corriente, principalmente a partir de cargas superiores al 50%. Esto indica que aun en ausencia de falla, la carga influye en la respuesta frecuencial del motor debido al incremento de corriente demandada, al cambio de deslizamiento y a la modificación de la interacción electromagnética entre estator y rotor.

Al comparar los resultados de simulación con los resultados experimentales en la condición de excentricidad mixta, se identificó una alta similitud en la ubicación de las componentes frecuenciales de interés. Estos resultados demuestran que el modelo numérico y la configuración de la falla, reproducen de manera adecuada la ubicación frecuencial de las componentes asociadas a la falla, aun cuando existen diferencias en la magnitud de los espectros.

Sin embargo, también se observaron diferencias en la magnitud de las componentes frecuenciales entre la simulación y la experimentación. En general, las señales simuladas presentaron amplitudes mayores en las componentes de falla; esto puede atribuirse a que el modelo numérico representa una condición ideal, en la cual la geometría, la alimentación, el mallado y el grado de excentricidad se encuentran controlados. En cambio, el sistema real incluye fenómenos adicionales como ruido de medición, pequeñas asimetrías de fabricación, variaciones en la alimentación, vibraciones mecánicas, desalineaciones, desbalances, efectos térmicos, desgaste de componentes, fluctuaciones de carga y no linealidades que no fueron consideradas completamente en la simulación. Por esta razón, aunque el modelo permite reproducir la tendencia general y la ubicación de las componentes frecuenciales, las magnitudes obtenidas no necesariamente coinciden de manera exacta con las mediciones experimentales.

También se observó que, incluso en la condición experimental considerada como estado

sano, aparecen componentes alrededor de $f_s \pm f_r$. Este resultado indica que el motor real puede presentar pequeñas asimetrías inherentes o niveles mínimos de excentricidad residual debido a las tolerancias de fabricación, montaje, desgaste de rodamientos, desalineación, entre otros fenómenos.

Por otro lado, una limitación importante presentada en el modelo desarrollado se relaciona con los recursos computacionales requeridos para las simulaciones. En este trabajo se empleó una frecuencia de muestreo de 1 kHz, si bien, esta configuración permitió obtener señales suficientes para identificar las componentes de interés, también provocó que los picos obtenidos en la FFT presentaran un ancho considerable, lo cual afecta a la definición del espectro en comparación con las señales experimentales. Por lo tanto, los resultados del modelo se pueden mejorar si se aumenta la frecuencia de muestreo de los datos, no obstante, esta mejora implica un aumento considerable del costo computacional, ya que cada prueba requiere de un tiempo elevado de solución en Ansys Maxwell.

Con base a los resultados obtenidos, se concluye que el uso combinado de simulación mediante MEF y análisis frecuencial mediante FFT constituye una herramienta útil para estudiar fallas en motores de inducción. La simulación permite analizar el comportamiento electromagnético bajo condiciones controladas, mientras que la comparación experimental permite evaluar la validez del modelo frente al comportamiento real de la máquina. Esta combinación aporta información útil para mejorar la interpretación del estado del motor, así como reducir falsos diagnósticos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberti, L., Bianchi, N., & Bolognani, S. (2011). Variable-Speed Induction Machine Performance Computed Using Finite-Element. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *47*(2), 789-797. https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2103914

Alimardani, R., Rahideh, A., & Hedayati Kia, S. (2025). Mixed Eccentricity Fault Detection of Induction Motors Based on Variational Mode Decomposition of Current Signal. *Machines*, *13*(10), 968. https://doi.org/10.3390/machines13100968

ANSYS, Inc. (s. f.-a). *Ansys Electronics 2025 R2—Assigning Cylindrical Gap Treatment*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/Maxwell/Content/Mesh/AssigningCylindricalGapTreatment.htm?Highlight=assigning%20cylindrical%20gap%20treatment

ANSYS, Inc. (s. f.-b). *Ansys Electronics 2025 R2—Damping/Friction Coefficients and Characteristics*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/TwinBuilder/Subsystems/Mechanical%20System/Content/MechSysDampFricCoeffChar.htm?Highlight=damping

ANSYS, Inc. (s. f.-c). *Ansys Electronics 2025 R2—End Connections in 2D Transient and AC Magnetic*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/Maxwell/Content/Maxwell/EndConnectionsin2DTransient.htm?Highlight=end%20connection

ANSYS, Inc. (s. f.-d). *Ansys Electronics 2025 R2—Generate and Display Mesh*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/Icepak/Subsystems/Icepak%20Getting%20Started%20Guide%20-%20Finned%20Heat%20Sink/Content/GenerateandDisplayMesh.htm?Highlight=Generate%20and%20Display%20Mesh

ANSYS, Inc. (s. f.-e). *Ansys Electronics 2025 R2—Layers in Band Mesh*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/Maxwell/Content/Maxwell/LayersinBandMesh.htm?Highlight=layers%20in%20band%20mesh

ANSYS, Inc. (s. f.-f). *Ansys Electronics 2025 R2—Potencial vectorial*. Ansys Maxwell Help.

Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/Maxwell/Content/Maxwell/VectorPotential.htm?Highlight=potential

ANSYS, Inc. (s. f.-g). *Ansys Electronics 2025 R2—The Mesh Generation Process*. Ansys Maxwell Help. Recuperado https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v252/en/home.htm#./Subsystems/HFSS/Content/HFSS/TheMeshGenerationProcess.htm?Highlight=The%20Mesh%20Generation%20Process

Antonino-Daviu, J. A., Gyftakis, K. N., Garcia-Hernandez, R., Razik, H., & Marques Cardoso, A. J. (2015). Comparative influence of adjacent and non-adjacent broken rotor bars on the induction motor diagnosis through MCSA and ZSC methods. *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 001680-001685. https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392343

Araújo, V. G. de, Bissiriou, A. O.-S., Villanueva, J. M. M., Villarreal, E. R. L., Salazar, A. O., Teixeira, R. de A., & Fonsêca, D. A. de M. (2024). Monitoring and Diagnosing Faults in Induction Motors' Three-Phase Systems Using NARX Neural Network. *Energies*, *17*(18), 4609. https://doi.org/10.3390/en17184609

ASTM International. (2002). *ASTM B193-02: Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials* (2002.ª ed.). ASTM International. https://doi.org/10.1520/B0193-02

ASTM International. (2023). *ASTM A677/A677M-16: Standard Specification for Nonoriented Electrical Steel Fully Processed Types*. https://doi.org/10.1520/A0677-16R23.

Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., & Kliman, G. B. (2001). Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *37*(5), 1248-1255. https://doi.org/10.1109/28.952499

Bianchi, N. (2005). *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements* (1st edition). CRC Press.

Blodt, M., Chabert, M., Regnier, J., & Faucher, J. (2006). Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *42*(6), 1454-1463. https://doi.org/10.1109/TIA.2006.882631

Boldea, I., & Nasar, S. A. (2017). *Electric Drives* (Third edition). Taylor & Francis Group.

Bose, B. K. (2002). *Modern power electronics and AC drives*. Prentice Hall PTR.

Bouzida, A., Abdelli, R., Touhami, O., & Aibeche, A. (2017). Dynamic eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method and experimental tests. *International Journal of Industrial Electronics and Drives*, *3*(4), 199-209. https://doi.org/10.1504/IJIED.2017.087610

Calderon-Uribe, U., Lizarraga-Morales, R. A., & Guryev, I. V. (2023). Unbalance Detection in Induction Motors through Vibration Signals Using Texture Features. *Applied Sciences*, *13*(10), 6137. https://doi.org/10.3390/app13106137

Cardoso, J. R., & Coelho, R. R. A. (2026). *Electromagnetics Through The Finite Element Method: From Maxwell's Equations To Code* (2nd edition). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003465102

Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas* (Quinta edición). McGraw-Hill.

Climente-Alarcon, V., Sundaria, R., Panchal, J., & Arkkio, A. (2016). Simulation of an induction motor's rotor after connection. *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 1-1. https://doi.org/10.1109/CEFC.2016.7815984

Cochran, P. L. (1989). *Polyphase Induction Motors: Analysis, Design and Application*. MARCEL DEKKER.

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, *19*(90), 297-301. https://doi.org/10.2307/2003354

Corne, B., Knockaert, J., & Desmet, J. (2017). Misalignment and unbalance fault severity estimation using stator current measurements. *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 247-253. https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062363

Cureño Osornio, J. (2023). *Detección de fallos graduales en rodamientos mediante fusión de señales, métodos de reducción de dimensionalidad y algoritmos inteligentes* [Universidad Autónoma de Querétaro]. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9970

Dhakal, G., Bhattarai, A., & Silwal, B. (2023). Modeling of Induction Motor Bearing Fault by Using Finite Element Method. *2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 3720-3725. https://doi.org/10.1109/EI259745.2023.10513086

Dinolova, P., Ruseva, V., & Dinolov, O. (2023). Energy Efficiency of Induction Motor

Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations. *Energies*, *16*(20), 7136. https://doi.org/10.3390/en16207136

Dorrell, D. G. (2005). Calculation and effects of end-ring impedance in cage induction motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, *41*(3), 1176-1183. https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.843337

Dorrell, D. G. (2009). Sources and characteristics of unbalanced magnetic pull in 3-phase cage induction motors with axial-varying rotor eccentricity. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 240-247. https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316545

El Hachemi Benbouzid, M. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *47*(5), 984-993. https://doi.org/10.1109/41.873206

Faiz, J., Ebrahimi, B. M., & Toliyat, H. A. (2009). Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, *45*(8), 3137-3144. https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2016416

Ferreira, F. J. T. E., Baoming, G., & de Almeida, A. T. (2015). Reliability and operation of high-efficiency induction motors. *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 1-13. https://doi.org/10.1109/ICPS.2015.7266412

Ferreira, F. J. T. E., & de Almeida, A. T. (2016). Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems - Part 1: System efficiency improvement. *2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 1-8. https://doi.org/10.1109/ICPS.2016.7490219

Finley, W. R., & Hodowanec, M. M. (2000). Selection of copper vs. Aluminum rotors for induction motors. *Record of Conference Papers. Industry Applications Society Forty-Seventh Annual Conference. 2000 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (Cat. No.00CH37112)*, 187-197. https://doi.org/10.1109/PCICON.2000.882775

Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr., C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (Sixth Edition). McGraw-Hill.

Gaber, I. M., Ibrahim, R. A., Ashour, H. A., & Sedky, M. M. (2025). A Co-Simulation Approach for Fault Detection in Induction Motor Drive Systems Using Finite Element and Spectral Analysis. *2025 15th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 1-5. https://doi.org/10.1109/ICEENG64546.2025.11031271

Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *144*, 106908. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908

Garcia, J., Rios-Colque, L., Peña, A., & Rojas, L. (2025). Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges. *Applied Sciences*, *15*(10), 5465. https://doi.org/10.3390/app15105465

Garcia, M., Panagiotou, P. A., Antonino-Daviu, J. A., & Gyftakis, K. N. (2019). Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(10), 8072-8081. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2885719

Garcia-Calva, T., Morinigio-Sotelo, D., Fernandez-Cavero, V., & Romero-Troncoso, R. (2022). Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review. *Energies*. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15217855

Goman, V., Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dimitrievskii, V. (2019). *Energy Efficiency Analysis of Fixed-Speed Pump Drives with Various Types of Motors*. *9*(24). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app9245295

Grupo SKF. (2017). *Daño de rodamientos y análisis de falla*. https://doi.org/PUB%20BU/I3%2017186

Grupo WEG. (2023, marzo). *W22 Motor eléctrico trifásico* [Catalógo]. https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h90/heb/WEG-WMO-w22-motor-electrico-trifasico-50024297-brochure-sp.pdf

Gyftakis, K. N., Spyropoulos, D. V., & Mitronikas, E. D. (2021). Advanced Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors at Start-Up. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *36*(2), 1101-1109. https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3025786

Hamani, K., Kuchar, M., Kubatko, M., & Kirschner, S. (2025). Advancements in Induction Motor Fault Diagnosis and Condition Monitoring: A Comprehensive Review. *Sensors*, *25*(19), 5942. https://doi.org/10.3390/s25195942

Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., & Hussain, A. (2018). Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1611-1626. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240

Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, J., Riera-Guasp, M., & Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *8*(2), 31-42. https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651

Huang, L., Shen, G., Hu, N., Chen, L., & Yang, Y. (2022). Coupled Electromagnetic-Dynamic Modeling and Bearing Fault Characteristics of Induction Motors considering Unbalanced Magnetic Pull. *Entropy*, *24*(10), 1386. https://doi.org/10.3390/e24101386

Hughes, A. (2006). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications* (Third edition). Elsevier.

Hyun, D., Lee, S., Hong, J., Bin Lee, S., & Nandi, S. (2012). Detection of Airgap Eccentricity for Induction Motors Using the Single-Phase Rotation Test. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *27*(3), 689-696. https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2198218

Ida, N., & Bastos, J. P. A. (1997). *Electromagnetics and Calculation of Fields* (Second edition). Springer.

International Electrotechnical Commission. (2004). *IEC 60034-1:2004 Rotating Electrical Machines—Part 1: Rating and Performance* (IEC 60034-1:2004; 11th edition). International Electrotechnical Commision.

International Electrotechnical Commission. (2022). *IEC 60404-8-4:2022 Magnetic materials—Part 8-4: Specifications for individual materials—Cold-rolled non-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully processed state*. https://webstore.iec.ch/en/publication/65821

International Electrotechnical Commission (IEC). (2007). *IEC 60034-2-1: Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)* (Edition 1) [Standard]. British Standards Institution (BSI).

International Electrotechnical Commission (IEC). (2022). *IEC 60404-3:2022 Magnetic materials—Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester*. https://webstore.iec.ch/en/publication/66641

Issa, R., Clerc, G., Hologne-Carpentier, M., Michaud, R., Lorca, E., Magnette, C., & Messadi, A. (2024). Review of Fault Diagnosis Methods for Induction Machines in Railway Traction Applications. *Energies*, *17*(11), 2728.

https://doi.org/10.3390/en17112728

James, J. F. (2011). *A Student's Guide to Fourier Transforms with Applications in Physics and Engineering* (Third Edition). Cambridge University Press.

Jin, J.-M. (2014). *THE FINITE ELEMENT METHOD IN ELECTROMAHNETICS* (Third Edition). John Wiley & Sons, Inc.

Joksimović, G., Levi, E., Kajević, A., Mezzarobba, M., & Tessarolo, A. (2020). Optimal Selection of Rotor Bar Number for Minimizing Torque and Current Pulsations Due to Rotor Slot Harmonics in Three-Phase Cage Induction Motors. *IEEE Access*, *8*, 228572-228585. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045766

Kinoti, E., Mosetlhe, T. C., & Yusuff, A. A. (2024). Multi-Criteria Analysis of Electric Vehicle Motor Technologies: A Review. *World Electric Vehicle Journal*, *15*(12), 541. https://doi.org/10.3390/wevj15120541

Koçak, F., Gülmez, B., Sarikaya, T. A., & Ergene, L. T. (2023). High Frequency Induction Motor Design with the Examination of Slot/Pole Combinations. *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1-5. https://doi.org/10.1109/ELECO60389.2023.10416013

Konuhova, M. (2025). Induction Motor Dynamics Regimes: A Comprehensive Study of Mathematical Models and Validation. *MDPI Applied Sciences*. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15031527

Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (Third edition). IEEE Press.

Krishnan, R. (2001). *Electric Motor Drives: Modeling Analysis, and Control*. Prentice Hall.

Kuczmann, M., & Iványi, A. (2008). *THE FINITE ELEMENT METHOD IN MAGNETICS*. Akadémiai Kiadó.

Lee, S. B., Stone, G. C., Antonino-Daviu, J., Gyftakis, K. N., Strangas, E. G., Maussion, P., & Platero, C. A. (2020). Condition Monitoring of Industrial Electric Machines: State of the Art and Future Challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *14*(4), 158-167. IEEE Industrial Electronics Magazine. https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3016138

Liang, X., Ali, M. Z., & Zhang, H. (2020). Induction Motors Fault Diagnosis Using Finite Element Method: A Review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *56*(2), 1205-1217. https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2958908

Liang, X., & Ilochonwu, O. (2011). Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *47*(1), 271-280. https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2090848

Lide, D. R. (2000). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (81st Edition). CRC Press.

Lipo, T. A. (2017). *Introduction to AC machine design*. IEEE Press.

Liu, Z., Zhang, P., He, S., & Huang, J. (2021). A Review of Modeling and Diagnostic Techniques for Eccentricity Fault in Electric Machines. *Energies*, *14*(14), 4296. https://doi.org/10.3390/en14144296

Mecrow, B. C., & Jack, A. G. (2008). Efficiency trends in electric machines and drives. *Energy Policy, Foresight Sustainable Energy Management and the Built Environment Project*, *36*(12), 4336-4341. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.042

Meunier, G. (2008). *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling*. John Wiley & Sons, Inc.

Mohan, N. (2002). *ELECTRIC DRIVES: AN INTEGRATIVE APROACH* (1st edition). MNPERE Minneapolis.

Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *20*(4), 719-729. https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955

Ocak, C. (2023). A FEM-Based Comparative Study of the Effect of Rotor Bar Designs on the Performance of Squirrel Cage Induction Motors. *Energies*, *16*(16), 6047. https://doi.org/10.3390/en16166047

Ogata, K. (1993). *Ingeniería de control moderna* (Segunda edición). Prentice Hall.

Okwuosa, C. N., & Hur, J. (2022). A Filter-Based Feature-Engineering-Assisted SVC Fault Classification for SCIM at Minor-Load Conditions. *Energies*, *15*(20), 7597. https://doi.org/10.3390/en15207597

Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (1999). *Discrete-Time Signal Porcessing* (Second Edition). Prentice Hall.

Pacheco Guerrero, J. P. (2023). *Detección de desbalance y desalineamiento en motores de inducción bajo cargas oscilantes usando corriente y transformada rápida de Fourier* [Ingeniería]. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/8744

Pavlović, I., Bratić, K., Kiciński, R., & Kluczyk, M. (2024). Testing and Modeling of Shaft Vibrations Due to Misalignment. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(12), 2284. https://doi.org/10.3390/jmse12122284

Petryna, J., Duda, A., & Sułowicz, M. (2021). Eccentricity in Induction Machines—A Useful Tool for Assessing Its Level. *Energies*, *14*(7), Article 7. https://doi.org/10.3390/en14071976

Polat, A., Ertuğrul, Y. D., & Ergene, L. T. (2015). Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor. *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 284-288. https://doi.org/10.1109/DEMPED.2015.7303703

Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). *Design of Rotating Electrical Machines* (Second Edition). WILEY.

Rashid, M. H. (2001). *Power Electronics Handbook*. ACADEMIC PRESS.

Resendiz-Ochoa, E., Calderon-Uribe, S., Morales-Hernandez, L. A., Perez-Ramirez, C. A., & Cruz-Albarran, I. A. (2024). Multiple Electromechanical-Failure Detection in Induction Motor Using Thermographic Intensity Profile and Artificial Neural Network. *MDPI Machines*. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/machines12120928

Riera-Guasp, M., Antonino-Daviu, J. A., & Capolino, G.-A. (2015). Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *62*(3), 1746-1759. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2375853

Rivera, C. A., Poza, J., Ugalde, G., & Almandoz, G. (2018). A Requirement Engineering Framework for Electric Motors Development. *Applied Sciences*, *8*(12), 2391. https://doi.org/10.3390/app8122391

Salah, A., Guo, Y., & Dorrell, D. (2017). Monitoring and damping unbalanced magnetic pull due to eccentricity fault in induction machines: A review. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8055965

SECIHTI. (2026). Energía y Cambio Climático. *SECIHTI*. https://enbc.secihti.mx/pronaces/energia-y-cambio-climatico/

Sen, P. C. (1997). *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (Second edition). John Wiley & Sons, Inc.

Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B. (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *20*(1), 106-114. https://doi.org/10.1109/TEC.2004.837304

Singh, A., Grant, B., DeFour, R., Sharma, C., & Bahadoorsingh, S. (2016a). A review of induction motor fault modeling. *Electric Power Systems Research*, *133*, 191-197. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.017

Singh, A., Grant, B., DeFour, R., Sharma, C., & Bahadoorsingh, S. (2016b). A review of induction motor fault modeling. *Electric Power Systems Research*, *133*, 191-197. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.017

Smith, S. W. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* (Second Edition). California Technical Publishing.

Sri Ram Prasad, K. V., & Singh, V. (2022). Finite Element Analysis for Fault Diagnosis in Broken Rotor Bar of a Polyphase Induction Motor. *2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776887

Steiner Petrovic, D. (2010). Non-oriented electrical steel sheets. *Materials and Technologies*, *44*, 317-325.

Tavner, P. J., Ran, L., Penman, J., & Sedding, H. (2008). Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. *Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*. https://doi.org/10.1049/PBPO056E

Terron-Santiago, C., Martinez-Roman, J., Puche-Panadero, R., Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., & Pineda-Sanchez, M. (2022). Analytical Model of Eccentric Induction Machines Using the Conformal Winding Tensor Approach. *Sensors*, *22*(9), 3150. https://doi.org/10.3390/s22093150

Thomson, W. T., & Culbert, I. (2017). Motor Current Signature Analysis for Induction Motors. En *Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories* (pp. 1-37). IEEE. https://doi.org/10.1002/9781119175476.ch1

Thomson, W. T., & Fenger, M. (2001). Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, *7*(4), 26-34. https://doi.org/10.1109/2943.930988

Tian, K., Zhang, T., Ai, Y., & Zhang, W. (2018). Induction Motors Dynamic Eccentricity Fault Diagnosis Based on the Combined Use of WPD and EMD-Simulation Study.

Applied Sciences, *8*(10), 1709. https://doi.org/10.3390/app8101709

Tikhonova, O., Malygin, I., & Plastun, A. (2017). Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by "ANSYS maxwell. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1-5. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076294

Vas, P. (1992). *Prameter Estimation of Electrical Machines* (2nd edition). Oxford University Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1093/oso/9780198593751.001.0001

Wang, B., Albader, M. W., Inoue, H., & Kanemaru, M. (2022). Induction Motor Eccentricity Fault Analysis and Quantification with Modified Winding Function based Model. *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICEMS56177.2022.9983377

Weili, L., Ying, X., Jiafeng, S., & Yingli, L. (2007). Finite-Element Analysis of Field Distribution and Characteristic Performance of Squirrel-Cage Induction Motor With Broken Bars. *IEEE Transactions on Magnetics*, *43*(4), 1537-1540. https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.892086

Yamaguchi, T., Kawase, Y., & Sano, S. (2004). 3-D finite-element analysis of skewed squirrel-cage induction motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, *40*(2), 969-972. https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.824897

Yang, C., Kang, T.-J., Hyun, D., Lee, S. B., Antonino-Daviu, J. A., & Pons-Llinares, J. (2014). Reliable Detection of Induction Motor Rotor Faults Under the Rotor Axial Air Duct Influence. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *50*(4), 2493-2502. https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2297448

Zaabi, W., Bensalem, Y., & Trabelsi, H. (2014). Fault analysis of induction machine using finite element method (FEM). *2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 388-393. https://doi.org/10.1109/STA.2014.7086711

Zamudio Ramirez, I. (2023). *Diagnóstico de fallos electromecánicos en motores eléctricos mediante el análisis avanzado del flujo magnético y su implementación en hardware* [Ingeniería]. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/7839

Zamudio-Ramirez, C., Cueva-Perez, I., Biot-Monterde, V., Dunai, L., & Antonino-Daviu, J. A. (2025). Effect of Load Variations on Rotor Rotational-related Frequency amplitudes in Induction Motor Current Signals with Eccentricity Faults. *IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1-6. https://doi.org/10.1109/IECON58223.2025.11221603

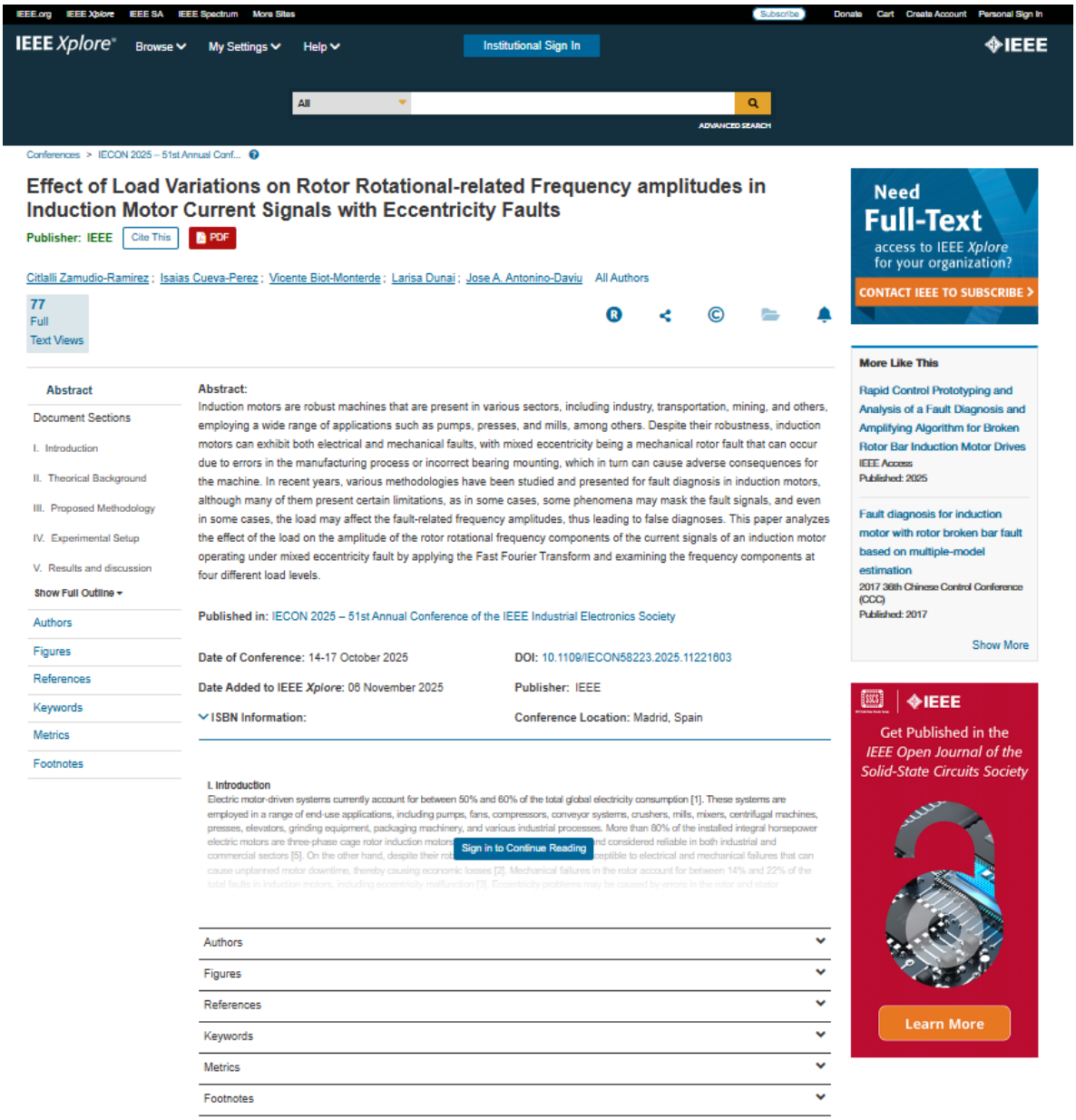
Zamudio-Ramirez, I., Osornio-Rios, R. A., Antonino-Daviu, J. A., Razik, H., & Romero-Troncoso, R. de J. (2022). Magnetic Flux Analysis for the Condition Monitoring of Electric Machines: A Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(5), 2895-2908. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3070581

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (Sixth edition). Elsevier Butterworth-Heinemann.

7 ANEXOS

7.1 PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS DE CONGRESO

7.1.1 PRIMER ARTÍCULO DE CONGRESO: IECON 2025



7.1.2 SEGUNDO ARTÍCULO DE CONGRESO: CONIIN 2026



LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
A TRAVÉS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

otorgan la presente

CONSTANCIA al:

CITLALLI ZAMUDIO RAMÍREZ

por su participación como ponente con el trabajo titulado:

Modelado por elementos finitos de un motor de inducción bajo condiciones sana y excentricidad mixta

en el XXII Congreso Internacional de Ingeniería CONiiN,
15 de Mayo 2026

Dra. María de la Luz Pérez Rea
DIRECTORA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Dra. Viviana Palos Barba
COORDINADORA GENERAL CONIIN 2026
FACULTAD DE INGENIERÍA

7.2 CONSTANCIA DE MANEJO DE LENGUA INGLÉS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE LENGUAS Y LETRAS

A QUIEN CORRESPONDA:

La que suscribe, Directora de la Facultad de Lenguas y Letras, hace **C O N S T A R** que

ZAMUDIO RAMIREZ CITLALLI

Presentó el **Examen de Manejo de la Lengua** efectuado el día veintinueve de enero de dos mil veinticinco, en el cual obtuvo la siguiente calificación:

8

Se extiende la presente a petición de la parte interesada, para los fines escolares y legales que le convengan, en el Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, el día seis de febrero de dos mil veinticinco.

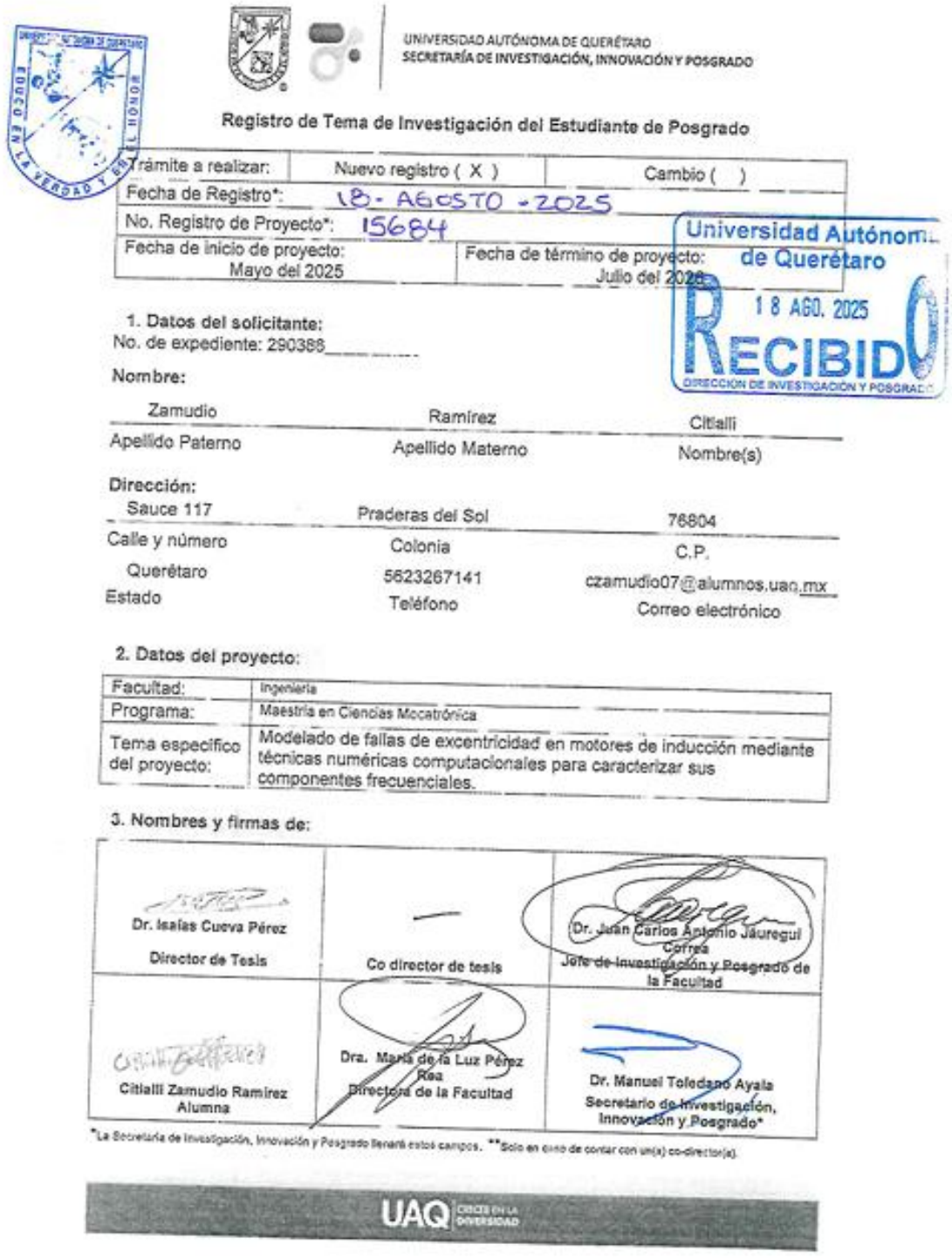
A t e n t a m e n t e,
"Enlazar Culturas por la Palabra"

DRA. MA. DE LOURDES RICO CRUZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DIRECCIÓN
FACULTAD DE LENGUAS Y LETRAS

MLRC/mgoa*CL*FLL-C.-463

7.3 REGISTRO DE PROTOCOLO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y POSGRADO

Registro de Tema de Investigación del Estudiante de Posgrado

Trámite a realizar:	Nuevo registro (X)	Cambio ( )
Fecha de Registro*:	18- AGOSTO -2025	
No. Registro de Proyecto*:	15684	
Fecha de inicio de proyecto: Mayo del 2025	Fecha de término de proyecto: Julio del 2026	

Universidad Autónoma de Querétaro
18 AGO. 2025
RECIBIDO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

1. Datos del solicitante:
No. de expediente: 290388

Nombre:

Zamudio	Ramírez	Citlalli
Apellido Paterno	Apellido Materno	Nombre(s)

Dirección:

Sauce 117	Praderas del Sol	76804
Calle y número	Colonia	C.P.
Querétaro	5623267141	czamudio07@alumnos.uaq.mx
Estado	Teléfono	Correo electrónico

2. Datos del proyecto:

Facultad:	Ingeniería
Programa:	Maestría en Ciencias Mecatrónica
Tema específico del proyecto:	Modelado de fallas de excentricidad en motores de inducción mediante técnicas numéricas computacionales para caracterizar sus componentes frecuenciales.

3. Nombres y firmas de:

Dr. Isaías Cueva Pérez Director de Tesis	Co director de tesis	Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa Jefe de Investigación y Posgrado de la Facultad
Citlalli Zamudio Ramírez Alumna	Dra. María de la Luz Pérez Rea Directora de la Facultad	Dr. Manuel Toledano Ayala Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado*

*La Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado llenará estos campos. **Solo en caso de contar con un(a) co-director(a).

UAQ CRECE EN LA DIVERSIDAD