



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**Detección de Fallas de Rotor en Máquinas de Inducción Comerciales
usando Análisis de Flujo Magnético de Dispersión (Stray Flux).**

POR

Leonardo Luis Burgos Ríos

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Guía
Dr. Carlos F. Madariaga Cifuentes

Marzo 2026
Concepción (Chile)

©2026 Leonardo Luis Burgos Ríos



©2026 Leonardo Luis Burgos Ríos

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



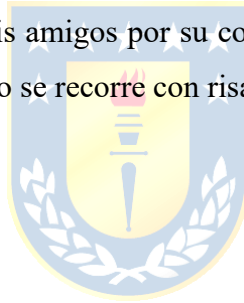
A los alumnos del pasado, presente y futuro del L.E.M.E.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por el apoyo y amor incondicional; sin ellos no sería la persona que soy hoy. A mi mamá Fabiola, a mi Maeli, a mi Papi, a mis hermanos Nacho e Isidora, a mi tía Lorena y a mis primas Fran y Flo. Les agradezco profundamente por todas y cada una de las enseñanzas que me han entregado a lo largo de mi vida, por confiar siempre en mí, por su preocupación constante y por un millón de cosas más que no me resulta fácil expresar en palabras. Los amo muchísimo.

Agradezco también a mis profesores, el Dr. Carlos Madariaga y el Dr. Juan Tapia, por su apoyo, orientación y constante disposición durante el desarrollo de esta Memoria de Título. Asimismo, extendiendo mi agradecimiento a todo el equipo perteneciente al Laboratorio de Ensayos de Máquinas Eléctricas, quienes colaboraron de distintas formas a lo largo de este trabajo, desde la fabricación de un sensor de flujo hasta la alineación de un motor.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos por su compañía y apoyo durante este proceso. El camino siempre se hace más fácil cuando se recorre con risas de por medio.



Sumario

Los MI son considerados por diversos autores como el “caballo de batalla” de la industria moderna. Esta denominación, sustentada en su uso masivo a nivel global, refleja la importancia de asegurar su operación adecuada y confiable con el fin de evitar paradas no deseadas, reducir costos de mantenimiento, minimizar pérdidas de producción y prolongar la vida útil de los equipos.

Entre las fallas que afectan a los MI, las fallas rotóricas, particularmente la rotura de barras, representan aproximadamente un 9% del total de averías. En esta Memoria de Título (MdeT) se aborda el diagnóstico de este tipo de falla mediante el desarrollo de un algoritmo basado en el análisis de señales de flujo magnético de dispersión (SFSA).

Se presenta una introducción a los MI, sus fallas típicas y los principales métodos de diagnóstico. Posteriormente, se realiza una revisión de la literatura enfocada en la detección de fallas de barras rotas mediante esta técnica, y se describe la metodología base que sustenta la propuesta desarrollada. Sobre esta base, se plantea una metodología basada en la integración de la potencia espectral en una banda de frecuencias característica de falla de barra rota. Además, se define un índice diagnóstico γ , que cuantifica la desviación de una medición individual respecto a la variabilidad natural del sistema en condición sana.

La validación del método se realiza en dos etapas: simulación por elementos finitos, utilizando un modelo 2D de un motor perteneciente al LEME de la UdeC, y validación experimental en laboratorio sobre el mismo motor. La medición del flujo magnético de dispersión se realiza mediante un sensor de bobina desarrollado específicamente para la adquisición de estas señales.

Los resultados evidencian una mejora significativa en la capacidad discriminatoria frente a la metodología convencional. La integración de potencia en banda reduce la dispersión en aproximadamente un 37% en términos lineales. La metodología base presenta amplificaciones entre 5 y 22 veces a carga nominal, las cuales se disminuyen a 1.7 veces en vacío, evidenciando una pérdida significativa de sensibilidad en condiciones de baja carga. En contraste, el índice γ mantiene valores entre 25 y 150 en condición defectuosa, frente a un máximo de 6.13 en condición sana en todo el rango de velocidades evaluado. Esto, junto con su naturaleza escalar, permite definir un umbral preliminar de $\gamma > 25$ como criterio de detección de falla, estableciendo un indicador único, objetivo y directamente aplicable.

Tabla de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2.	EL MOTOR DE INDUCCIÓN	1
1.2.1	<i>Topologías del Rotor</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Fallas en Motores de Inducción</i>	<i>3</i>
1.3.	MANTENIMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	5
1.3.1	<i>Técnicas de Procesamiento de Señales.....</i>	<i>6</i>
1.4.	ESTADO DEL ARTE.....	8
1.4.1	<i>Detección de fallas en MIJA a través del SFSA.....</i>	<i>8</i>
1.4.2	<i>Discusión</i>	<i>13</i>
1.5.	OBJETIVOS	14
1.5.1	<i>Objetivo General</i>	<i>14</i>
1.5.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>14</i>
1.6.	ALCANCES Y LIMITACIONES	14
2.	METODOLOGÍA.....	16
2.1.	INTRODUCCIÓN	16
2.2.	BASE TEÓRICA: FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS	16
2.2.1	<i>Generación de las bandas laterales de la frecuencia fundamental $1 \pm 2sfs$ [6]</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Generación de las componentes armónicas relacionadas a la frecuencia mecánica $fs \pm fr$ [25]</i>	<i>18</i>
2.3.	METODOLOGÍA BASE	20
2.3.1	<i>Adquisición y preprocesamiento.....</i>	<i>21</i>
2.3.2	<i>Identificación de Firmas Características</i>	<i>21</i>
2.3.3	<i>Diagnóstico basado en la amplitud</i>	<i>21</i>
2.4.	METODOLOGÍA PROPUESTA	22
2.4.1	<i>Estimación de la Densidad Espectral de Potencia.....</i>	<i>22</i>
2.4.2	<i>Potencia Espectral en Banda.....</i>	<i>23</i>
2.4.3	<i>Caracterización del motor.....</i>	<i>25</i>
2.4.4	<i>Índice γ</i>	<i>25</i>
2.5.	ETAPA DE VALIDACIÓN	26
2.5.1	<i>Validación mediante Elementos Finitos</i>	<i>26</i>
2.5.2	<i>Validación Experimental en Laboratorio</i>	<i>27</i>
3.	ETAPA DE VALIDACIÓN: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	28
3.1.	MODELO DEL MI.....	28
3.2.	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA POTENCIA INTEGRADA EN FUNCIÓN DE LA SEVERIDAD DE FALLA Y DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN	31
3.2.1	<i>Escenario de referencia.....</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Escenarios de falla</i>	<i>33</i>
4.	ETAPA DE VALIDACIÓN: EXPERIMENTAL EN LABORATORIO.....	38
4.1.	BANCO DE PRUEBAS	38
4.1.1	<i>Configuración #1: Torque de carga controlado.....</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Configuración #2: Alimentación en vacío a voltaje reducido</i>	<i>42</i>
4.2.	RESULTADOS CONFIGURACIÓN #1: METODOLOGÍA BASE	44
4.3.	RESULTADOS CONFIGURACIÓN #1: METODOLOGÍA PROPUESTA	48
4.3.1	<i>Potencia integrada.....</i>	<i>48</i>
4.3.2	<i>Efecto del tamaño de muestra en el índice γ</i>	<i>51</i>
4.3.3	<i>Valores de γ</i>	<i>52</i>
4.4.	RESULTADOS CONFIGURACIÓN #2: METODOLOGÍA BASE	56
4.5.	RESULTADOS CONFIGURACIÓN #2: METODOLOGÍA PROPUESTA	59

4.5.1	Potencia integrada.....	59
4.5.2	Valor de γ	60
5.	CONCLUSIONES	62
5.1.	SUMARIO	62
5.2.	CONCLUSIONES.....	62
5.3.	TRABAJO FUTURO.....	64
NOMENCLATURA.....		1
ABREVIACIONES.....		3



Lista de Tablas

Tabla 1-1 Incidencia de Fallas en MI.....	3
Tabla 3-1 Detalles del MI Cantoni.....	29
Tabla 3-2 Escenarios de Falla de BRB en FEM.....	29
Tabla 3-3 Velocidad estimada para cada nivel de carga	31
Tabla 3-4 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI de referencia (FEM)	33
Tabla 3-5 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 1 BRB (FEM)	34
Tabla 3-6 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 3 BRB Ady. (FEM)	34
Tabla 3-7 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 3 BRB No Ady. (FEM)	35
Tabla 4-1 Escenarios considerados en la validación experimental	39



Lista de Figuras

Fig. 1-1 Esquema de un Motor de Inducción trifásico [38]	2
Fig. 1-2 Estator y tipos de rotor de un MI trifásico [39]	3
Fig. 1-3 Componentes axial y radial del flujo magnético disperso [21]	9
Fig. 1-4 Diferentes posiciones fijas del sensor de flujo [23].....	10
Fig. 1-5 Análisis espectral del flujo magnético disperso radial bajo condiciones de bajo deslizamiento [24]	10
Fig. 1-6 Comparación de firmas características de barra rota.....	11
Fig. 1-7 Amplitud de las bandas laterales clásicas de barra rota en el espectro de la corriente del estator [28].....	12
Fig. 1-8 Amplitud de las bandas laterales asociadas a la frecuencia mecánica del rotor en el espectro del flujo magnético disperso [28].....	12
Fig. 2-1 Comparación espectro FFT de motor sano y con falla.....	22
Fig. 3-1 Modelo en Ansys de MI Cantoni 1,1 kW	28
Fig. 3-2 Escenarios de falla considerados en la validación mediante FEM	30
Fig. 3-3 Análisis espectral bobina para el MI a velocidad nominal bajo condición sana (FEM)	32
Fig. 3-4 PB (-) MI Cantoni 1,1 kW FEM.....	36
Fig. 3-5 PB (+) MI Cantoni 1,1 kW FEM.....	36
Fig. 4-1 MI Cantoni 1,1 kW	38
Fig. 4-2 Perforaciones realizadas en el rotor del MI	39
Fig. 4-3 Sensor de bobina empleado en la validación experimental	40
Fig. 4-4 Sensor de flujo disperso en posición radial-axial	40
Fig. 4-5 Motor DC General Electric utilizado en el estudio a) Motor DC General Electric 5 HP, b) Placa de datos, c) Acople con torquímetro.....	41
Fig. 4-6 Setup experimental utilizado para las mediciones bajo carga controlada	42
Fig. 4-7 Setup experimental mediciones en vacío a voltaje reducido	43
Fig. 4-8 Modelo de un motor de inducción [1]	44
Fig. 4-9 Espectro FFT para la señal de voltaje inducido en el sensor ubicado en el marco del motor operando en condición de carga nominal para los tres escenarios evaluados	45
Fig. 4-10 Amplitud de las firmas características para el motor operando en condición de carga nominal.....	46
Fig. 4-11 Amplitud de las firmas características para el motor operando al 25% de carga nominal.	47
Fig. 4-12 Amplitud de las firmas características para el motor operando en vacío	48
Fig. 4-13 Potencia integrada para el motor operando en condición de carga nominal	49
Fig. 4-14 Potencia integrada para el motor operando a 25% de carga nominal.....	50
Fig. 4-15 Potencia integrada para el motor operando en vacío	50
Fig. 4-16 Valor de γ considerando diferentes tamaños de muestra	52
Fig. 4-17 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando a condición de carga nominal	53
Fig. 4-18 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando al 25% de carga nominal.....	54
Fig. 4-19 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando en vacío	54
Fig. 4-20 Valores de γ en función de la velocidad de operación para distintos escenarios de falla..	55
Fig. 4-21 Amplitud de las firmas características para el motor a 1450 rpm operando a voltaje reducido	57
Fig. 4-22 Amplitud de las firmas características para el motor a 1485 rpm operando a voltaje reducido	58

Fig. 4-23 Amplitud de las firmas características para el motor a 1497 rpm operando en vacío 59

Fig. 4-24 Potencia integrada en las bandas de frecuencia centradas en $f_s \pm f_r$ en función de la
velocidad 60

Fig. 4-25 Valores de γ para el motor operando en vacío a voltaje reducido en función de la
velocidad 61



1. Introducción

1.1. Introducción General

El Motor de Inducción (MI) es una máquina de corriente alterna (AC, *Alternating Current*) ampliamente utilizada en sistemas de conversión electromecánica. Su diseño robusto, bajo costo de fabricación, alta fiabilidad operativa y simplicidad constructiva lo han posicionado como una de las soluciones más utilizadas hoy en día. En particular, los motores de inducción de jaula de ardilla (MIJA) han sido la opción predominante en entornos residenciales, comerciales e industriales [1].

En el ámbito industrial, los MIJA son los principales proveedores de potencia mecánica, representando aproximadamente el 87% del total de motores AC presentes a nivel mundial [2], siendo la opción dominante para una inmensa variedad de aplicaciones, desde bombas y ventiladores hasta compresores y bandas transportadoras.

En este contexto, las estrategias de operación y mantenimiento en estos equipos influyen de manera directa en la continuidad del servicio y en la seguridad de operación. La detección de fallas en etapas incipientes resulta, por tanto, fundamental para asegurar el desempeño del motor, mitigar daños asociados, evitar fallas de mayor severidad y optimizar las intervenciones de mantenimiento.

Las estrategias de monitoreo basados en la condición del motor (CBM, *Condition-Based Monitoring*) constituyen una alternativa adecuada para evaluar el estado operativo del motor. El principio fundamental del CBM consiste en analizar las características de funcionamiento de la máquina durante su operación, de modo que sea posible anticipar la necesidad de mantenimiento antes de que se manifieste una falla o deterioro significativo [2].

En esta Memoria de Título, se desarrolla un algoritmo orientado al diagnóstico de fallas rotóricas en MIJA, basado en CBM mediante el análisis de firma del flujo magnético disperso (SFSA, *Stray Flux Signature Analysis*).

1.2. El Motor de Inducción

1.2.1 Topologías del Rotor

Como se mencionó en la sección 1.1, el MI es la máquina de corriente AC predominante a nivel industrial. Su principio de operación, como su nombre lo indica, se basa en la inducción

electromagnética. Al aplicar una corriente alterna al estator, se genera un campo magnético giratorio que rota a la velocidad sincrónica. Este campo magnético variable enlaza el rotor, induciendo corrientes en sus devanados o barras de la jaula. La interacción entre dichas corrientes inducidas y el campo magnético del estator da lugar a la aparición de fuerzas electromagnéticas, responsables de la generación del par motor y del movimiento del rotor [1].

Estos motores se pueden clasificar en dos tipos, dependiendo de la construcción de su rotor: el MIJA y el MI de rotor bobinado (MIRB). El primero está formado por barras conductoras dispuestas en forma de jaula conectadas en sus extremos mediante anillos. El segundo consiste en un núcleo de hierro laminado con bobinas aisladas conectadas a anillos rozantes. La Fig. 1-1 presenta el esquema de un MI trifásico y la Fig. 1-2 presenta los dos tipos de rotor utilizados en MI.

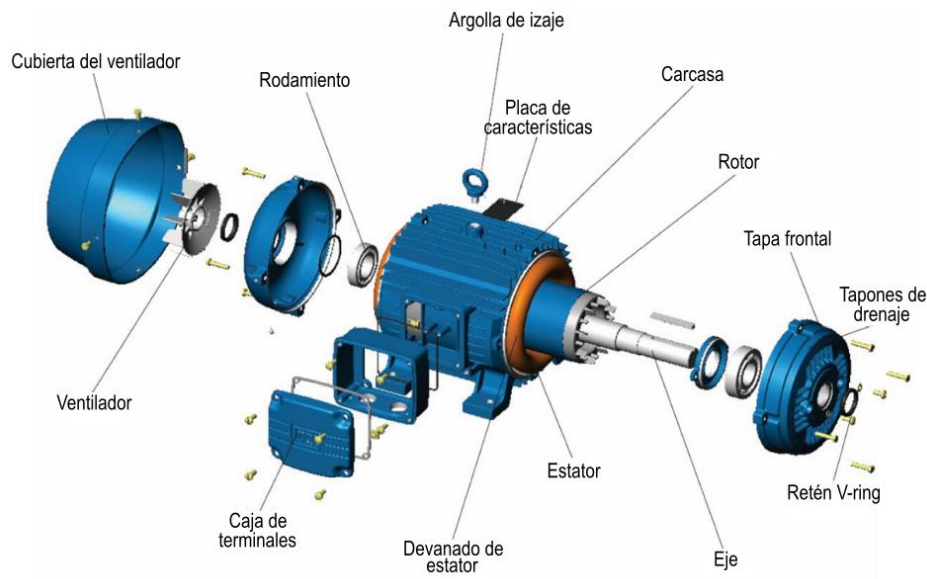


Fig. 1-1 Esquema de un Motor de Inducción trifásico [4]

Los MIJA son los más utilizados en aplicaciones industriales debido a su diseño simple, robusto y altamente confiable. No obstante, los MIRB son preferidos en aplicaciones específicas que demandan un control de velocidad más preciso y un mejor desempeño durante el arranque. Estos últimos, por lo general, presentan mayores dimensiones y requerimientos de mantenimiento significativamente superiores en comparación con los MIJA. En consecuencia, para la mayoría de las aplicaciones industriales, se opta por el uso de MIJA [1].

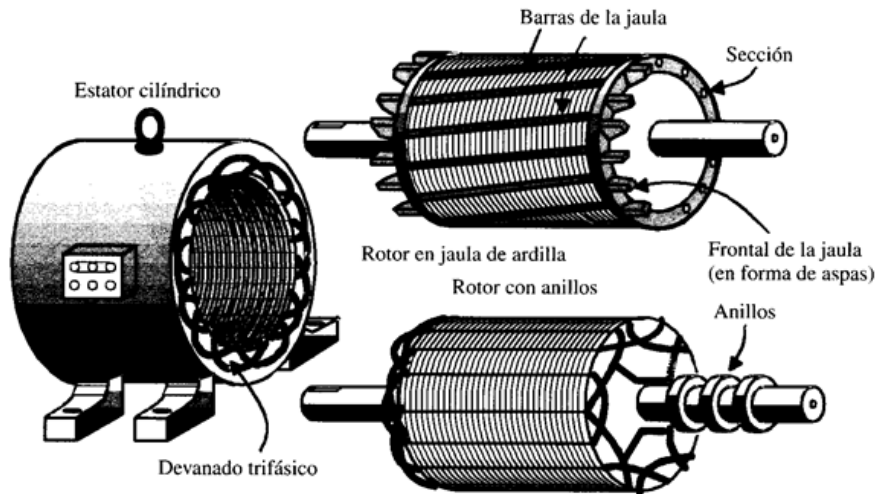


Fig. 1-2 Estator y tipos de rotor de un MI trifásico [5]

1.2.2 Fallas en Motores de Inducción

Las principales causas de fallas en MI están asociadas a tensiones mecánicas, eléctricas y térmicas presentes en entornos industriales [6]. Diversos estudios, como los realizados por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI, *Electric Power Research Institute*) y la Sociedad de Aplicaciones Industriales (IAS, *Industry Applications Society*) del IEE, han mapeado la incidencia de averías en MI. La Tabla 1-1 presenta los resultados de dichos estudios.

A continuación, se realiza una breve descripción de las fallas más comunes en MI.

Tabla 1-1 Incidencia de Fallas en MI

Falla	IEEE, %	EPRI, %
Fallas en el Rotor	8	9
Fallas en los Rodamientos	42	41
Fallas en el Estator	28	36
Otras	22	14

- (i) **Fallas en el Estator.** El estator está compuesto por un núcleo laminado, un marco externo y bobinas eléctricas aisladas. Dado que sus componentes están expuestos a tensiones eléctricas, térmicas y ambientales, su integridad puede deteriorarse con el tiempo, lo que puede derivar en fallas. En motores de baja tensión, estas fallas representan aproximadamente el 9% del total, aumentando al 35%-40% en máquinas de

media tensión y superando el 65% en motores de alta tensión [7], [8].

Las fallas más comunes en el estator son producto de la degradación del aislamiento de los devanados, lo cual puede generar cortocircuitos fase a tierra o entre fases. Si no se detectan a tiempo, estas pueden evolucionar hacia una condición catastrófica. Las causas típicas incluyen, entre otras, sobrecargas durante el arranque, fallos en el sistema de refrigeración, arcos eléctricos, defectos en la laminación del núcleo y temperaturas elevadas [9].

- (ii) **Falla por Barra Rota del Rotor.** Las fallas por barra rota del rotor (BRB, *Broken Rotor Bar*) usualmente tiene lugar en aplicaciones donde se requieren motores de alta potencia expuestos en un entorno altamente estresante de manera regular [6]. En tales condiciones, las cargas oscilantes, el montaje inadecuado del motor, las tensiones mecánicas, así como las tensiones de histéresis, pueden debilitar las uniones que conectan las barras y los anillos finales. Son responsables de $\approx 8-9\%$ del total de fallas en un MI [10].

Existen casos donde la barra no se encuentra totalmente rota, lo que se considera daño parcial o daño incipiente. Esto ocurre, por ejemplo, cuando una barra totalmente rota desvía la corriente hacia las barras adyacentes, acelerando la degradación del resto de barras y agravando la condición. A mayor grado de daño en las barras del rotor, más evidente es su efecto en la corriente, lo que facilita su detección. Sin embargo, en etapas incipientes, las componentes de frecuencia asociadas a la falla presentan menor amplitud, dificultando su identificación [11].

- (iii) **Excentricidad en el Entrehierro.** Entre los diferentes fallos mecánicos que pueden afectar a los MI, la falla por excentricidad destaca de manera prominente, se dividen en: excentricidad dinámica, estática o mixta. Defectos en la manufactura y construcción que llevan a un entrehierro no uniforme o a una alineación incorrecta del estator y el rotor durante la puesta en marcha resultan de una excentricidad estática. La excentricidad dinámica ocurre cuando el centro del rotor no está alineado con el centro de rotación, esto a menudo es causado por la flexión del eje del rotor o fallas en los rodamientos [8], [12].

Las consecuencias de la excentricidad implican directamente la eficiencia del motor. A medida que la excentricidad es mayor, da lugar a un aumento en la corriente del motor y, por lo tanto, en las pérdidas.

- (iv) **Fallas en Rodamientos.** La tasa de fallas en los rodamientos representa aproximadamente entre el 35% al 55% de la cantidad total de fallas en MI [13]. Estos componentes están sometidos a cargas constantes, impactos derivados del desbalance, desalineación y otros esfuerzos mecánicos que aceleran su desgaste [10]. Las consecuencias de estas fallas se extienden más allá del daño mecánico directo en los rodamientos, ya que tienen el potencial de causar daños importantes al motor [12]. Dependiendo su ubicación, estas fallas se clasifican en: defectos en la pista interior, pista exterior, elementos rodantes y jaula [10].

1.3. Mantenimiento en Máquinas Eléctricas

Hoy en día, el mantenimiento ha evolucionado hasta convertirse en una disciplina compleja y altamente especializada, que integra diversas estrategias y técnicas orientadas a responder a los requerimientos específicos de distintas industrias y aplicaciones [14].

Entre los principales tipos de mantenimiento se incluyen [14], [15]:

- (i) **Mantenimiento correctivo.** Se realiza una vez que la falla ya ha ocurrido. Su principal beneficio radica en el bajo costo de implementación, dado que requiere menos planificación y recursos en comparación con otras estrategias.
- (ii) **Mantenimiento preventivo.** Implica tareas rutinarias de mantenimiento destinadas a evitar fallas en el equipo antes de que ocurran. Este enfoque permite reducir la probabilidad de averías severas y evitar reparaciones o reemplazos de mayor costo en el futuro.
- (iii) **Mantenimiento predictivo.** Se basa en el uso de datos y herramientas de análisis para detectar condiciones anómalas y anticipar fallas antes de que estas ocurran. Este enfoque resulta muy eficaz para prevenir fallos en los equipos y reducir los tiempos de inactividad. Además, permite optimizar la planificación de las actividades de mantenimiento y disminuir los costos generales asociados.

- (iv) **Mantenimiento basado en la condición.** Al igual que el mantenimiento predictivo, emplea datos y herramientas de análisis para detectar posibles anomalías. Sin embargo, el CBM se centra en la evaluación continua o en tiempo real del estado del equipo, con el fin de determinar cuándo es necesaria una intervención de mantenimiento, en lugar de estimar cuando puede ocurrir una falla. Este enfoque permite reducir de manera significativa los tiempos de inactividad y mejorar la confiabilidad del equipo.

Dentro de las técnicas de CBM destacan aquellas basadas en el procesamiento de señales, en las cuales se analizan variables físicas medidas (vibraciones, corrientes eléctricas o flujo magnético) con el fin de extraer características e indicadores representativos del estado operativo del sistema [16].

1.3.1 Técnicas de Procesamiento de Señales

Los MI exhiben un comportamiento aproximadamente simétrico bajo condiciones normales de operación. La aparición de fallas altera este comportamiento, generando componentes armónicas específicas de falla en diversas magnitudes del motor (corriente, flujo magnético, voltaje, potencia, etc.) [7]. En este contexto, durante las últimas décadas se han desarrollado y estudiado diversas técnicas de CBM basadas en el procesamiento de señales, orientadas a evaluar el estado de salud de la máquina a partir del análisis dichas componentes armónicas.

Desde el punto de vista del procesamiento de señales, pueden identificarse dos enfoques principales para el diagnóstico de fallas en MI: el análisis en estado estacionario, enfoque adoptado en este trabajo, basado en la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), y el análisis en régimen transitorio, que emplea herramientas matemáticas de descomposición tiempo-frecuencia (TFD, *Time-Frequency Decomposition*) [6].

A continuación, se presenta una breve descripción de los principales métodos de diagnóstico basados en procesamiento de señales empleados en el análisis de MI.

- (i) **Análisis de la Firma de Corriente del Motor.** El monitoreo de corriente es el método más utilizado para la detección de fallas tanto eléctricas como mecánicas en MI. Esta técnica se basa en la medición del espectro de la corriente que contiene información potencial para la detección de fallas. Se han desarrollado diversos estudios sobre la aplicación del análisis de la firma de corriente del motor (MCSA, *Motor Current Signature Analysis*) para el diagnóstico de MI, demostrando ser una herramienta útil. A

través del monitoreo de corriente del estator, es posible identificar fallas como; cortocircuitos, BRB, y problemas mecánicos que impactan las bobinas de estator [7], [17].

Este método de diagnóstico es simple y efectivo bajo condiciones operativas adecuadas. Sin embargo, el MCSA presenta desventajas asociadas a su sensibilidad ante variaciones de carga y condiciones de operación transitorias, pudiendo llevar a falsos positivos/negativos [18].

- (ii) **Análisis de Señales de Vibración.** El monitoreo basado en señales de vibración es una técnica comúnmente utilizada para la detección de fallas mecánicas en MI [10]. En condiciones operativas normales, el MI genera vibraciones de baja amplitud. Cuando se presenta una falla en alguno de sus componentes internos, la excitación mecánica resultante produce un incremento notable en la magnitud de las vibraciones, lo que permite identificar la presencia de la anomalía mediante el monitoreo y análisis de dichas señales a través de sensores de vibración [10].

Un sensor de vibración típico puede medir varias magnitudes que describen el movimiento vibratorio. La empresa Pruftechnik, empresa líder mundial en tecnología de mantenimiento industrial [19], resume que estos dispositivos cuantifican principalmente el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la vibración.

- (iii) **Emisión Acústica.** El monitoreo por emisión acústica (AE, *Acoustic Emmision*) es una técnica empleada ampliamente para la detección temprana de fallos en equipos y máquinas eléctricas rotatorias. Un sistema de AE se fundamenta en dos elementos esenciales: (i) la fuente de emisión, constituida por los mecanismos de deformación o daño interno que ocurre dentro del material o la máquina, y (ii) los transductores encargados de captar las ondas y convertirlas en señales procesables [10].

Diversos estudios han demostrado que el monitoreo mediante AE presenta una eficacia limitada para el diagnóstico de fallas en MI en comparación con metodologías más recientes. Esto evidencia la necesidad de desarrollar enfoques híbridos que integren AE con otras técnicas de monitoreo, como el análisis de vibraciones, con el fin de mejorar la precisión y confiabilidad en la detección de fallas [10].

- (iv) **Análisis de la Firma del Flujo Magnético Disperso.** La distribución total del flujo magnético en un MI, entendido como una medida de la cantidad de campo magnético que atraviesa una superficie, está compuesta por dos elementos principales; el flujo principal y el flujo de fuga [18]. El primero permite la conversión de energía electromecánica, mientras que el segundo no participa de este proceso. El flujo magnético disperso es una pequeña porción del flujo de fuga que se filtra hacia el marco del estator e irradia hacia el exterior [18].

En general, la presencia del flujo disperso está relacionada con diversas causas, entre las que se pueden mencionar: la imposibilidad de construir máquinas perfectamente simétricas, asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos del motor (asimetrías en la disposición de las bobinas y de las ranuras), saturación, y anisotropías propias de los materiales con los cuales fue construida la máquina [21]. SFSA es una técnica basada en la monitorización continua del flujo magnético disperso y su posterior análisis a través del contenido espectral. El análisis espectral en el dominio de la frecuencia proporciona información sobre la componente fundamental y los armónicos presentes, cada máquina tendrá un contenido espectral específico, cambios en éste será el indicador que revelará fallas en el funcionamiento del motor [21].

Entre los distintos sensores que se pueden emplear para medir el flujo magnético disperso encontramos: sensores de inducción o sensores de bobina, utilizados en el apartado experimental de este trabajo, sensores de flujo de efecto Hall y magnetómetros de puerta de flujo.

1.4. Estado del Arte

1.4.1 Detección de fallas en MIJA a través del SFSA

En las últimas décadas, la detección de fallas rotóricas en MIJA mediante SFSA ha sido objeto de un creciente interés en la literatura especializada. Diversos estudios han demostrado que las asimetrías electromagnéticas inducidas por la rotura de barras en el rotor generan componentes espectrales características en el flujo disperso, las cuales pueden ser utilizadas como indicadores confiables del estado de salud del motor [21]. Esta técnica ha llegado a competir de manera directa con el análisis convencional basado en la corriente del motor, MCSA, al haber demostrado su

aplicabilidad exitosa en la detección de diversos tipos de fallas en MI [23], incluyendo fallas rotóricas, defectos en rodamientos y otras anomalías electromecánicas [24]. No obstante, su desempeño puede verse afectado por ruido electromagnético y variaciones en la condición de operación, lo que introduce desafíos en la consistencia del diagnóstico [24].

Desde el punto de vista metodológico, la mayoría de los trabajos basados en SFSA realizan el diagnóstico de fallas a partir del análisis espectral del flujo magnético disperso en régimen estacionario mediante la FFT [6]. Además, la literatura también reporta metodologías enfocadas en el análisis del régimen transitorio de arranque del motor a través de técnicas de análisis en tiempo-frecuencia para rastrear las componentes asociadas a las fallas, aunque estas herramientas suelen exigir una alta carga computacional [25].

En particular, la detección se fundamenta en la identificación y evaluación de las componentes espectrales previamente mencionadas. Dependiendo de la dirección del flujo magnético disperso capturado, i.e. radial, axial o una combinación de ambos (ver Fig. 1-3), es posible obtener diferente información diagnóstica. En la literatura se identifican tres posiciones estándar para la ubicación del sensor: axial, radial y radial-axial. La Fig. 1-4 ilustra esquemáticamente estas configuraciones de medición [21].

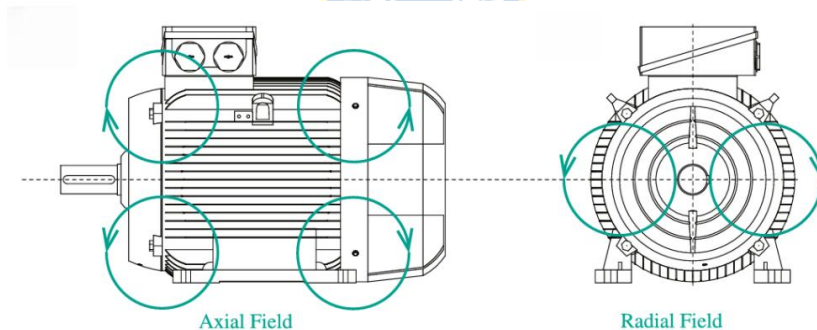


Fig. 1-3 Componentes axial y radial del flujo magnético disperso [21]

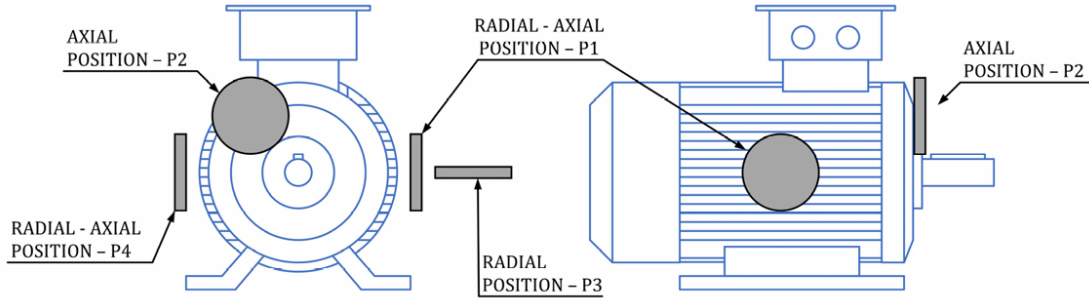


Fig. 1-4 Diferentes posiciones fijas del sensor de flujo [23]

Uno de los enfoques más reportados en la literatura se basa en el análisis de las componentes asociadas a las frecuencias mecánicas del rotor, $f_s \pm f_r$ y sus bandas laterales en $\pm 2sf_s$ de la componente radial del flujo magnético disperso [26], [27]. Diversos estudios han demostrado que las firmas vinculadas a la frecuencia mecánica del rotor presentan un desempeño diagnóstico satisfactorio, incluso en motores operando a muy bajo deslizamiento ($< 1\%$), escenario en el cual las firmas clásicas de BRB, $f_s \pm 2sf_s$, tanto en el flujo magnético como en la corriente del estator, tienden a quedar enmascaradas por la fuga de los armónicos fundamentales. La Fig. 1-5 presenta los resultados del estudio realizado en [29] para un motor operando a un deslizamiento del 1% nominal, donde se observa que las firmas $f_s - f_r \pm 2sf_s$ y $3sf_s$ aumentan de manera significativa en comparación con la condición saludable.

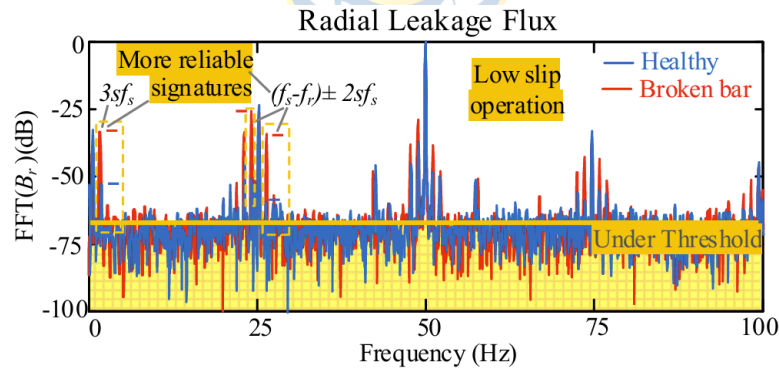


Fig. 1-5 Análisis espectral del flujo magnético disperso radial bajo condiciones de bajo deslizamiento [29]

Cabe destacar que, estas firmas no se observan en el espectro de la corriente del estator; por lo tanto, el SFSA ofrece una capacidad complementaria al MCSA, al permitir la identificación de firmas adicionales asociadas a fallas por barras rotas [28]. La Fig. 1-6 presenta una comparación entre el espectro de la corriente del estator y el espectro del flujo magnético disperso radial para un motor en condición saludable y con barra rota, correspondiente a un estudio realizado en [28] mediante simulación por FEM. Se observa que las componentes $f_s \pm f_r \pm 2sf_s$, sf_s y $3sf_s$ se manifiestan

claramente en el flujo magnético disperso, mientras que no se presentan en el espectro de la corriente del estator.

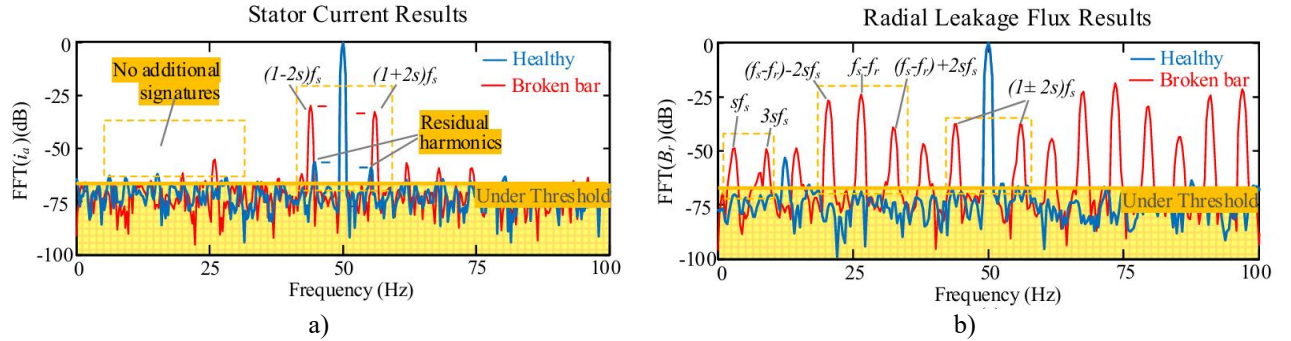


Fig. 1-6 Comparación de firmas características de barra rota
a) corriente del estator, b) componente radial del flujo disperso [28]

Tras la rotura de una barra del rotor, la corriente inducida tiende a redistribuirse hacia las barras adyacentes, incrementando sus densidades de corriente y acelerando su deterioro [29]. En este sentido, se ha demostrado que, a medida que aumenta el número de barras defectuosas adyacentes entre sí, la asimetría electromagnética generada en el rotor se incrementa, dando lugar a firmas espectrales de mayor amplitud [30], [31], [32]. No obstante, la literatura también reporta escenarios en los que se han identificado configuraciones de barras rotas no adyacentes, fenómeno asociado principalmente a jaulas de rotor fabricadas en cobre [32]. Estas configuraciones de daño no adyacente resultan particularmente relevantes desde el punto de vista diagnóstico, ya que pueden provocar una compensación parcial de la asimetría electromagnética percibida desde el estator, reduciendo la sensibilidad de las técnicas convencionales basadas en la corriente, como el MCSA [32]. En particular, se ha demostrado que la asimetría eléctrica puede cancelarse cuando dos barras rotas se encuentran separadas por 90° eléctricos, o cuando tres barras defectuosas se disponen con una separación de 120° eléctricos [30].

Se ha demostrado que el SFSA es capaz de detectar la presencia de fallas de BRB incluso en configuraciones de barras rotas no adyacentes. En [30], los autores investigaron la detección de fallas por BRB mediante el monitoreo de la frecuencia mecánica de rotación del rotor y de las bandas laterales en torno a la frecuencia de suministro del flujo magnético disperso. El estudio consideró distintas configuraciones de daño, incluyendo un rotor sano, 1 BRB, 2 BRB adyacentes y 2 BRB no adyacentes separadas por 90° eléctricos. Se evaluaron comparativamente dos técnicas de diagnóstico: MCSA y SFSA. En el caso del SFSA, se empleó una bobina de núcleo de aire dispuesta en una configuración radial-axial. Los resultados obtenidos a partir del análisis espectral en régimen

estacionario, utilizando la FFT y STFT, muestran que el componente de frecuencia $f_s - f_r$, donde f_s corresponde a la frecuencia de suministro y f_r a la frecuencia mecánica del rotor, permite identificar de manera confiable todas las condiciones de falla, incluyendo el caso de 2 BRB no adyacentes. En contraste, el análisis basado en MCSA no logra detectar de forma robusta esta última configuración de daño. Adicionalmente, los autores demostraron experimentalmente que el componente $f_s - f_r$ no presenta sensibilidad frente a condiciones de carga desbalanceada. Resultados similares han sido reportados por otros autores en [33], [28].

Otro escenario de particular interés abordado en la literatura corresponde a la influencia de los conductos axiales de ventilación. La mayoría de los MI con potencia nominal superior a 100 kW incorporan este tipo de conductos con el fin de mejorar la refrigeración del rotor, reducir la masa e inercia del conjunto, y disminuir los costos asociados a material [34].

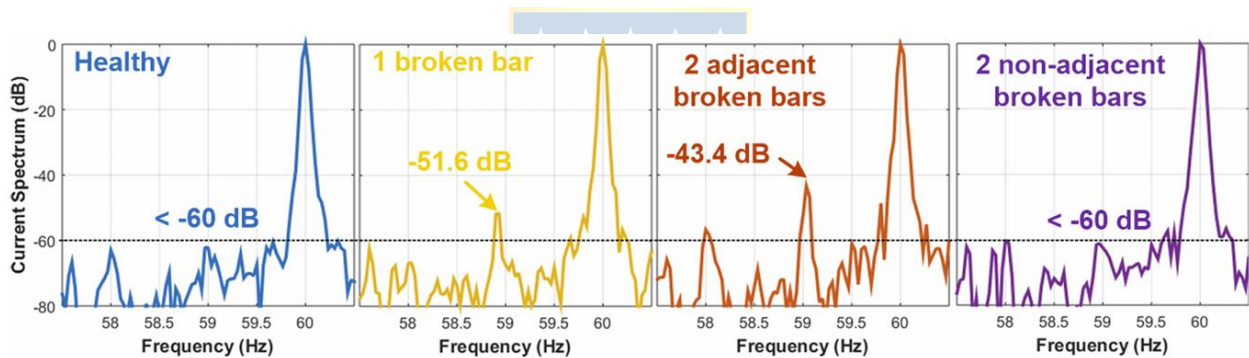


Fig. 1-7 Amplitud de las bandas laterales clásicas de barra rota en el espectro de la corriente del estator [30]

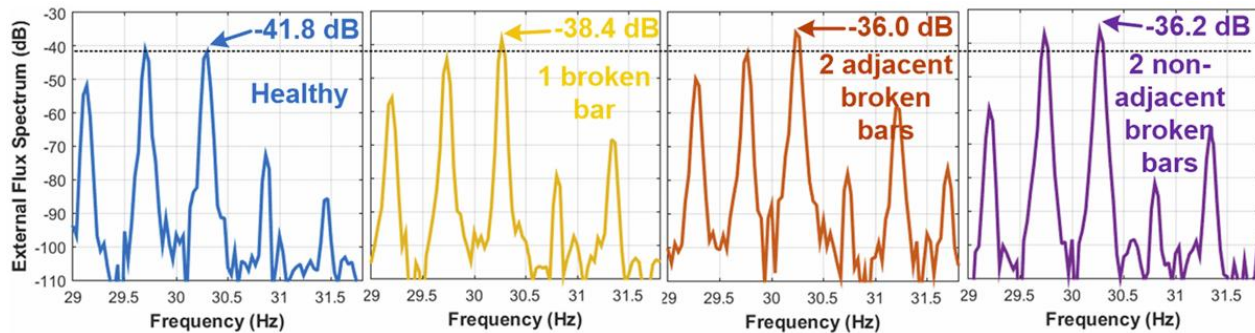
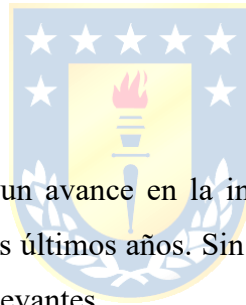


Fig. 1-8 Amplitud de las bandas laterales asociadas a la frecuencia mecánica del rotor en el espectro del flujo magnético disperso [30]

Diversos estudios [35]-[37] han demostrado que la asimetría electromagnética introducida por los conductos axiales de ventilación puede generar componentes espectrales en régimen estacionario, observables tanto en el espectro de vibraciones como en el de la corriente del estator, las cuales pueden

superponerse con frecuencias características asociadas a fallas rotóricas, especialmente cuando el número de conductos axiales coincide con el número de polos del motor. En [38], los autores realizaron una comparación del efecto de los conductos axiales de ventilación sobre el espectro del flujo magnético disperso radial y sobre el espectro de la corriente del estator, a partir de señales obtenidas de un MI equipado con dos configuraciones de rotor: (i) MI de cuatro polos con cuatro conductos axiales de ventilación y sin falla rotórica, y (ii) MI de cuatro polos sin conductos axiales de ventilación y con 1 BRB.

Los resultados del artículo indican que, mientras el espectro de la corriente del estator presenta respuestas similares en ambos casos, la firma característica de barra rota, $f_s \pm 2ksf_s$, en el espectro del flujo magnético disperso radial exhibe una amplitud significativamente mayor en la configuración con falla. Estos resultados evidencian que el análisis del flujo magnético disperso radial es sensible a la presencia de fallas rotóricas, mientras que resulta prácticamente insensible a la influencia de los conductos axiales de ventilación.



1.4.2 *Discusión*

La literatura revisada demuestra un avance en la investigación del uso del flujo magnético disperso como técnica diagnóstica en los últimos años. Sin embargo, el diagnóstico de fallas basado en este método aún presenta desafíos relevantes.

En comparación con el método clásico basado en el análisis de la corriente, una de las principales limitaciones del SFSA radica en la dependencia de los resultados respecto de la posición del sensor, sin existir actualmente una regla general que permita establecer una ubicación óptima de medición. Además, la literatura carece de umbrales estandarizados que permitan cuantificar de manera objetiva la severidad de la falla a partir de las magnitudes espectrales.

No obstante, al tratarse de una técnica completamente no invasiva, y demostrar una elevada sensibilidad y robustez frente a fallas rotóricas, esta técnica se posiciona como una herramienta complementaria y prometedora dentro de los esquemas modernos de CBM.

En este contexto, existe la necesidad de profundizar en el desarrollo de criterios de análisis que facilitan la evaluación del estado del motor. Resulta relevante avanzar hacia la definición de indicadores que permitan cuantificar de manera objetiva la condición del motor a partir de la

información espectral obtenida.

1.5. Objetivos

1.5.1 *Objetivo General*

Desarrollar e implementar un algoritmo de análisis del flujo magnético de dispersión, para la detección y diagnóstico de fallas típicas en el rotor de máquinas de inducción de jaula de ardilla, evaluando su sensibilidad y factibilidad de aplicación en un entorno experimental.

1.5.2 *Objetivos Específicos*

- **OE1:** Identificar las características de la forma de onda del flujo magnético de dispersión que estén relacionadas con fallas usuales en el rotor de una máquina de inducción de jaula de ardilla (excentricidad, desalineamiento, rotura de barras o anillos).
- **OE2:** Implementar un algoritmo de detección de fallas basado en el análisis del flujo magnético de dispersión en ambiente computacional.
- **OE3:** Determinar la sensibilidad y aplicabilidad del algoritmo implementado tanto en entorno de simulación como de laboratorio.

1.6. Alcances y Limitaciones

Este trabajo se enfoca en el diagnóstico de fallas rotóricas en MIJA, específicamente en la detección de rotura de barras, mediante el SFSA. No se abordan otros tipos de fallas, tales como fallas en estator, excentricidad o defectos en rodamiento, ni combinaciones de fallas múltiples, por lo que el desempeño del método bajo estas condiciones no es evaluado.

El procesamiento de señales se base en la Transformada Rápida de Fourier y en la estimación de la densidad espectral de potencia, lo que implica que las mediciones se realizan bajo condiciones de operación en régimen estacionario. En consecuencia, no se consideran transitorios de arranque ni variaciones rápidas de carga.

La validación del algoritmo se realiza mediante simulación por elementos finitos y resultados experimentales, evaluando la máquina en distintas condiciones de operación. Sin embargo, el estudio se limita a un único motor, por lo que los resultados no son directamente generalizables a otras configuraciones, potencias o diseños constructivos.

Asimismo, el análisis se realiza considerando alimentación directa desde la red, sin evaluar el efecto de variadores de frecuencia. Dado que estos introducen armónicos y modulación en frecuencia, su impacto sobre las firmas espectrales y el desempeño del método queda fuera del alcance de este trabajo.

La simulación FEM corresponde a un modelo bidimensional (2D) previamente diseñado y calibrado en el Laboratorio de Ensayos de Máquinas Eléctricas de la Universidad de Concepción. Por ello, las señales obtenidas representan únicamente la componente radial del flujo magnético, mientras que la componente axial, que requeriría modelos tridimensionales (3D), no es considerada. No obstante, esto no constituye una limitación crítica, dado que las firmas espectrales más robustas reportadas en la literatura se asocian principalmente a la componente radial.



2. Metodología

2.1. Introducción

En esta sección se presenta la metodología asociada a la presente Memoria de Título. Se distinguen dos enfoques metodológicos: la metodología base y la metodología propuesta. Por metodología base se entiende el procedimiento clásico ampliamente documentado en la literatura técnica para la detección de fallas en MI mediante SFSA.

2.2. Base Teórica: Frecuencias Características

En el Capítulo 1 se mencionó que los MI, en caso de presentar una falla, generan componentes armónicas específicas asociadas a esta condición. Estas componentes, conocidas como firmas características de falla, son la base del diagnóstico mediante técnicas de procesamiento de señales.

En el estado del arte se describen distintas firmas características presentes en el espectro del flujo magnético disperso y empleadas para el diagnóstico de fallas en el rotor. No obstante, el fundamento físico que explica su aparición no se discute. En esta sección se desarrolla dicho fundamento.

2.2.1 Generación de las bandas laterales de la frecuencia fundamental $(1 \pm 2s)f_s$ [6]

En un MIJA, el par electromagnético se produce por la interacción entre el campo magnético del estator y el campo magnético inducido en el rotor. El estator genera un campo giratorio a la frecuencia eléctrica f_s , correspondiente a la frecuencia de suministro. Este campo induce corrientes en el rotor, las cuales producen un campo giratorio que, visto desde el rotor, varía a la frecuencia de deslizamiento sf_s .

Una asimetría en la jaula del rotor, como una falla de barra rota/anillo final, produce un campo magnético inverso que, visto desde el marco de rotor, gira a $-sf_s$. Con respecto al marco del estator, la frecuencia del campo magnético inverso está dada por,

$$f_{brb} = (1 - 2s)f_s \quad (2.1)$$

siendo s el deslizamiento del motor. Este campo se enlaza con los devanados del estator e induce una fuerza electromotriz (FEM) a f_{brb} . La FEM inducida en el estator produce una corriente i_1 a la misma frecuencia. Esta corriente, al interactuar con el flujo magnético fundamental, produce un torque

oscilatorio a frecuencia $2sf_s$ dado por:

$$\Delta T(t) = 3P\phi I_1 \cos(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1})) \quad (2.2)$$

donde P es el número de pares de polos y todos los desplazamientos de funciones senoidales se refieren al componente de corriente fundamental.

Esta ondulación de torque da lugar a una variación de la velocidad promedio, ω_r , de acuerdo con la siguiente relación:

$$J \frac{d}{dt} \Delta\omega_r(t) = \Delta T(t) \quad (2.3)$$

Despejando ω_r ,

$$\begin{aligned} \Delta\omega_r(t) &= \frac{1}{J} \int \Delta T(t) dt \\ &= -\frac{3P\phi I_1}{J2s\omega} \sin(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1})) \end{aligned} \quad (2.4)$$

donde J es la inercia total y $\Delta\omega_r$ representa las ondulaciones de velocidad producto de la falla.

La variación de la velocidad del rotor es percibida por el estator como una variación angular mecánica en el estator y puede calcularse mediante la integración de la velocidad del rotor,

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) &= \int \Delta\omega_r(t) dt = \int -\frac{\Delta T}{J2s\omega} \sin(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1})) dt \\ &= -\frac{\Delta T}{J4s^2\omega^2} \cos(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1})) \end{aligned} \quad (2.5)$$

El flujo fundamental enlazado, $\phi_f(t) = \phi \cos(\omega t - \alpha_\phi)$, con la variación angular producto de la falla queda de la siguiente forma:

$$\phi_f(t) = \phi \cos\left((\omega t - \alpha_\phi) - \left(-\frac{\Delta T}{J4s^2\omega^2} \cos(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1}))\right)\right) \quad (2.6)$$

Dado que la ondulación de torque generada por la falla es pequeña, la variación de velocidad que produce también lo es, y en consecuencia el desplazamiento angular $\Delta\theta$ resulta de muy baja magnitud. Bajo esta condición, es válido aplicar una aproximación de primer orden, reemplazando las

funciones trigonométricas evaluadas en $\Delta\theta$ por el primer término de su expansión en serie de Taylor. De este modo, se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi_f(t) = \phi \cos(\omega t - \alpha_\phi) + \phi \sin(\omega t - \alpha_\phi) \sin\left(-\frac{\Delta T}{J4s^2\omega^2} \cos(2s\omega t - (\alpha_\phi - \alpha_{I1}))\right) \quad (2.7)$$

Este flujo induce en los devanados del estator dos FEM dadas por:

$$\begin{aligned} & \omega \frac{\phi}{2} \frac{\Delta T}{J4s^2\omega^2} \{(1 - 2s) \sin[(1 - 2s)\omega t - \alpha_{I1}] \\ & - (1 + 2s) \sin[(1 + 2s)\omega t - (2\alpha_\phi - \alpha_{I1})]\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

La ecuación (1.8) revela la aparición de dos componentes laterales con frecuencia de,

$$f_{brb1} = (1 \pm 2s)f_s \quad (2.9)$$

Estas componentes armónicas se conocen como bandas laterales de la frecuencia fundamental del motor.

2.2.2 Generación de las componentes armónicas relacionadas a la frecuencia mecánica ($f_s \pm f_r$) [27]

El flujo radial en el entrehierro se puede obtener a partir del producto entre la fuerza magnetomotriz en él, F_{ag} , y su distribución de permeancia, P_{ag} . Bajo condiciones de falla en el rotor, F_{ag} y P_{ag} pueden ser expresadas como,

$$F_{ag}(t, \theta) = \int (J_s(t, \theta) + J_r(t, \theta) \cdot D_r(t, \theta)) \cdot d\theta \quad (2.10)$$

$$P_{ag} = \frac{\mu_0}{g} \quad (2.12)$$

Donde J representa la densidad de corriente, D la distribución espacial de la corriente en las ranuras del rotor, μ_0 es la permeabilidad del aire, y g corresponde al entrehierro. θ denota el ángulo medido respecto del sensor de flujo en el entrehierro, y los subíndices s y r identifican al estator y al rotor, respectivamente.

Asumiendo una distribución de corriente sinusoidal, J_s y J_r pueden ser expresadas de la siguiente forma,

$$J_{s(r)}(t, \theta) = J_{s(R)} \cdot \sin(2\pi f_s t - p\theta - \theta_{s(r)}) \quad (2.13)$$

donde J_s y J_R son los valores máximos, y θ_s y θ_r son los ángulos de fase.

La distribución espacial de la corriente en las ranuras del rotor, $D_r(t, \theta)$, para un rotor saludable se asume como uniforme, $D_r(t, \theta) = 1$. En presencia de una barra rota, dicha distribución deja de ser constante y pasa a presentar una discontinuidad en la posición angular correspondiente a la ranura defectuosa.

Desde una perspectiva electromagnética, esto implica que $D_r(t, \theta)$ conserva una periodicidad espacial de $2\pi/N_r$, asociada a la disposición equiespaciada de las ranuras del rotor. No obstante, la presencia de la barra rota introduce una discontinuidad fija en el marco rotórico. Por lo tanto, para un observador estacionario en el estator, dicha discontinuidad se desplaza angularmente a medida que el rotor gira a una velocidad eléctrica f_r . Así, para cualquier instante t , la función $D_r(t, \theta)$ es periódica en la variable espacial θ con periodo $2\pi/N_r$, cumpliéndose que,

$$D_r\left(t, \theta + \frac{2\pi}{N_r}\right) = D_r(t, \theta) \quad (2.14)$$

La función periódica $D_r(t, \theta)$ cuando existe una barra rota en un rotor con N_r ranuras puede ser expresada como la siguiente serie de Fourier,

$$D_r(t, \theta) = 1 - \left(\frac{1}{N_r} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \cdot \sin \frac{k\pi}{N_r} \cdot \sin(2k\pi f_r t - \theta) \right) \quad (2.15)$$

Por lo tanto, asumiendo que el sensor de flujo está ubicado a $\theta = 0^\circ$, el flujo en el entrehierro para un rotor sano y con falla, $B_{ag,h}$ y $B_{ag,brb}$ puede ser derivado de $F_{ag}(t, \theta) \cdot P_{ag}(t, \theta)$ como,

$$B_{ag,h}(t) = \frac{\mu_0}{gp} \{ J_s \cos(2\pi f_s t - \theta_s) + J_r \cos(2\pi f_s t - \theta_r) \} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
B_{ag,brb}(t) = & \frac{\mu_0}{g} \left\{ \frac{J_s}{p} \cos(2\pi f_s t - \theta_r) + \frac{J_r}{p} \left(1 - \frac{1}{N_r} \right) \cos(2\pi f_s t - \theta_r) \right. \\
& + \frac{J_r}{p+1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin \frac{k\pi}{N_r} \sin(2\pi(f_s + kf_r)t - \theta_r) \\
& \left. - \frac{J_r}{p-1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin \frac{k\pi}{N_r} \sin(2\pi(f_s - kf_r)t - \theta_r) \right\}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

La comparación entre (2.16) y (2.17) evidencia la aparición de componentes adicionales en el caso defectuoso. Se observa que la asimetría introducida por la barra rota genera bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental del estator, ubicados en múltiplos enteros de la frecuencia rotórica. Estas componentes se encuentran en,

$$f_{brb2} = f_s \pm kf_r, \quad k = 1, 2, 3, \dots \tag{2.18}$$

Además, las componentes armónicas de la frecuencia mecánica tienen sus propias bandas laterales inducidas por la asimetría magnética producto de la barra rota en:

$$f_{brb2sb} = f_s \pm kf_r \pm 2sf_s \tag{2.19}$$

2.3. Metodología Base

En la literatura se ha demostrado que la variación en la amplitud de las firmas características de falla permite detectar fallas rotóricas en MIJA. Sin embargo, la mayoría de los estudios reporta resultados obtenidos con el motor operando bajo condición de carga nominal, sin analizar la confiabilidad del método en escenarios de baja carga. Estos escenarios resultan particularmente exigentes desde el punto de vista diagnóstico, debido a la dependencia de las firmas características con el deslizamiento del motor.

En este estudio se consideran distintos niveles de carga mecánica, evaluando el comportamiento espectral de las firmas características asociadas a fallas de barra rota. Esto permite analizar su desempeño diagnóstico y discutir la fiabilidad del método bajo distintas condiciones de operación, incluyendo escenarios de baja carga.

Para ello, se desarrolla un algoritmo orientado a la identificación y evaluación de las componentes espectrales descritas en la Sección 2.2. A continuación, se detalla el procedimiento

implementado.

2.3.1 Adquisición y preprocesamiento

En primer lugar, se adquiere la señal temporal de flujo magnético disperso. En este caso se emplean señales obtenidas por simulación mediante el método de elementos finitos, y señales experimentales medidas a través de una bobina de búsqueda ubicada en la superficie exterior de la carcasa del motor. Posteriormente, se elimina el transitorio de la señal y se aplica una ventana de Hanning, método estándar en análisis de señales, para reducir los efectos de la fuga espectral antes de transformar la señal al dominio de la frecuencia mediante la FFT.

2.3.2 Identificación de Firmas Características

Una vez calculado el espectro FFT de la señal, se identifican las componentes espectrales, mencionadas anteriormente, dentro de una banda de búsqueda centrada en la ubicación teórica de la frecuencia característica de falla.

Se define una banda de búsqueda ($\mathcal{B}_x$) centrada en la ubicación teórica (f_t) de la frecuencia,

$$\mathcal{B}_x = [f_t - \Delta f_{\text{bus}}, f_t + \Delta f_{\text{bus}}] \quad (2.20)$$

donde $\Delta f_{\text{bus}} = k \cdot \Delta f_{\text{res}}$, siendo Δf_{res} la resolución espectral y k un parámetro de diseño que define el ancho de la banda de búsqueda.

Dado que la resolución espectral es de 0.05 Hz, se selecciona un valor inicial de $k = 10$. En el caso de un motor de 4 polos, energizado a 50 Hz, esto se traduciría en poder analizar una variación del deslizamiento del ± 0.5 %. Esto garantiza que la banda de búsqueda cubra la dispersión asociada a pequeñas variaciones del deslizamiento.

Dentro de cada banda se identifica el máximo espectral. Al identificar el valor más alto dentro del rango definido, se confirma la presencia y localización real de la firma en la medición:

$$A_x = \max_{f \in \mathcal{B}_x} |X(f)| \quad (2.21)$$

2.3.3 Diagnóstico basado en la amplitud

Dado que cada motor es único, se comparan las amplitudes de los armónicos actuales con una

medición inicial del motor en estado saludable. En la Fig. 2-1 se observa el espectro FFT del flujo disperso, para un estudio realizado en [39], donde se identifica la falla a través del incremento en la amplitud de las firmas marcadas (ver Fig. 2-1(b)) con respecto al caso sano (ver Fig. 2-1(a)).

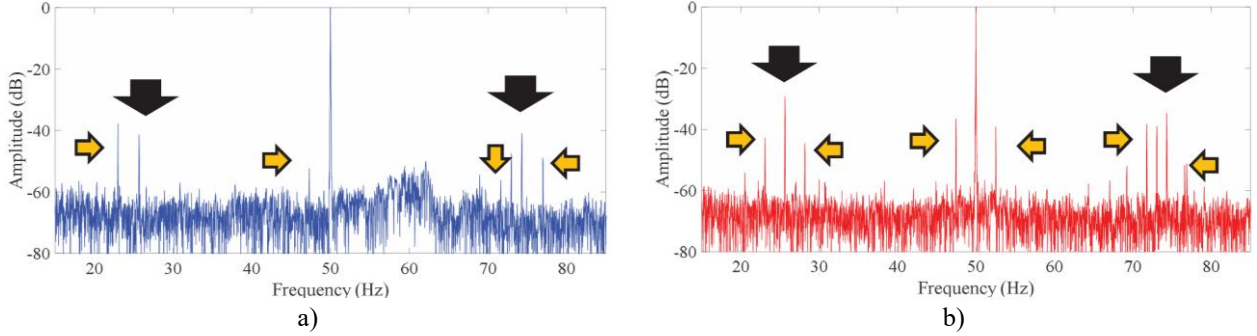


Fig. 2-1 Comparación espectro FFT de motor sano y con falla

Espectro FFT medido en [39] para; a) Motor sano, b) Motor con 1 barra rota

2.4. Metodología Propuesta

En esta memoria se propone una metodología basada en la integración de la potencia contenida en bandas de frecuencia específicas de falla de barra rota. La justificación física de este enfoque se fundamenta en que, durante la operación industrial, las variaciones inherentes del par de carga provocan fluctuaciones dinámicas en el deslizamiento del motor. Esta dinámica modula las frecuencias características y dispersa su energía, produciendo una alta variabilidad en la amplitud de los picos espectrales incluso cuando el motor opera en condiciones normales.

Al evaluar una banda de frecuencias en vez de evaluar una amplitud puntual, la disipación de energía también se considera dentro de ella, lo que apunta a reducir la varianza entre mediciones.

2.4.1 Estimación de la Densidad Espectral de Potencia

La densidad espectral de potencia (PSD, *Power Spectral Density*) representa la distribución de potencia por unidad de frecuencia para señales estacionarias. En este estudio, la señal de voltaje inducido en el sensor se trata como una señal estacionaria en sentido amplio (WSS, *Wide Sense Stationary*), lo que implica que su media y funciones de autocorrelación son invariantes en el tiempo [40]. Esta condición es válida al realizar las mediciones bajo el régimen permanente del motor.

El método Welch, utilizado en este trabajo, es un estándar para la estimación de la PSD en señales WSS, basado en la división de la señal $x[n]$ en L segmentos de longitud M superpuestos entre sí. A cada segmento se le aplica una función ventana $w[n]$. En este caso se emplea una ventana de Hann para mitigar los efectos de la fuga espectral. La ecuación (3.4) define esta función ventana.

$$w[n] = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{M+1} \right) \right), \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (2.22)$$

Posteriormente, se calcula la DFT de cada segmento, ecuación (3.5), y el correspondiente periodograma modificado se obtiene según la ecuación (3.6).

$$X_i[k] = \sum_{n=0}^{M-1} x_i[n] w[n] e^{-j\frac{2\pi}{M}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.23)$$

$$\check{P}_{xx}^i[k] = \frac{1}{M \cdot U} |X_i[k]|^2 \quad (2.24)$$

Donde U corresponde al factor de normalización, definido en (3.7), que compensa la atenuación energética introducida por la ventana. La estimación de la PSD se obtiene promediando los periodogramas modificados de los L segmentos según (3.8).

$$U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2[n] \quad (2.26)$$

$$P_{xx}^W[k] = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \check{P}_{xx}^i[k] \quad (2.27)$$

La estimación de la PSD se realiza con la función `pwelch` en Matlab. Se utiliza una longitud de segmento de $M = 4096$ y un solapamiento del 50% entre segmentos consecutivos, configuración típicamente utilizada en combinación con la ventana de Hann en el método de Welch [40].

2.4.2 Potencia Espectral en Banda

Para obtener una magnitud de potencia finita vinculada a un fenómeno físico, la PSD se integra sobre una banda de frecuencia específica. Este cálculo define la Potencia en Banda (PB, *Power Band*), que representa la potencia media de la señal contenida en dicha banda [41].

Dado que $P_{xx}^W[k]$, calculado en la Sección 2.4.2, corresponde a la PSD de una señal discreta, la integral se aproxima numéricamente mediante la regla trapezoidal según la ecuación (3.10).

$$PB \approx \sum_{k \in \mathcal{B}} \frac{P_{xx}^W[k-1] + P_{xx}^W[k]}{2} \Delta f \quad (2.28)$$

Donde $[f_{\text{inf}}, f_{\text{sup}}]$ corresponden al límite inferior y superior de la banda de frecuencia considerada, Δf corresponde a la resolución espectral de la PSD y el conjunto $\mathcal{B}$ agrupa los índices de frecuencia tales que $f_k \in [f_{\text{inf}}, f_{\text{sup}}]$.

Las bandas de interés se ubican en torno a las componentes $f_s \pm f_r$, localizadas según la metodología definida en la Sección 2.3.

Para cada una de estas componentes, se define un intervalo de integración delimitado por las bandas laterales propias de la frecuencia de rotación en $\pm 2sf_s$. De esta manera, se definen los límites de integración de las dos bandas de interés como: $[f_s - f_r - 2sf_s, f_s - f_r + 2sf_s]$ para la banda inferior, denominada $PB_{\text{fr}}^{(-)}$, y $[f_s + f_r - 2sf_s, f_s + f_r + 2sf_s]$ para la banda superior, denominada $PB_{\text{fr}}^{(+)}$.

En la literatura, las firmas se evalúan respecto a la componente fundamental para reducir la influencia de las condiciones operativas. Mientras que en métodos basados en FFT la normalización suele fijar la fundamental en 0 dB, este enfoque eliminaría la relación directa entre la PB y asimetría física del rotor. Por ello, la normalización se realiza a nivel de potencia, definiendo un índice relativo definido en la ecuación (2.29).

La potencia PB_{fs} se define como la potencia integrada asociada a la frecuencia fundamental y se obtiene integrando la PSD en el intervalo $[f_s - \Delta f, f_s + \Delta f]$. Donde el semiancho de banda Δf alrededor de la fundamental definido por la ecuación (2.30).

$$PB = \frac{PB_{\text{fr}}}{PB_{\text{fs}}} \quad (2.29)$$

$$\Delta f = 0.5 \cdot 2sf_s = sf_s \quad (2.30)$$

Esto permite capturar la potencia asociada a la fundamental manteniendo una separación respecto de las bandas laterales asociadas a falla de barra rota en f_{brb1} . La selección del factor 0.5 en

la ecuación (3.12) garantiza que la potencia PB_{fs} capture la energía de la frecuencia fundamental sin contaminarse con la energía proveniente de la asimetría del rotor. Cabe destacar que esta magnitud, al obtenerse mediante la integración de la PSD, presenta unidades de Wb^2 ; sin embargo, al ser normalizada, la cantidad física resultante es adimensional.

2.4.3 Caracterización del motor

A diferencia de otras técnicas; como el análisis de vibraciones, donde existen normas como la ISO 10816 [44] que establecen valores de referencia que permiten discriminar entre condiciones sanas y defectuosas, o MCSA, donde existen umbrales estandarizados que permiten identificar la falla [45], en el SFSA no existe un consenso general.

Una gran variedad de estudios señala que predeterminar valores umbrales para los armónicos de flujo que permitan distinguir entre un motor defectuoso de uno sano resulta complejo debido a que se ven afectados por múltiples factores [21], tales como: tolerancias constructivas, condiciones de operación y características específicas de cada motor.

Por esta razón, en esta Memoria de Título se propone un método estadístico para la detección de fallas en la jaula del MIJA, basado en la caracterización previa del comportamiento del motor en condición saludable. El enfoque consiste en analizar la PB asociadas a los armónicos de interés, obtenida mediante la metodología descrita en la Sección 2.4.2, y evaluar estadísticamente su variabilidad en estado sano.

Para ello se utiliza la desviación absoluta de la mediana (MAD, *Median Absolute Deviation*), seleccionada por su robustez frente a valores atípicos en escenarios donde los datos no siguen una distribución normal [42], como es el caso de las mediciones de flujo. La MAD se calcula según la siguiente ecuación,

$$MAD(\omega) = \text{median}(|PB_i(\omega) - \tilde{x}|) \quad (2.31)$$

donde $PB_i(\omega)$ representa las mediciones individuales de la potencia integrada en condición sana para la velocidad ω , y $\tilde{x}$ corresponde a la mediana de estas mediciones.

2.4.4 Índice γ

A partir de esta caracterización estadística se define un indicador adimensional, denominado γ ,

que cuantifica el grado de desviación de una medición individual de PB respecto a la variabilidad natural del sistema. La hipótesis planteada en esta Memoria es que el índice γ permite discriminar entre condición sana y defectuosa a partir de valores anómalos de desviación respecto al comportamiento previamente caracterizado en estado saludable.

De manera matemática, el índice γ está definido por la ecuación,

$$\gamma = \frac{\text{desviación de la medición}}{\text{variabilidad natural del sistema}} = \frac{|PB_i(\omega) - \tilde{x}_{\text{ref}}|}{MAD_{\text{ref}}} \quad (2.32)$$

donde $PB_i(\omega)$ corresponde a la medición individual de PB en análisis, $\tilde{x}_{\text{ref}}$ corresponde a la mediana de estas mediciones, y MAD_{ref} corresponde a la MAD de las mediciones del motor en condición sana.

2.5. Etapa de Validación

El proceso de validación se estructura en dos etapas. En primer lugar, se emplean señales obtenidas mediante simulación en elementos finitos, lo que permite verificar la confiabilidad del algoritmo en un entorno ideal, sin perturbaciones externas, variaciones de torque, etc. En una segunda etapa, se realiza la validación experimental, con el objetivo de evaluar el desempeño del algoritmo bajo condiciones reales de operación.

A continuación, se detalla cada etapa.

2.5.1 Validación mediante Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (FEM, *Finite Element Method*) es una técnica numérica que permite resolver problemas físicos complejos dividiendo el dominio del sistema en un conjunto de pequeños elementos, llamados elementos finitos, dentro de los cuales las ecuaciones que gobiernan el fenómeno se aproximan mediante funciones conocidas.

En el contexto de este trabajo, se emplea el FEM para simular el comportamiento electromagnético del MI bajo diferentes condiciones de operación, permitiendo el análisis de dichas condiciones sin intervención física sobre el motor.

El modelo del MI corresponde a un modelo 2D diseñado y calibrado en estudios anteriores. Sobre este modelo se introduce un sensor de flujo consistente en un sensor de bobina, el cual permite la medición del flujo magnético disperso alrededor del marco del motor. A partir de las simulaciones

electromagnéticas, se obtiene la señal de voltaje inducido en el sensor bajo las distintas condiciones de operación. Estas señales se emplean como validación inicial del algoritmo desarrollado, permitiendo verificar la validez del método de diagnóstico establecido en la Sección 2.4.

La validación en entorno FEM permite verificar la coherencia física del índice basado en la potencia integrada bajo condiciones idealizadas, donde la única fuente de asimetría corresponde a la falla rotórica modelada. Este análisis controlado constituye una etapa preliminar fundamental, ya que permite aislar el efecto electromagnético de la rotura de barras antes de evaluar el desempeño del algoritmo en un entorno experimental sujeto a variabilidad real.

2.5.2 *Validación Experimental en Laboratorio*

Una vez validado el algoritmo desarrollado en un entorno ideal mediante simulaciones por FEM, se procede a validar de manera experimental con el objetivo de evaluar su desempeño frente a señales reales de un MI. Esta etapa permite analizar la robustez del método ante la presencia de ruido, variaciones operacionales y perturbaciones inherentes al entorno experimental.

La configuración experimental corresponde al MI bajo diferentes condiciones de operación, definidas en el **Capítulo 4**, correspondientes al MI en condición sana y diferentes escenarios de fallo considerando distintas severidades de daño.

El sistema de medición utilizado para la adquisición del flujo magnético disperso corresponde a un sensor de tipo bobina, similar al empleado en las simulaciones, ubicado en una posición fija alrededor del marco del motor. Las señales adquiridas corresponden al régimen permanente de operación del motor, evitando transitorios de arranque o cambios bruscos de carga.

3. Etapa de Validación: Método de Elementos Finitos

3.1. Modelo del MI

Con el objetivo de validar el desempeño del algoritmo de diagnóstico desarrollado, se realiza un análisis electromagnético de un MIJA de 4 polos y 1.1 kW. Este motor, perteneciente al Laboratorio de Ensayos de Máquinas Eléctricas (LEME) de la UdeC, se modela en el software Ansys Electronics 2024 en 2D. Esta aproximación 2D no captura efectos axiales, por lo que las señales de flujo obtenidas corresponderán exclusivamente al componente radial. La Fig. 3-1 muestra el modelo del MI en Ansys. Los detalles del motor están dados en la Tabla 3-1. El sensor de flujo disperso consiste en una bobina de búsqueda compuesta por 1000 vueltas de alambre de cobre, con la entrada y salida enrolladas en un punto del perímetro de la máquina cercano al marco del estator (ver círculos verdes en Fig. 3-1).

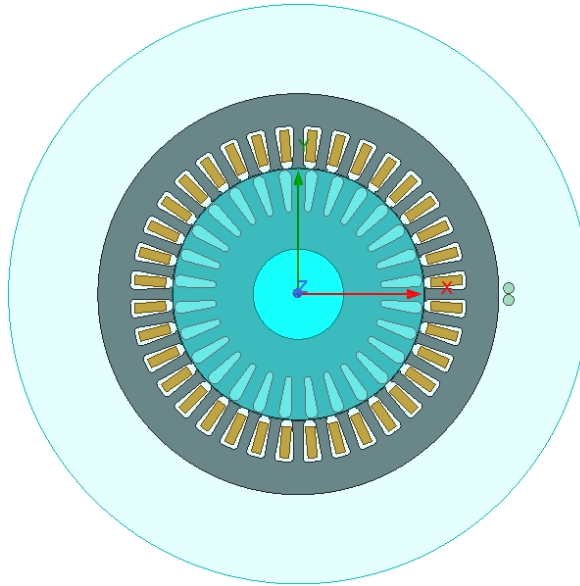


Fig. 3-1 Modelo en Ansys de MI Cantoni 1,1 kW

Para poder distinguir correctamente las componentes de frecuencia asociadas a fallas, es necesario contar con buena resolución espectral. Resolución espectral se entiende como el ancho de bin del espectro, es decir, el espaciado entre componentes de frecuencia de la FFT, dado por la ecuación (3.1).

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

Donde, Δf es el espaciado entre bins, y T es la duración efectiva del tramo analizado. Como la banda lateral clásica de barra rota está separada por $2sf_s$, para deslizamientos bajos se requiere una Δf pequeña; en nuestro caso, con $s = 0.002$ en vacío, la separación mínima es de 0.2 Hz. Por lo tanto, se necesita $T \geq 5$ s como mínimo para observar dichas bandas.

Tabla 3-1 Detalles del MI Cantoni

Características	Valor
Frecuencia de alimentación	50 Hz
Conexión del estator	Y
Potencia de salida	1.1 kW/1.5 HP
Corriente nominal	4.6 Δ / 2.6 Y A
Numero de pares de polos	2

Para garantizar una representación fiable de las señales en el dominio temporal y frecuencial, en las simulaciones por FEM se empleará un tiempo total de adquisición de 5 s. Y la frecuencia de muestreo se fijó en 2 kHz.

En la literatura, el enfoque más común para validar el uso del flujo magnético disperso como técnica de diagnóstico es someter a los motores a niveles incrementales de daño en el rotor [6]. Esto permite evaluar la linealidad de los indicadores de falla y la sensibilidad diagnóstica de esta técnica.

Los escenarios más comunes son: el motor sin falla como referencia, el motor con 1 BRB y escenarios de múltiples barras rotas en distintas posiciones; ubicadas de manera adyacente, separadas a 120° eléctricos, etc.

Tabla 3-2 Escenarios de Falla de BRB en FEM.

Escenario	Condición
#1	Máquina de referencia (sana)
#2	Máquina con 1 BRB
#3	Máquina con 3 BRB adyacentes
#4	Máquina con 3 BRB no adyacentes

Para modelar una barra rota en elementos finitos, se reemplazó el material conductor, en este caso aluminio, por “vacío”. De esta forma no es posible la circulación de corriente en la barra, emulando una barra completamente rota. Los escenarios de falla se presentan en la Tabla 3-2. La Fig.

3-2 muestra el modelo en Ansys para cada caso.

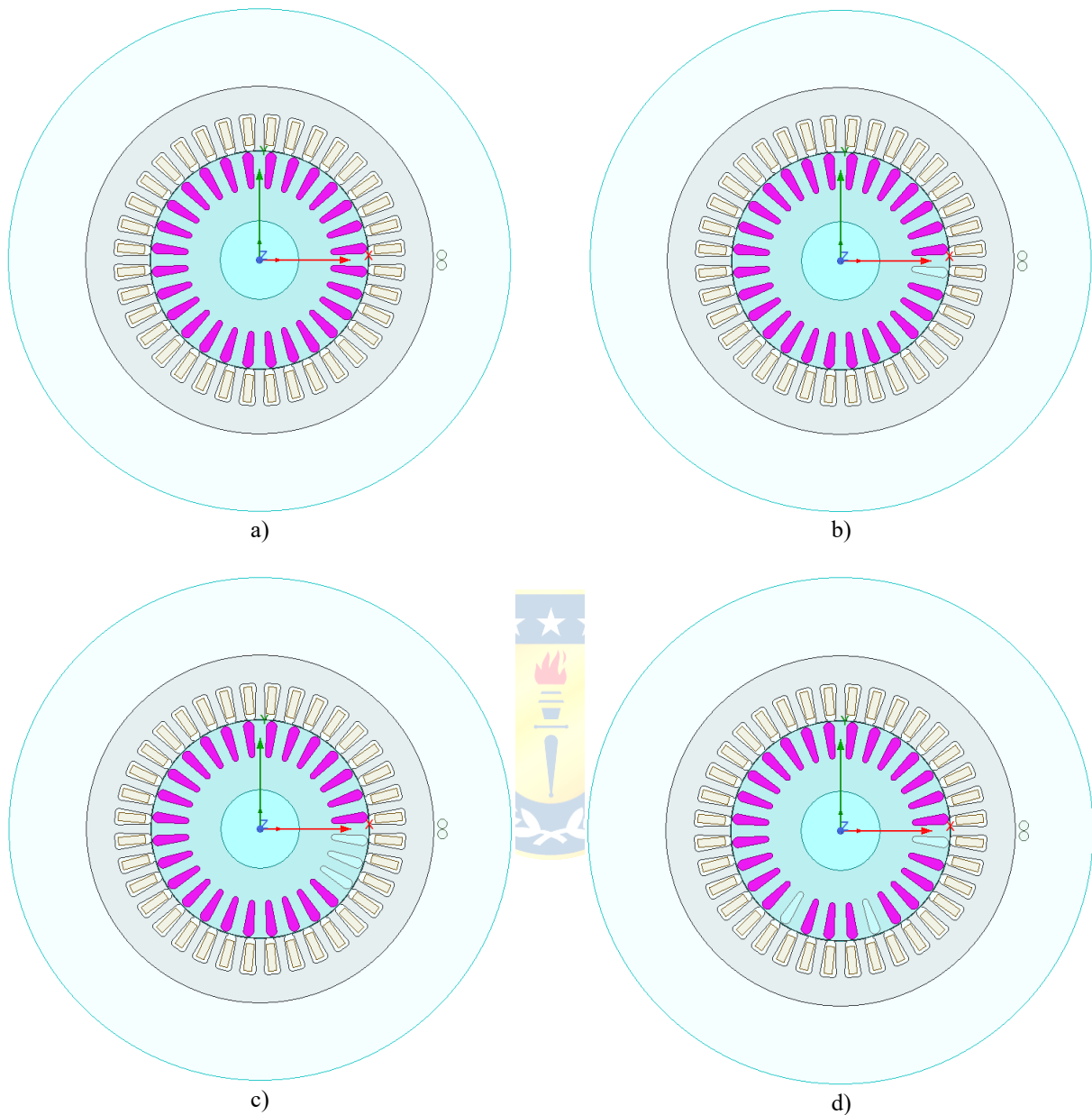


Fig. 3-2 Escenarios de falla considerados en la validación mediante FEM

a) Sana, b) 1BRB, c) 3 BRB y d) 3 BRB a 120° eléctricos.

Todos los casos se simulan bajo cinco niveles de carga mecánica; 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Con el fin de evaluar el algoritmo a distintos niveles de deslizamiento. Para ello, se midió la velocidad del motor en vacío, 1497 RPM, para determinar el deslizamiento en vacío, 0.2 %. Luego, asumiendo un comportamiento lineal de la curva par-deslizamiento, se estimó el deslizamiento correspondiente a cada nivel de carga mediante interpolación entre el deslizamiento en vacío y el nominal indicado en la placa del motor, 3.3%. La Tabla 3-3 presenta la velocidad estimada para cada

condición de carga.

Tabla 3-3 Velocidad estimada para cada nivel de carga

Nivel de carga, %	Velocidad, RPM
0%	1497
25%	1485,25
50%	1473,5
75%	1461,75
100%	1450

3.2. Análisis de la variación de la potencia integrada en función de la severidad de falla y de la velocidad de operación

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos por el algoritmo desarrollado, a partir de señales generadas mediante simulación por FEM para las distintas configuraciones consideradas.

Dado que el entorno de simulación FEM corresponde a un entorno idealizado, en el cual no se incorporan perturbaciones externas, ruido de medición ni variabilidad entre mediciones, los resultados obtenidos para una misma condición son idénticos entre sí. Por lo tanto, no es posible definir un baseline estadístico ni estimar la variabilidad del indicador sano. Por esta razón, el cálculo del índice γ definido previamente en la Sección 2.4 no se aplica en este apartado.

El objetivo del presente análisis es estudiar la respuesta física del valor de PB frente a variaciones en la severidad de la falla y en la velocidad de operación.

3.2.1 Escenario de referencia

La Fig. 3-3(a) presenta el espectro en frecuencia, obtenido mediante la FFT, de la señal del voltaje inducido en el sensor de bobina para el motor operando a velocidad nominal en condición sana. En la figura se indican, mediante marcadores cuadrados de color azul, las frecuencias correspondientes a las firmas características.

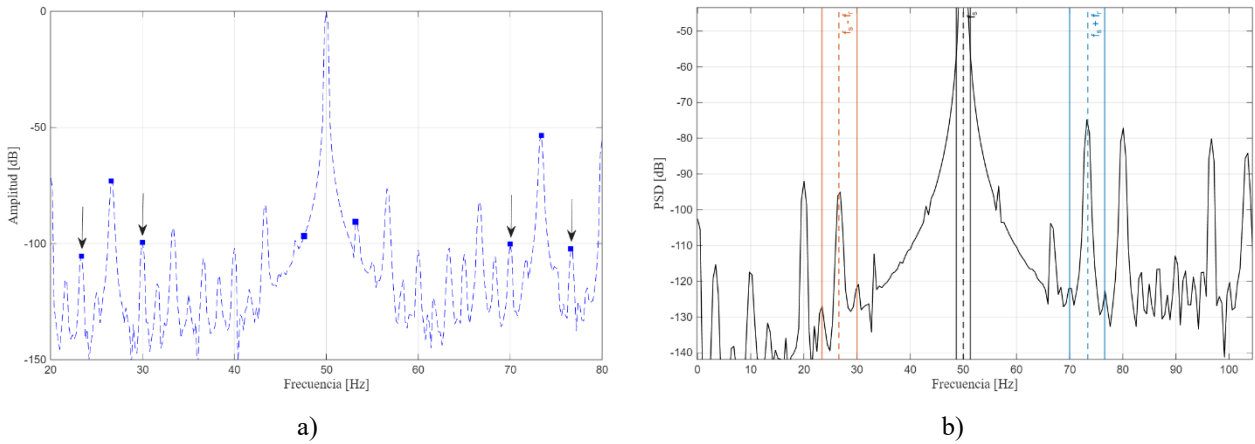


Fig. 3-3 Análisis espectral bobina para el MI a velocidad nominal bajo condición sana (FEM)

a) FFT, b) PSD

A partir de estas componentes, el algoritmo define automáticamente los límites de las bandas de integración. Las flechas negras señalan las bandas laterales propias de f_{brb2} , denotadas como f_{brb2sb} , que definen los límites espectrales de las bandas de integración consideradas para el cálculo de la potencia integrada.

La Fig. 3-3(b) muestra la PSD correspondiente a la misma señal. En esta representación se indican mediante líneas verticales los límites de integración definidos por el algoritmo en torno a las frecuencias f_{brb2} y f_s . Cabe destacar que la PSD se presenta en escala logarítmica únicamente con fines ilustrativos; el cálculo de la potencia integrada se realiza sobre la PSD expresada en escala lineal.

La evaluación de la condición sana resulta particularmente relevante en el análisis basado en flujo magnético, dado que este tipo de señal presenta de manera inherente múltiples componentes espectrales asociados a fenómenos electromagnéticos propios del funcionamiento normal del motor. Esta medición permite caracterizar el comportamiento espectral de referencia del sistema, estableciendo una base comparativa para interpretar de manera adecuada la aparición y fortalecimiento de las firmas características en condiciones de BRB.

La Tabla 3-4 presenta los valores de la PB para la señal de flujo del MI en condición sana. Se observa que, en esta condición, los valores de la PB se mantienen en órdenes de magnitud extremadamente bajos, del orden de 10^{-8} - 10^{-10} para $PB^{(-)}$ y 10^{-6} – 10^{-9} para $PB^{(+)}$, sin mostrar una tendencia clara con la velocidad de operación.

Tabla 3-4 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI de referencia (FEM)

Velocidad [RPM]	$PB^{(-)}$	$PB^{(+)}$
1450	$5.76 \cdot 10^{-8}$	$5.03 \cdot 10^{-6}$
1461,5	$1.47 \cdot 10^{-10}$	$1.51 \cdot 10^{-9}$
1473	$8.82 \cdot 10^{-9}$	$3.76 \cdot 10^{-7}$
1485	$8.03 \cdot 10^{-11}$	$2.22 \cdot 10^{-10}$
1497	$6.74 \cdot 10^{-10}$	$7.47 \cdot 10^{-9}$

Este comportamiento se debe a que, en la simulación FEM, el motor se modela con un rotor perfectamente simétrico, sin excentricidades ni asimetrías constructivas. En la práctica, ningún motor es completamente ideal, por lo que siempre existen pequeñas asimetrías que pueden generar componentes adicionales en el espectro.

Además, se observa que los valores de $PB^{(+)}$ son mayores que los de $PB^{(-)}$ en esta condición. Esto sugiere que la distribución energética del espectro en torno a $f_s \pm f_r$ no es perfectamente simétrica aun en ausencia de falla, la cual responde a la dinámica electromagnética propia del modelo y no a la presencia de asimetrías rotóricas. Esta característica resulta relevante para el análisis posterior, ya que implica que cada banda debe evaluarse respecto a su propia referencia.

3.2.2 Escenarios de falla

Con el fin de evaluar la sensibilidad de la PB ante la presencia de asimetrías rotóricas, se analizan las configuraciones correspondientes a 1 BRB, 3 BRB adyacentes y 3 BRB no adyacentes. Las Tablas 6-8 presentan los valores de la $PB^{(-)}$ y la $PB^{(+)}$, obtenidos a partir de las señales simuladas mediante el modelo FEM para los distintos escenarios de falla.

Al introducir una barra completamente rota (Tabla 3-5), el índice PB experimenta un incremento de entre tres y cinco órdenes de magnitud respecto de la condición sana en todo el rango de velocidades analizado. En particular, a 1450 rpm se observan valores del orden de 10^{-4} en $PB^{(-)}$ y 10^{-3} en $PB^{(+)}$. Este aumento evidencia la aparición de asimetrías electromagnéticas asociadas a la redistribución de corrientes en la jaula del rotor producto de la ruptura de la barra. En la práctica, los MI pueden continuar operando durante períodos prolongados bajo esta condición, lo que hace especialmente relevante la detección de este primer estado de daño. Cabe destacar que el incremento del índice se

mantiene incluso en proximidad de la velocidad síncrona, aunque con magnitud decreciente a medida que el deslizamiento disminuye.

Tabla 3-5 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 1 BRB (FEM)

Velocidad [RPM]	$PB^{(-)}$	$PB^{(+)}$
1450	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$6.02 \cdot 10^{-3}$
1461,5	$2.34 \cdot 10^{-4}$	$3.22 \cdot 10^{-3}$
1473	$1.41 \cdot 10^{-4}$	$1.43 \cdot 10^{-3}$
1485	$4.23 \cdot 10^{-5}$	$3.94 \cdot 10^{-4}$
1497	$4.24 \cdot 10^{-6}$	$2.01 \cdot 10^{-5}$

Cuando se produce una ruptura de una barra, las corrientes que originalmente circulaban por ella se redistribuyen hacia las barras adyacentes, incrementando las densidades de corriente en las barras vecinas y, en consecuencia, los esfuerzos electromagnéticos y térmicos sobre estas, lo que puede favorecer la propagación del daño [33]. Para simular este escenario, se introduce la ruptura de las barras adyacentes a la considerada en el caso anterior, dando lugar a un total de tres barras rotas (Tabla 3-6).

En este escenario, la PB presenta un incremento coherente con el aumento de la severidad de la falla, alcanzando valores del orden de 10^{-3} en la $PB^{(-)}$ y hasta 10^{-2} en $PB^{(+)}$. Este resultado es consistente con el comportamiento físico esperado, dado que la concentración de discontinuidades en una misma región del rotor intensifica la asimetría electromagnética del sistema.

Tabla 3-6 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 3 BRB Ady. (FEM)

Velocidad [RPM]	$PB^{(-)}$	$PB^{(+)}$
1450	$3.77 \cdot 10^{-3}$	$4.91 \cdot 10^{-2}$
1461,5	$2.87 \cdot 10^{-3}$	$2.88 \cdot 10^{-2}$
1473	$1.79 \cdot 10^{-3}$	$1.20 \cdot 10^{-2}$
1485	$6.48 \cdot 10^{-4}$	$4.73 \cdot 10^{-3}$
1497	$3.92 \cdot 10^{-5}$	$2.17 \cdot 10^{-4}$

Además, se considera un escenario menos frecuente en comparación con los casos anteriores,

correspondiente a barras rotas no adyacentes. No obstante, en aplicaciones industriales sometidas a esfuerzos transitorios recurrentes, se han reportado configuraciones de este tipo, particularmente en motores con jaulas de rotor de cobre, habitualmente empleadas en máquinas de mayor potencia [32].

Este escenario resulta de particular interés desde el punto de vista del diagnóstico basado en el análisis de señales, ya que la disposición no adyacente de las barras rotas puede dar lugar a una cancelación parcial o incluso total de la asimetría eléctrica del rotor observada desde el estator. En el modelo se introduce una configuración de tres barras rotas separadas 120° eléctricos entre sí (Tabla 3-7), permitiendo su comparación directa con el caso de tres barras rotas adyacentes.

Tabla 3-7 Valores de potencia integrada para la señal de flujo del MI con 3 BRB No Ady. (FEM)

Velocidad [RPM]	$PB^{(-)}$	$PB^{(+)}$
1450	$1.24 \cdot 10^{-3}$	$2.17 \cdot 10^{-2}$
1461,5	$9.06 \cdot 10^{-4}$	$1.17 \cdot 10^{-2}$
1473★	$5.35 \cdot 10^{-4}$	$4.81 \cdot 10^{-3}$
1485★	$1.82 \cdot 10^{-4}$	$8.5 \cdot 10^{-4}$
1497	$1.17 \cdot 10^{-5}$	$4.13 \cdot 10^{-5}$

Los resultados muestran que la PB obtenida en esta condición, si bien es inferior a la configuración adyacente, se mantiene significativamente por sobre la condición de referencia sana y supera los valores asociados a la falla de una sola barra.

Este comportamiento evidencia que el análisis espectral del flujo magnético disperso conserva sensibilidad incluso ante configuraciones de falla potencialmente menos detectables mediante técnicas clásicas.

A fin de examinar de manera global el comportamiento del índice bajo todas las configuraciones simuladas, las Fig. 3-4 y 3-5 presentan la evolución de la $PB^{(-)}$ y $PB^{(+)}$, respectivamente, en función de la velocidad de operación y de la severidad de la falla.

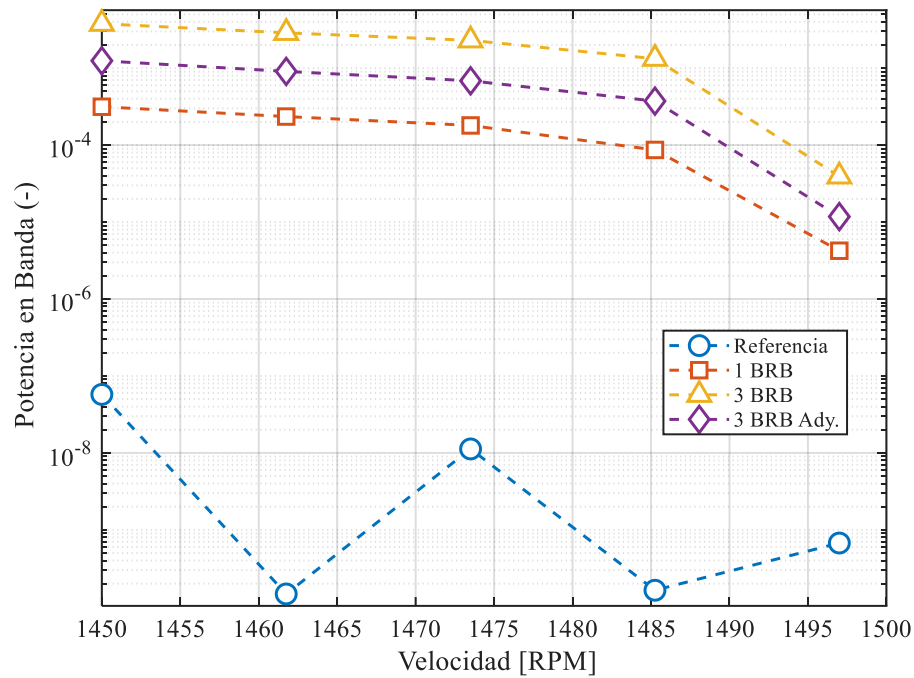


Fig. 3-4 $PB^{(-)}$ MI Cantoni 1,1 kW FEM

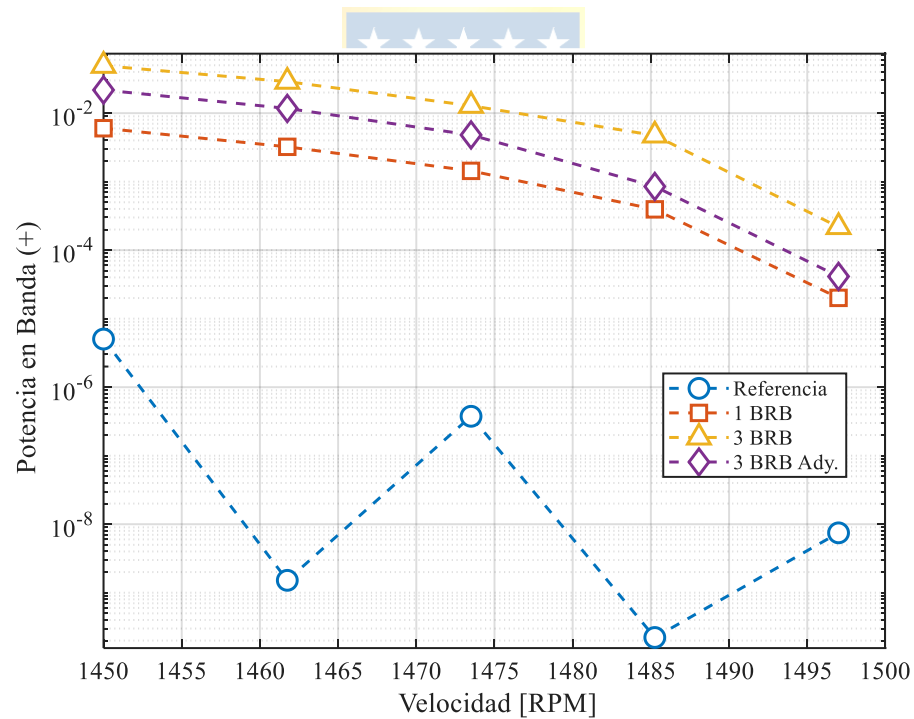


Fig. 3-5 $PB^{(+)}$ MI Cantoni 1,1 kW FEM

Se observa que tanto la $PB^{(-)}$ como la $PB^{(+)}$ permiten discriminar de manera confiable entre la condición sana y los distintos escenarios con falla en todo el rango de velocidades analizado. En todas las configuraciones de falla, los valores del índice se mantienen varios órdenes de magnitud por encima de la condición sana, incluso cuando el motor opera en proximidad de la velocidad síncrona.

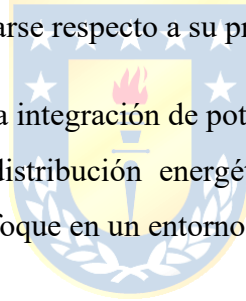
Además, los valores del índice son coherentes con el nivel de severidad de la falla, sin presentarse cruces en los gráficos.

En este entorno idealizado de simulación FEM, el índice presenta una tendencia decreciente al aumentar la velocidad de operación en las configuraciones defectuosas. Este comportamiento es coherente con la reducción del deslizamiento y, por tanto, la disminución del espaciamiento entre las componentes dependientes de s , lo que modifica la distribución energética en torno a $f_s \pm f_r$.

En conjunto, los resultados obtenidos en el entorno FEM permiten extraer conclusiones relevantes.

- En primer lugar, dado que su magnitud depende del deslizamiento, las mediciones deben compararse bajo condiciones de operación similares.
- En segundo lugar, considerando que $PB^{(-)}$ y $PB^{(+)}$ presentan niveles base y sensibilidades distintas, cada banda debe evaluarse respecto a su propio umbral de referencia.

Estos resultados demuestran que la integración de potencia espectral en torno a $f_s \pm f_r$ permite capturar de manera consistente la redistribución energética inducida por la asimetría rotórica, confirmando la coherencia física del enfoque en un entorno idealizado.

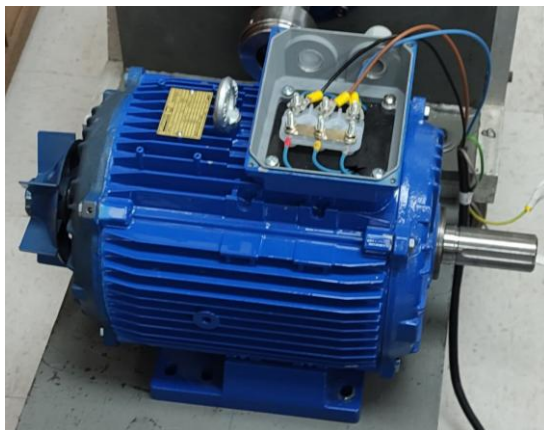


4. Etapa de Validación: Experimental en Laboratorio

Este capítulo presenta y contrasta las dos metodologías de diagnóstico implementadas; la metodología básica, centrada en la variación puntual de la amplitud de las firmas características; y la metodología propuesta, basada en la variación de la potencia espectral integrada en una banda de frecuencias asociada a la falla de barra rota.

4.1. Banco de Pruebas

En esta sección se emplea el MI correspondiente al modelo previamente analizado mediante FEM, con el fin de realizar la validación experimental del algoritmo desarrollado. Sus principales características técnicas fueron detalladas en la Tabla 3-1 del **Capítulo 3**. La Fig. 4-1(a) muestra el MI Cantoni 1,1 kW utilizado en los ensayos, y la Fig. 4-2(b) su placa de datos.



a)



b)

Fig. 4-1 MI Cantoni 1,1 kW

a) MI Cantoni, b) Placa de datos

Para la validación experimental se realizaron mediciones en tres MI idénticos al de la Fig. 4-1(a), cada uno operando bajo distintas condiciones del rotor; condición sana, una barra rota y tres barras rotas. Además, se evaluó el caso de media barra rota bajo condición nominal de velocidad. La Tabla 4-1 presenta los distintos escenarios de falla considerados.

La Fig. 4-2 presenta las perforaciones realizadas en el rotor de los MI analizados. Estas configuraciones permiten evaluar la respuesta del algoritmo frente al incremento en la severidad de la falla, verificando la coherencia de los indicadores diagnósticos respecto a dicha progresión. De igual manera que en las simulaciones realizadas mediante FEM, las señales experimentales se adquirieron

bajo distintas condiciones de velocidad. Las velocidades consideradas fueron presentadas previamente en la Tabla 3-3 del **Capítulo 3**.

Tabla 4-1 Escenarios considerados en la validación experimental

Escenario	Condición del Rotor
Referencia	Sano
#1	1 BRB
#2	3 BRB

La señal de flujo magnético disperso se mide mediante un sensor de bobina diseñado por investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) [43] y fabricado en el LEME de la UdeC. El diseño del sensor, desarrollado en AutoCad 2D, se presenta en la Fig. 4-3(a) y el sensor ya fabricado en la Fig. 4-3(b).

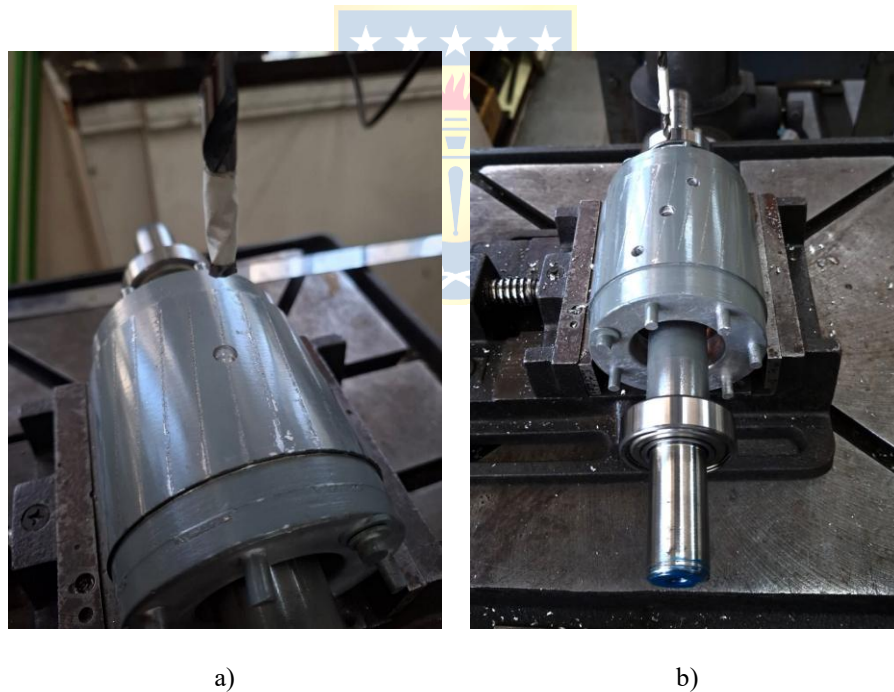


Fig. 4-2 Perforaciones realizadas en el rotor del MI

a) Rotor con 1 BRB, b) Rotor con 3 BRB

El sensor consiste en una bobina de 1005 espiras de alambre de cobre, con un diámetro nominal de 0,2 mm (calibre 32 AWG). La conexión al osciloscopio se realiza mediante un cable coaxial apantallado. Este cable posee un conductor interno por el cual se transmite la señal del sensor, y una malla metálica externa conectada a tierra que actúa como blindaje, reduciendo la captación de ruido e

interferencias durante la medición.

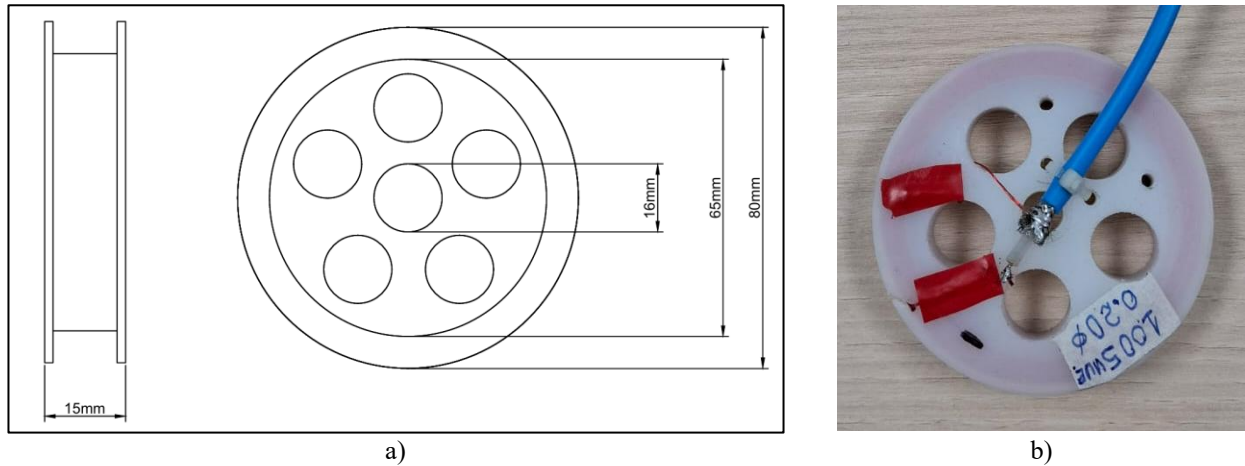


Fig. 4-3 Sensor de bobina empleado en la validación experimental

a) Diseño del sensor en AutoCad 2D, b) Sensor fabricado en LEME

Dado que la banda de frecuencia empleada para el cálculo de la potencia integrada corresponde a las firmas características de barra rota asociadas a la componente radial del flujo magnético disperso, el sensor se posiciona en las proximidades del marco del motor, tal como se muestra en la Fig. 4-4.

Esta ubicación permite la medición de las componentes radial y axial del flujo disperso, y ha sido reportada en la literatura como una de las configuraciones más confiables para la detección de fallas rotóricas, permitiendo capturar con mayor sensibilidad las variaciones asociadas a asimetrías en el rotor.



Fig. 4-4 Sensor de flujo disperso en posición radial-axial

Las mediciones se realizaron utilizando dos bancos de pruebas distintos: uno para mediciones bajo carga controlada, mediante un motor de corriente continua acoplado mecánicamente al MI, y otro para mediciones en vacío a voltaje reducido, empleando un autotransformador variable. A continuación, se describe en detalle cada uno de estos bancos de pruebas.

4.1.1 Configuración #1: Torque de carga controlado

El esquema experimental utilizado para la primera configuración a evaluar, correspondiente a la operación con torque de carga controlado, se muestra en la Fig. 4-6. En este banco experimental, el MI Cantoni de 1.5 HP actúa como motor bajo prueba y se encuentra acoplado mecánicamente, mediante un torquímetro S. Himmelstein (ver Fig. 4-5(c)), a una máquina de corriente continua (DC) General Electric de 5 HP que opera en modo generador.

La Fig. 4-5(a) presenta la máquina DC General Electric 5 HP y la Fig. 4-5(b) presenta su placa de datos.

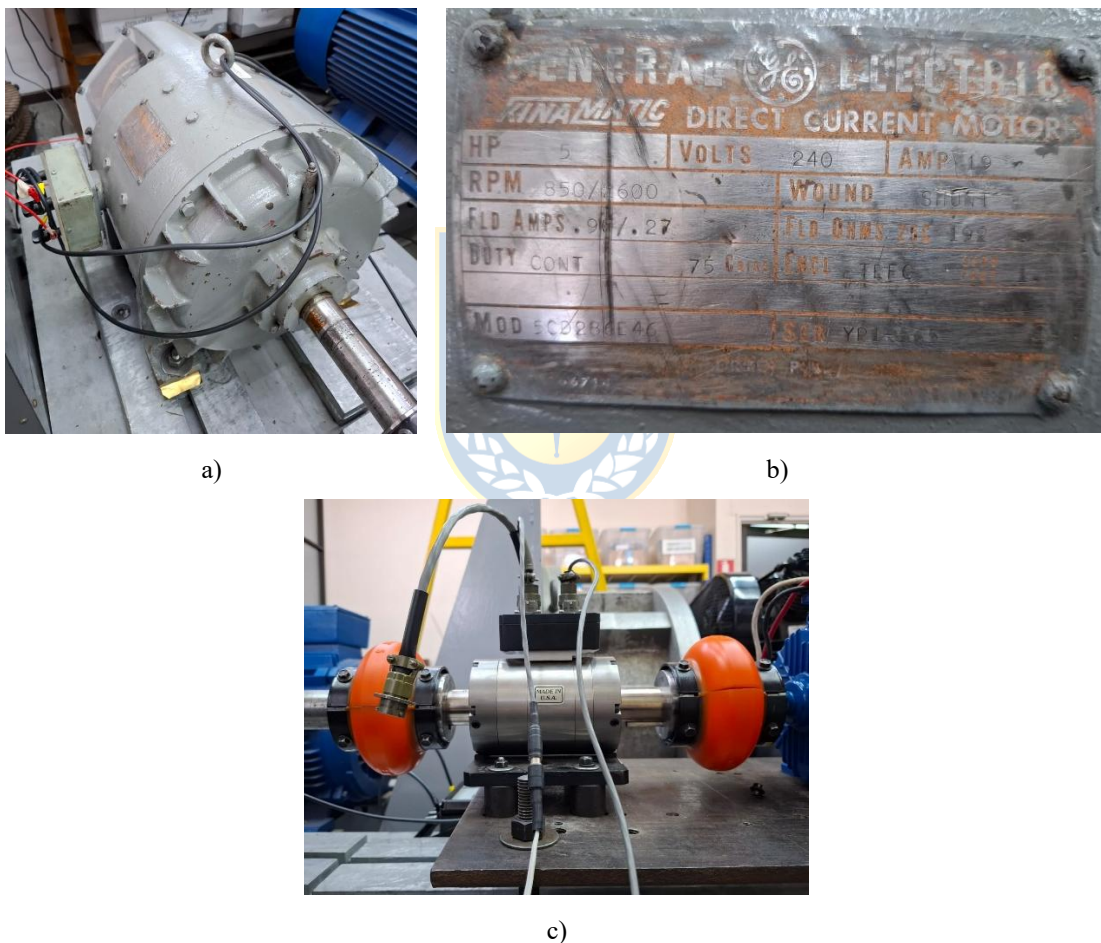


Fig. 4-5 Motor DC General Electric utilizado en el estudio

a) Máquina DC General Electric 5 HP, b) Placa de datos, c) Acople con torquímetro

Para que la máquina DC opere como un freno dinámico, se implementó un esquema de excitación independiente. En esta configuración, el devanado de campo del motor DC fue alimentado mediante un variac independiente del utilizado para el MI. Al ser arrastrado mecánicamente por el

MI, la máquina DC opera en modo generador. En este régimen, la fuerza electromotriz inducida en la armadura, E_a , es proporcional al flujo magnético y a la velocidad de rotación, por que la tensión generada aumenta conforme la velocidad impuesta por el MI se incrementa.

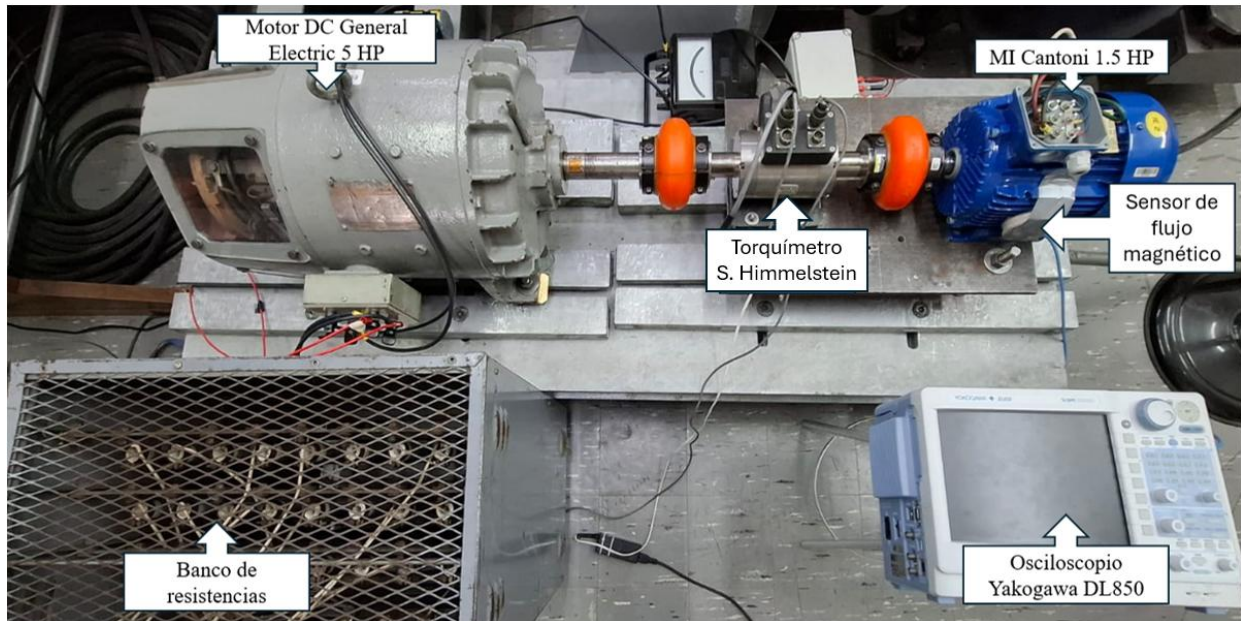


Fig. 4-6 Setup experimental utilizado para las mediciones bajo carga controlada

Cuando los bornes de la armadura se conectan a un banco de resistencias, la tensión inducida produce una corriente de armadura. De acuerdo con la ley de Lorentz, la interacción entre el flujo magnético del campo y dicha corriente genera un torque electromagnético que se opone al movimiento del eje. Este torque actúa como un par resistente sobre el MI. El nivel de carga mecánica aplicado al motor se regula variando el valor de resistencia conectado a la armadura del generador DC, o ajustando la excitación del circuito de campo. Esto permite controlar el torque de carga y establecer distintos puntos de operación para la realización de las mediciones experimentales.

Con el fin de evaluar la capacidad del algoritmo de detectar fallas a través de variaciones de las componentes espectrales del flujo magnético disperso, se realizaron 100 mediciones de flujo para cada escenario. Este enfoque permite cuantificar la variabilidad inherente del flujo magnético y determinar la confiabilidad del diagnóstico bajo condiciones de operación real.

4.1.2 Configuración #2: Alimentación en vacío a voltaje reducido

De manera complementaria al análisis bajo carga, se evalúa la respuesta del motor en condición de vacío a voltaje reducido. Para ello, las mediciones se realizan mediante un autotransformador

variable (variac), el cual permite disminuir la tensión de alimentación del motor.

Al reducir el voltaje, el flujo magnetizante también disminuye y, dado que el par electromagnético es proporcional al cuadrado del flujo, el torque desarrollado por el motor se reduce. En estas condiciones, el motor debe incrementar su deslizamiento para generar el torque mínimo necesario para compensar las pérdidas mecánicas y magnéticas, lo que se traduce en una disminución de la velocidad mecánica. De esta forma, variando el voltaje de suministro es posible ajustar la velocidad del motor a las mismas condiciones de operación previamente analizadas. La velocidad de operación, al igual que en la Sección 4.2, se miden mediante un torquímetro S. Himmelstein, y el montaje experimental se presenta en la Fig. 4-7.

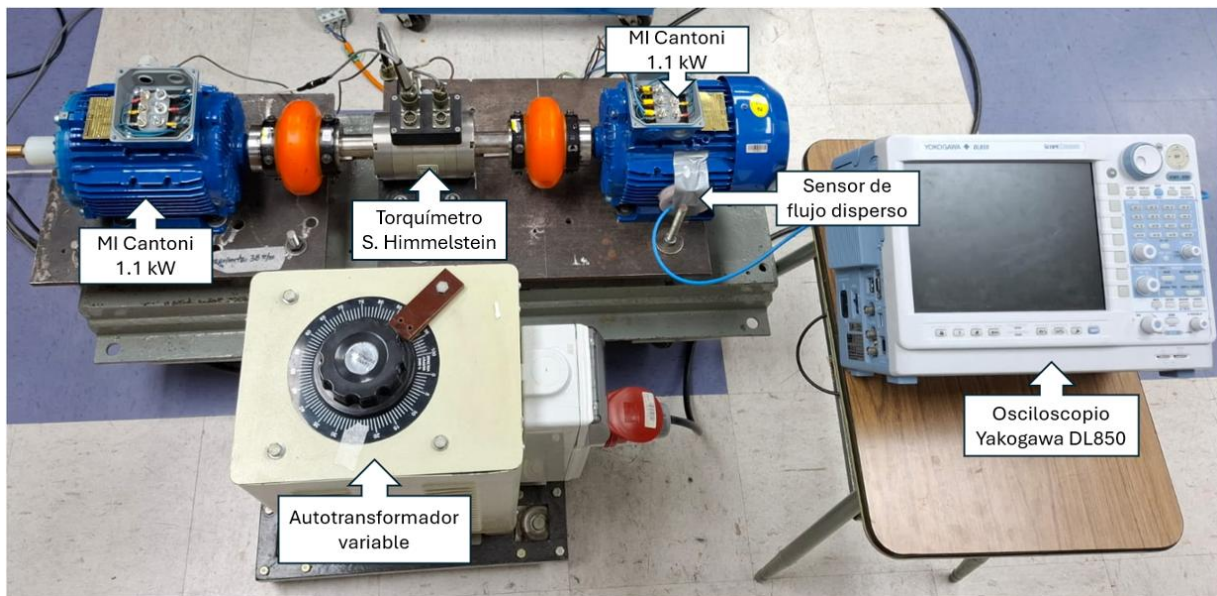


Fig. 4-7 Setup experimental mediciones en vacío a voltaje reducido

Este escenario permite evaluar el algoritmo en condiciones más exigentes. Como se observa en el circuito equivalente de la Fig. 4-8, el voltaje aplicado V_p alimenta la rama del estator compuesta por R_1 y jX_1 , generando la tensión inducida E_1 sobre la rama magnetizante formada por R_C y jX_M . La corriente que circula por esta rama es la corriente magnetizante I_M , responsable de establecer el flujo principal en el entrehierro. Al operar con voltaje reducido, la tensión E_1 disminuye, lo que reduce la corriente magnetizante y, por tanto, el flujo magnético principal. Dado que el flujo magnético disperso corresponde a una fracción del campo magnético que escapa del circuito magnético del estator, esta reducción se traduce directamente en menores niveles de flujo disperso medidos externamente.

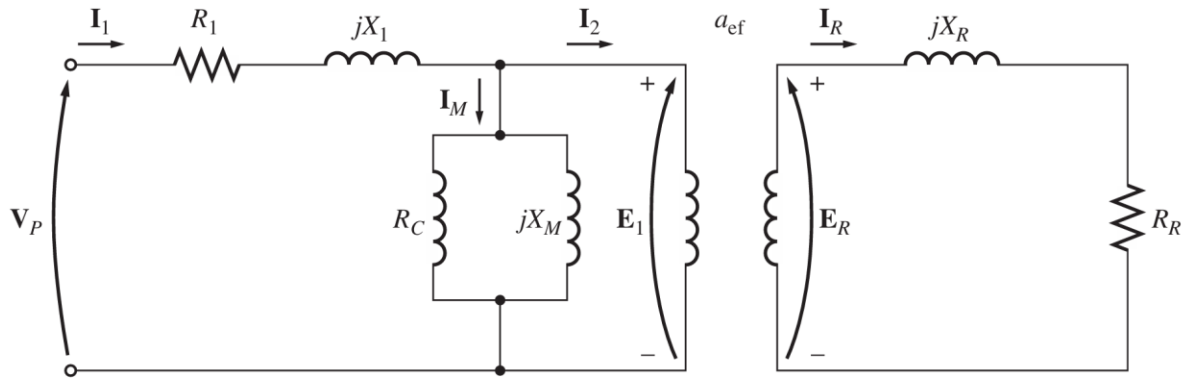


Fig. 4-8 Modelo de un motor de inducción [1]

Además, al disminuir el voltaje aplicado el núcleo opera más lejos de la región de saturación, lo que favorece que el flujo permanezca confinado dentro del hierro y reduce las componentes de fuga. Por otra parte, en la rama derecha del circuito equivalente la corriente I_R , que representa la corriente del rotor referida al estator, también se reduce cuando el motor opera sin carga, ya que el deslizamiento se aproxima a cero. Esto disminuye la interacción electromagnética entre el campo del estator y las corrientes inducidas en el rotor, debilitando la modulación del campo magnético asociada a las fallas.

En conjunto, estos efectos reducen la amplitud de las componentes espectrales asociadas a la falla, haciendo que su detección resulte más exigente.

4.2. Resultados Configuración #1: Metodología base

La Fig. 4-9 presenta el espectro FFT del MI operando a carga nominal para los tres escenarios evaluados. En la figura se indican, mediante flechas, las firmas características consideradas en el análisis. Estas firmas fueron detectadas de manera automática según la metodología definida en la Sección 2.3.2.

Se observa que la amplitud de estas componentes, identificadas con un punto del color correspondiente a cada escenario, aumenta a medida que se incrementa la severidad de la falla.

Este procedimiento se aplicó a cada una de las mediciones realizadas bajo distintos niveles de carga y condiciones del rotor. Con el fin de sintetizar el comportamiento de las firmas espectrales en los diferentes escenarios, se emplean diagramas de caja y bigotes que agrupan las amplitudes obtenidas en cada régimen de carga a partir del conjunto de mediciones realizadas. Este formato

permite visualizar la dispersión de las mediciones bajo una misma condición de operación.

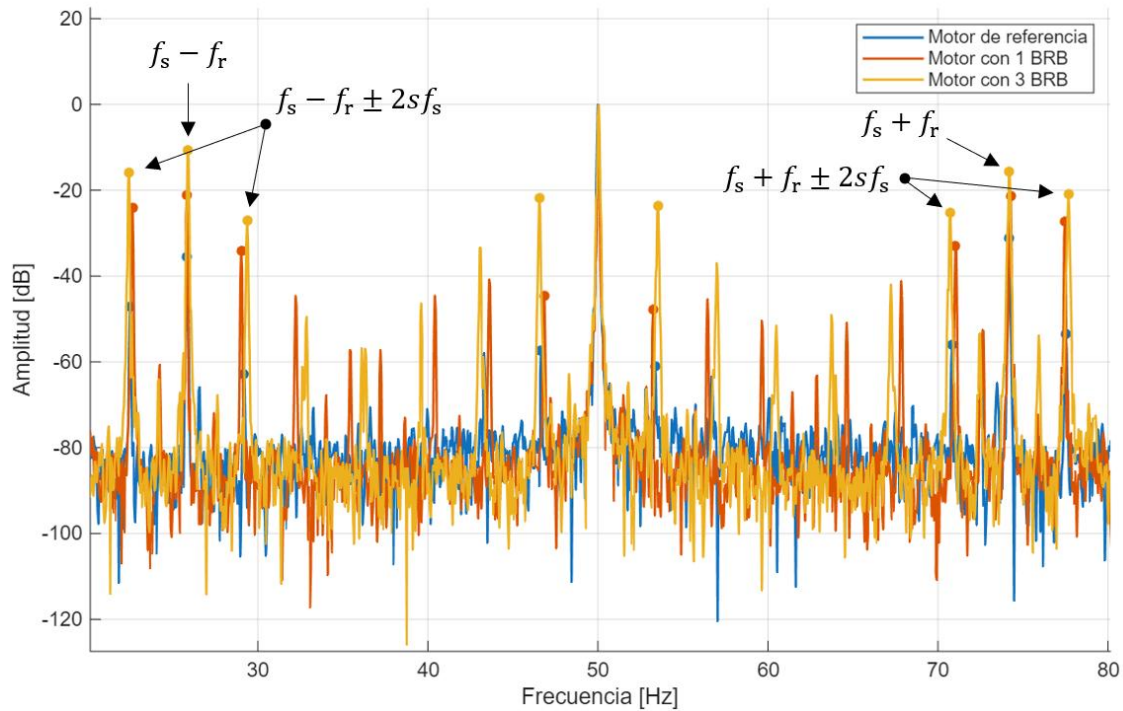


Fig. 4-9 Espectro FFT para la señal de voltaje inducido en el sensor ubicado en el marco del motor operando en condición de carga nominal para los tres escenarios evaluados

Al evaluar el motor en condiciones de 100% a 50% de torque de carga nominal, se logra una identificación robusta de las firmas espectrales características de falla de barra rota. No obstante, al reducir la carga al 25% del torque nominal, la proximidad entre las componentes de falla dificulta la discriminación de los indicadores en estudio, limitando la capacidad diagnóstica en regímenes de baja carga.

Para el análisis de los resultados se consideran tres escenarios críticos: régimen de carga nominal, operación al 25% de carga (comienza el solapamiento de las firmas características), y operación en vacío (deslizamiento mínimo).

La Fig. 4-10 presenta el diagrama de caja y bigotes para las firmas características de barra rota para el motor operando en condición de carga nominal. En la figura se observan tres cajas para cada firma, correspondientes al escenario sano (caja azul), escenario con una barra rota (caja naranja) y al escenario con tres barras rotas (caja roja).

Se observa que la distancia entre cajas, correspondientes a cada escenario de falla, sigue una jerarquía clara entre condición sana, 1 barra rota y 3 barras rotas, mostrando una separación del orden

de 10-20 dB entre condiciones. Esto sugiere que, en condición de carga nominal, el análisis basado en el aumento en la amplitud de las firmas de falla se muestra como una alternativa robusta para el análisis de falla rotórica.

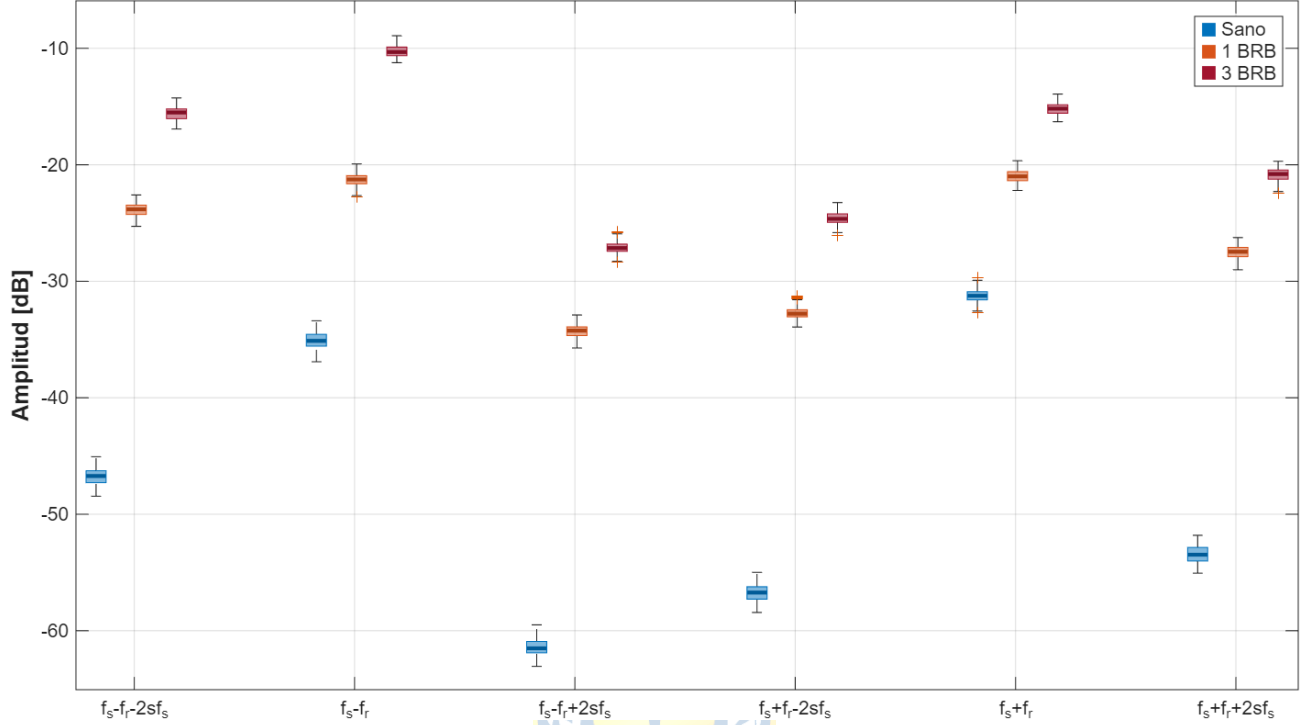


Fig. 4-10 Amplitud de las firmas características para el motor operando en condición de carga nominal

La Fig. 4-11 muestra el diagrama de caja y bigotes de las firmas características de falla cuando el motor opera a 25% de carga nominal. A diferencia del escenario de carga nominal, algunas de las firmas características presentan un comportamiento distinto al esperado, observándose valores de amplitud menores en escenarios de falla con respecto al escenario sano (ver cajas rojas con valores inferior a la caja azul en $f_s - f_r + 2sf_s$ y $f_s + f_r + 2sf_s$).

La Fig. 4-12 muestra el diagrama de caja y bigotes para los valores de amplitud de las firmas características para el motor operando en condición de vacío. Se observa que, al aproximarse a la velocidad síncrona, la reducción del deslizamiento provoca que el espaciado espectral entre firmas de falla disminuya. Esto dificulta la detección individual de las firmas características; notar que, en la figura se aprecia que los valores de $f_s - f_r$ y sus bandas laterales en $f_s - f_r \pm 2sf_s$ no se diferencian entre sí, lo mismo ocurre para $f_s + f_r$.

Además, en este escenario la diferencia entre los valores de amplitud para la condición sana y la condición defectuosa se vuelve más acotada. Incluso, algunos valores asociados al motor en

condición defectuosa llegan a solaparse con los obtenidos para la condición sana, como se observa en la caja roja correspondiente a tres barras rotas, cuyos valores alcanzan a ser menores que los máximos registrados en condición sana, representada por la caja azul, para la firma $f_s + f_r$.

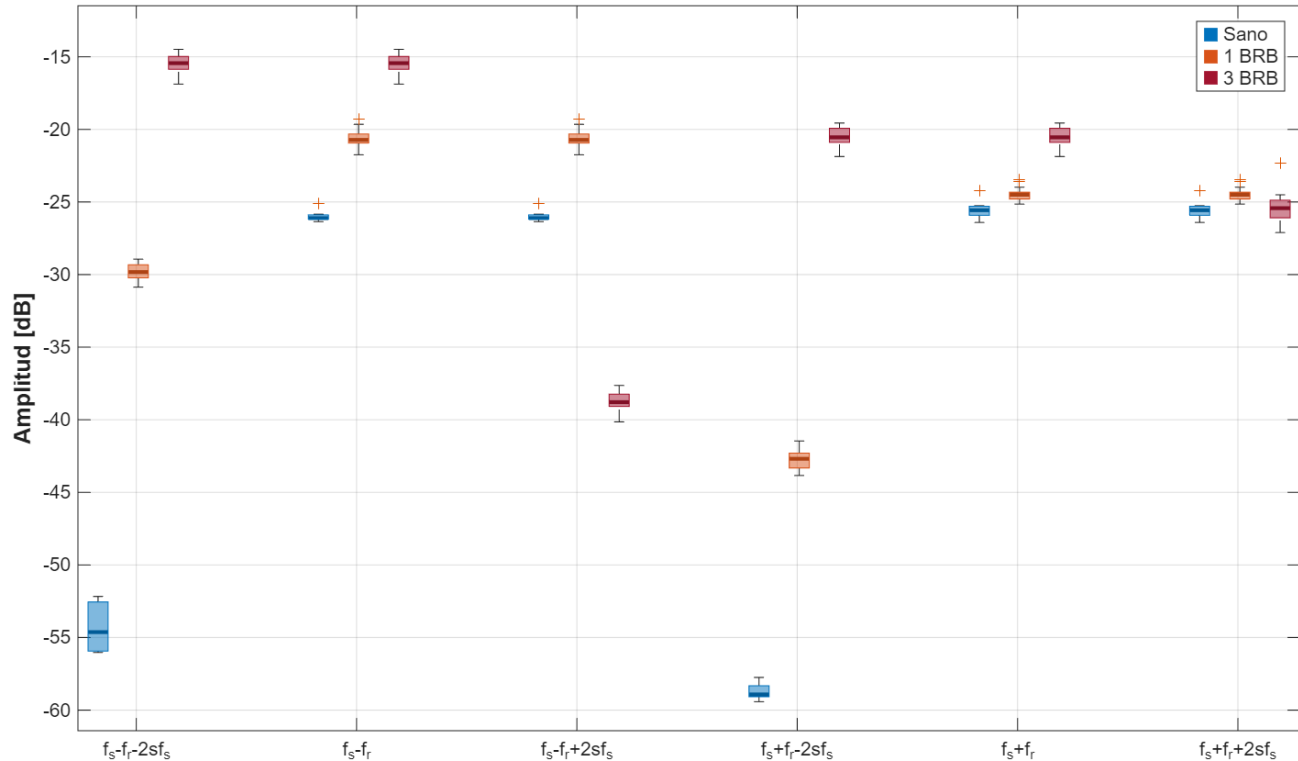


Fig. 4-11 Amplitud de las firmas características para el motor operando al 25% de carga nominal

Del estudio se puede concluir lo siguiente:

- A medida que el motor opera en proximidad a la velocidad síncrona, la efectividad del diagnóstico basado en la amplitud de las firmas espectrales se ve limitada. Específicamente, bajo un régimen de carga del 25%, las componentes localizadas en $f_s \pm f_r \pm 2sf_s$ en el caso de 3 barras rotas pierden su valor diagnóstico. En contraste, las componentes de frecuencia rotórica $f_s \pm f_r$ se muestran más robustas ante la reducción del deslizamiento (ver Fig. 4-11).
- Se observa que, la componente $f_s - f_r$ es el indicador más estable en regímenes de bajo deslizamiento, permitiendo detectar la falla. Cabe destacar que, en este escenario, el margen entre la amplitud en dB del motor sano y con falla se reduce significativamente en comparación con los márgenes obtenidos a carga nominal. Esto dificulta la definición de un umbral de variación unificado.

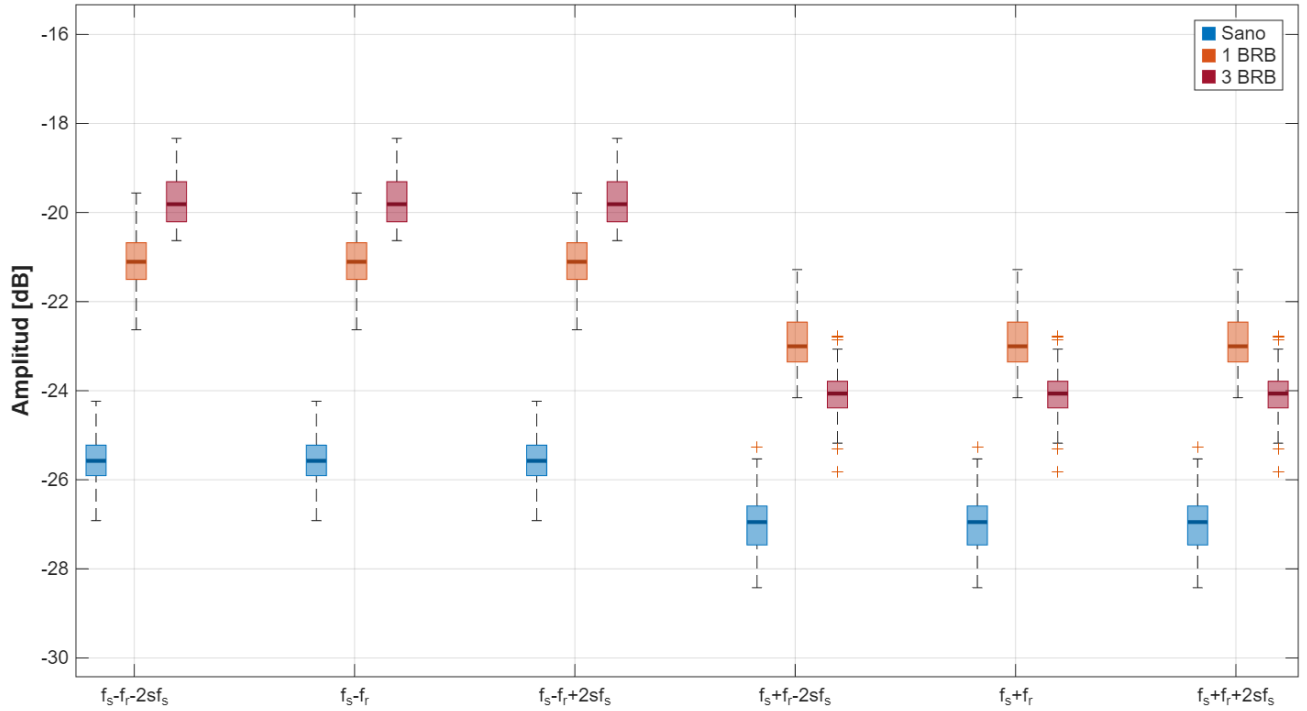


Fig. 4-12 Amplitud de las firmas características para el motor operando en vacío

4.3. Resultados Configuración #1: Metodología propuesta

4.3.1 Potencia integrada

Previo al cálculo de γ , se calcula a partir de la metodología detallada en la sección 2.4 los valores de PB en las bandas centradas en $f_s \pm f_r$. La Fig. 4-13 presenta la PB para el motor operando en condición de carga nominal. Tal como era de esperar a partir de los resultados obtenidos para la amplitud puntual de las firmas, la PB sigue una tendencia gradual entre escenarios, donde el estado sano presenta los menores niveles de potencia, seguido por el caso de una barra rota, mientras que el escenario de tres barras rotas presenta los valores más altos. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del indicador, ya que, si las firmas espectrales individuales mantienen una relación gradual y claramente separada entre estados, la integración de la potencia contenida en la banda correspondiente a las firmas espectrales evaluadas presentará la misma tendencia.

Un aspecto favorable de este enfoque, en comparación con la metodología basada en amplitudes puntuales, es la reducción de la variabilidad observada en las mediciones. Al integrar la potencia en una banda de frecuencias, la varianza asociada a fluctuaciones inherentes al entorno experimental, que en las firmas características evaluadas de manera puntual alcanza aproximadamente 3 dB; es decir, una diferencia cercana a 3 dB entre los valores mínimo y máximo para una misma frecuencia bajo

una misma condición de operación (ver que la altura aproximada a las cajas corresponde a 3 dB aproximadamente en la Fig. 4-10), se reduce significativamente, alcanzando valores del orden de 1 dB (ver valor máximo y mínimo de las cajas en la Fig. 4-13).

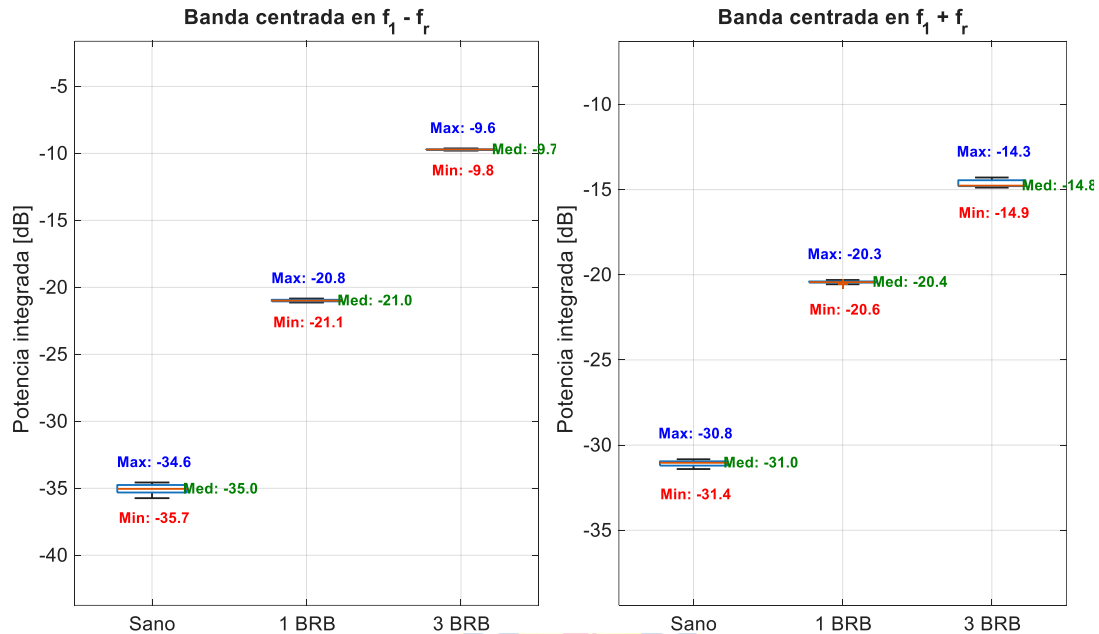


Fig. 4-13 Potencia integrada para el motor operando en condición de carga nominal

Esto evidencia que la integración espectral permite atenuar el efecto de variaciones experimentales y mejorar la estabilidad de la métrica utilizada para el diagnóstico.

La Fig. 4-14 presenta la PB para el motor operando a 25% de carga nominal. En este escenario, la banda izquierda presentaba dificultades diagnósticas al evaluar la amplitud de la firma $f_s - f_r + 2sf_s$, donde, como se observa en la Fig. 4-11, los valores de amplitud más bajos correspondían al escenario de tres barras rotas. Sin embargo, al integrar en la banda de frecuencias centrada en $f_s - f_r$, la contribución conjunta de las demás firmas espectrales presentes en la banda permite discriminar de manera clara entre escenarios, presentando un margen de más de 20 dB entre el caso sano y el caso de tres barras rotas.

La Fig. 4-15 presenta la PB para el motor operando en condición de vacío. En este escenario, los resultados más relevantes corresponden a la banda superior, ya que, al evaluar la amplitud puntual de las firmas, la banda inferior mostró un comportamiento capaz de discriminar entre fallas, lo que sugiere que esta banda es más robusta en comparación con la banda superior. En contraste, en la banda superior se detectaron amplitudes asociadas al escenario de tres barras rotas que llegan a solaparse

con los valores obtenidos para la condición sana cuando se analiza la amplitud puntual de las firmas. No obstante, al evaluar la PB se observa que los niveles de potencia asociados a los escenarios de falla se mantienen siempre por encima de los correspondientes al estado sano (ver Fig. 4-15).

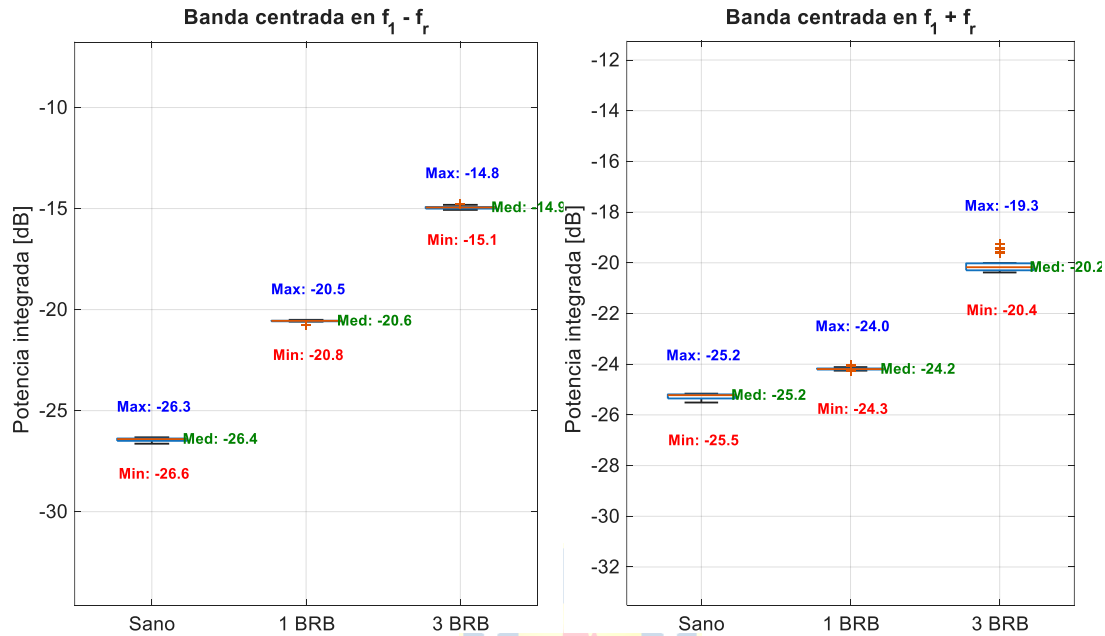


Fig. 4-14 Potencia integrada para el motor operando a 25% de carga nominal

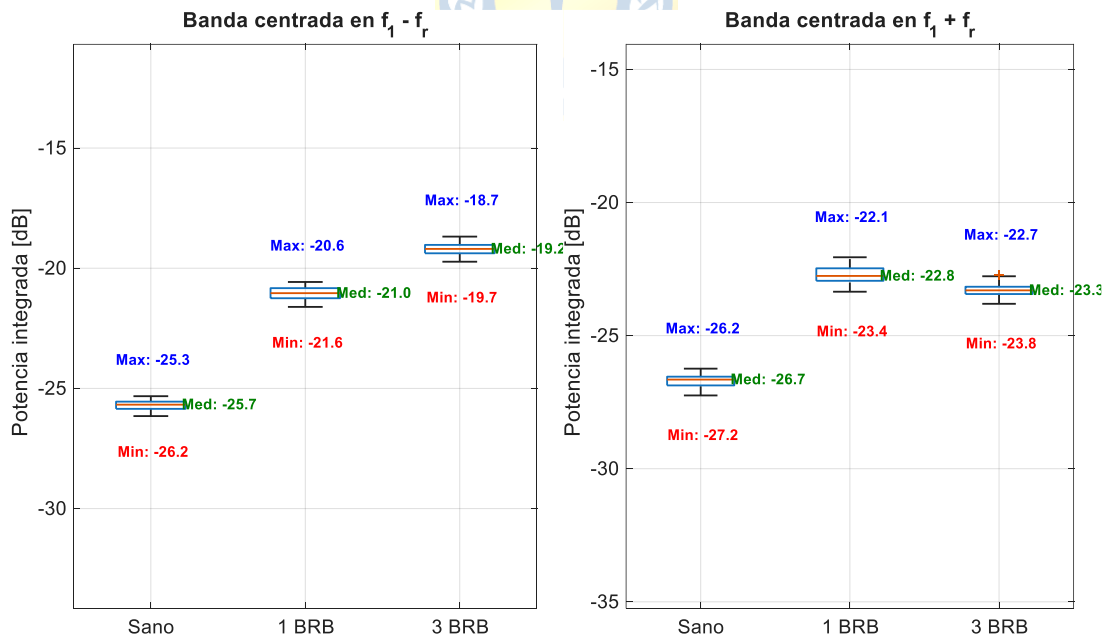


Fig. 4-15 Potencia integrada para el motor operando en vacío

En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de la densidad de potencia en las bandas de frecuencias seleccionadas, en lugar de evaluar de manera puntual cada amplitud de firma,

permite obtener un diagnóstico más consistente entre escenarios sanos y defectuosos. Además, este enfoque reduce la dispersión de las mediciones, lo que se traduce en cajas más compactas en los diagramas y, por tanto, en un diagnóstico más preciso y estable frente a ruidos o vibraciones.

4.3.2 Efecto del tamaño de muestra en el índice γ

El índice γ , descrito en la ecuación (2.32) en el apartado de metodología, se construye a partir de la variabilidad natural del sistema. En consecuencia, su valor depende directamente del tamaño de la muestra empleada para caracterizar el comportamiento del motor en condición sana, ya que es a partir de esta base estadística que se establece la referencia frente a la cual se evalúan las desviaciones asociadas a posibles estados de falla.

Para evaluar la influencia del tamaño de muestra, se realizó un análisis comparativo considerando conjuntos de 100, 30 y 10 adquisiciones utilizadas para caracterizar el motor en condición sana.

La Fig. 4-16 presenta los resultados de γ para los distintos tamaños de muestra considerados, representado mediante diagramas de caja y bigotes. Este formato permite visualizar la dispersión de los valores de γ para cada tamaño de muestra y analizar como la reducción en el número de adquisiciones influye en la variabilidad del indicador.

Como muestra la Fig. 4-16, el índice γ presenta una notable estabilidad. En la banda inferior, los valores máximos se mantienen en un rango estrecho [2.07, 2.44], independientemente del tamaño de muestra. Esto demuestra que es factible caracterizar la condición del motor con un número reducido de adquisiciones sin comprometer de manera significativa la sensibilidad de γ .

La banda superior muestra un comportamiento similar, aunque con una mayor sensibilidad al número de mediciones. Esto reafirma la mayor estabilidad de la banda inferior, aunque la banda superior sigue siendo válida como indicador complementario debido a que su variabilidad no es excesiva.

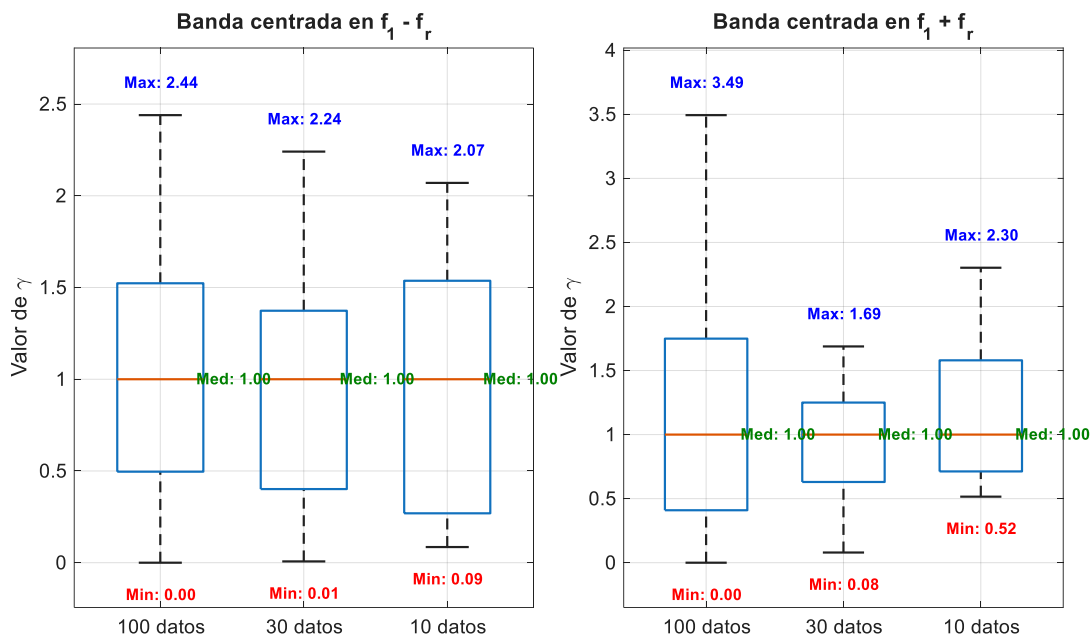


Fig. 4-16 Valor de γ considerando diferentes tamaños de muestra

4.3.3 Valores de γ

En base a los resultados de la Sección 4.3.2, se mantienen las 100 adquisiciones utilizadas para caracterizar el estado sano, mientras que para los escenarios de falla se emplea un total de 30 adquisiciones por escenario. Esta decisión metodológica permite una reducción significativa en los tiempos de captura, factor crítico en entornos industriales donde el monitoreo de condición debe ser altamente eficiente.

La Fig. 4-17 presenta el diagrama de caja y bigotes para los valores de γ cuando el motor opera en condición de carga nominal. En este escenario, el índice muestra una separación clara y gradual entre los distintos estados del motor. En la banda inferior se observan márgenes del orden de 40 unidades entre escenarios, mientras que en la banda superior las diferencias alcanzan valores del orden de 100 unidades entre la condición sana y la de una barra rota, y cerca de 50 unidades entre los casos de una y tres barras rotas. Estos resultados evidencian que el índice γ amplifica la diferencia entre condiciones de operación en comparación con la evaluación puntual de la amplitud de las firmas características presentada en la Sección 4.2.

La Fig. 4-18 presenta, de manera análoga a la Fig. 4-17, los valores del índice γ para el motor operando al 25% de carga nominal. En este escenario se observa que los valores de γ asociados a la banda inferior resultan incluso más concluyentes que en el caso de carga nominal, presentando

variaciones del orden de 150 unidades entre condiciones.

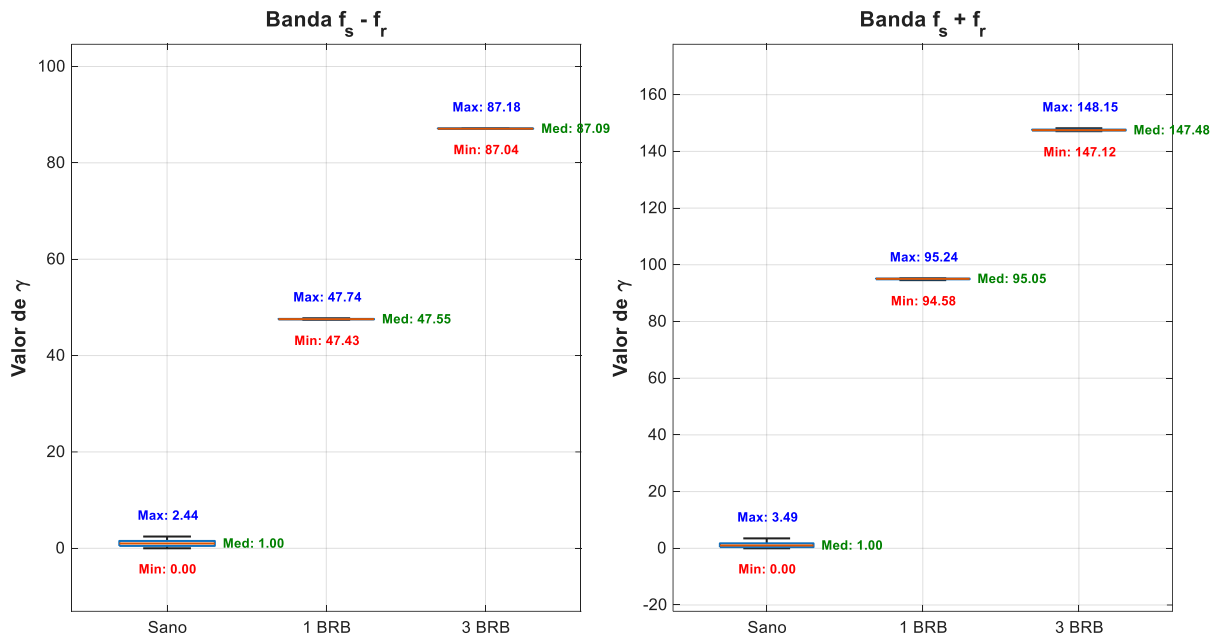


Fig. 4-17 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando a condición de carga nominal

En contraste, la banda superior, al igual que lo observado en la evaluación puntual de las amplitudes, reduce su capacidad diagnóstica. No obstante, el índice continúa permitiendo discriminar entre condición sana y defectuosa, observándose márgenes del orden de 20 unidades entre la condición sana y el caso de una barra rota, y del orden de 120 unidades entre una barra rota y tres barras rotas. Esto sugiere que, la banda superior, a pesar de presentar márgenes superiores en condición de carga nominal, es menos estable en comparación a la banda inferior.

De igual manera, la Fig. 4-19 presenta los valores de γ para el motor operando en condición de vacío. La banda inferior, tal como se anticipaba a partir de los resultados previos, se mantiene robusta incluso en este escenario de operación, donde el deslizamiento es mínimo, presentando márgenes de aproximadamente 25 unidades entre la condición sana y la de una barra rota, y de 4 unidades entre la condición de una barra rota y tres barras rotas (ver gráfico izquierdo de la Fig. 4-19).

En contraste, la banda superior, al igual que en el análisis basado en la amplitud puntual de las firmas, presenta dificultades para discriminar la severidad de la falla, observándose valores de γ para el caso de tres barras rotas inferiores a los correspondientes a una sola barra rota. No obstante, el índice continúa permitiendo distinguir entre condición sana y defectuosa. En particular, los valores medianos de γ alcanzan aproximadamente 20 unidades para el caso de tres barras rotas y 23 unidades

para una barra rota, en contraste con el valor máximo de 2.88 unidades obtenido para la condición sana (ver gráfico derecho de la Fig. 4-19), lo que mantiene un margen suficiente para discriminar entre los distintos estados del motor.

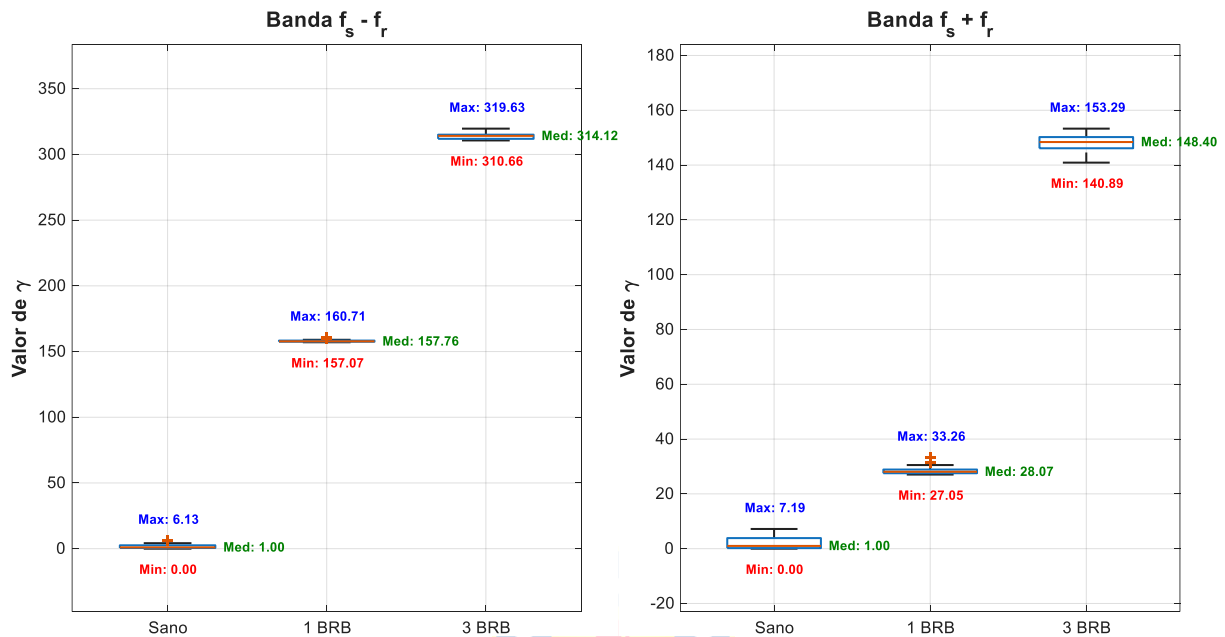


Fig. 4-18 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando al 25% de carga nominal

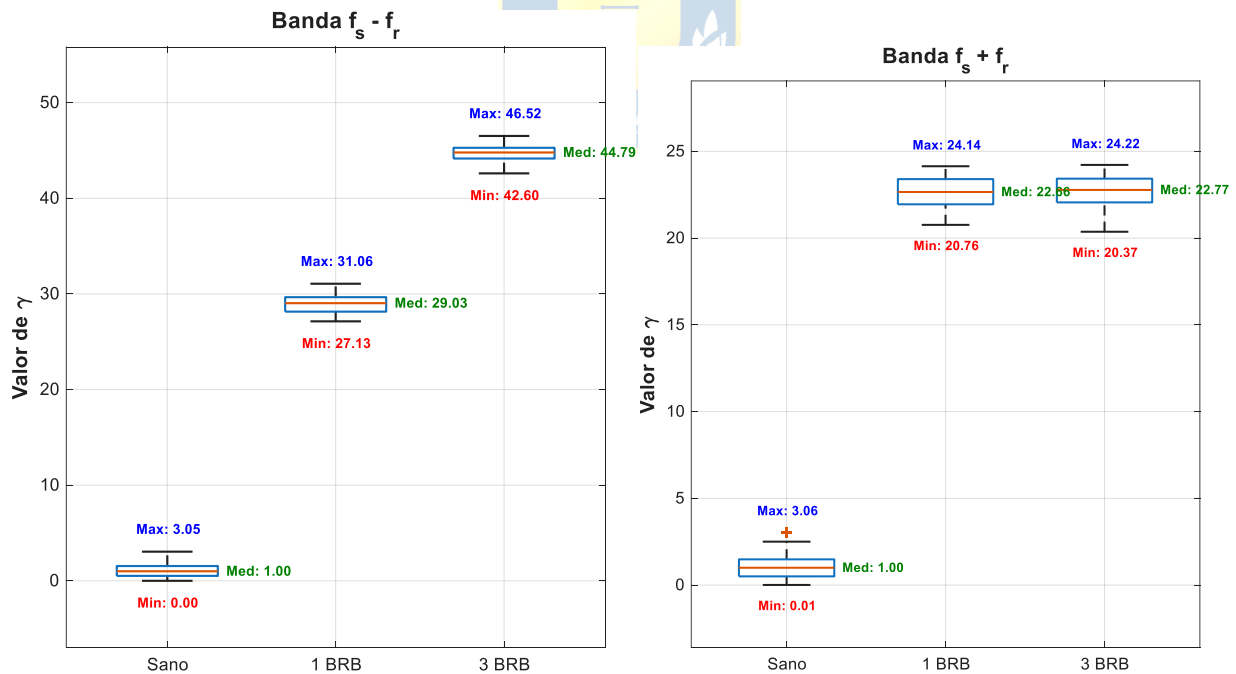


Fig. 4-19 Diagrama de caja y bigotes para los valores de γ operando en vacío

A modo de síntesis, los valores obtenidos de γ para los distintos regímenes de operación se presentan de manera resumida en la Fig. 4-20. Para la construcción de estos gráficos se utilizó el valor

mediano de γ en cada escenario evaluado, las líneas punteadas representan la trayectoria lineal entre los valores medianos de γ ; sin embargo, en la práctica esto no es así, se emplea de igual manera para tener una referencia visual.

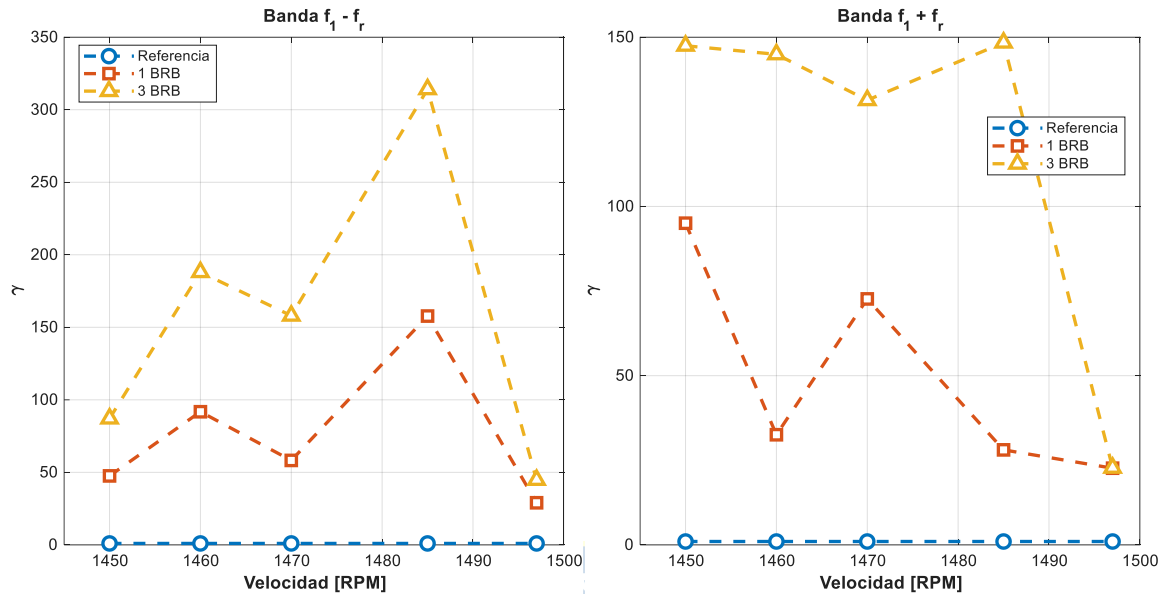


Fig. 4-20 Valores de γ en función de la velocidad de operación para distintos escenarios de falla

De los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir lo siguiente:

- El índice γ permite discriminar de manera clara entre condición sana y defectuosa en los distintos regímenes de operación evaluados, incluso al reducir el número de adquisiciones utilizadas para los escenarios de falla.
- El indicador amplifica las diferencias entre estados del motor en comparación con la evaluación puntual de las amplitudes de las firmas espectrales, lo que facilita la identificación de fallas de barra rota.
- Se observa que la banda inferior presenta un comportamiento más estable y robusto frente a variaciones en la carga y a bajo deslizamiento, manteniendo una respuesta gradual entre escenarios de falla. En contraste, la banda superior evidencia una mayor sensibilidad a las condiciones de operación, particularmente en vacío, donde pierde su capacidad de discriminar entre distintas severidades de falla.

En la banda inferior, el valor mínimo de γ observado en escenario de falla corresponde al caso

de una barra rota en condición de vacío, alcanzando 24.42 unidades. En contraste, para la condición sana el valor máximo de γ se obtiene a 25% de carga nominal, con un valor de 6.13 unidades. Esta diferencia significativa entre estados permite proponer, de manera preliminar, que valores de γ superiores a aproximadamente 25 unidades en la banda inferior son indicativos de la presencia de una condición de falla.

No obstante, como se observa en la Fig. 4-20 (gráfico izquierdo), los valores de γ asociados a tres barras rotas pueden presentar variaciones con la velocidad de operación que lleven a valores inferiores a los obtenidos para el caso de una barra rota. Por esta razón, si bien el índice permite discriminar de forma clara entre condición sana y defectuosa, la definición de un umbral robusto para estimar la severidad de la falla resulta más compleja.

Es importante señalar que los resultados presentados en este estudio se basan en el análisis de un único motor. Por lo tanto, los valores del índice γ no pueden generalizarse sin realizar previamente estudios adicionales en motores con distintas características, tales como potencia nominal, número de polos, entre otros.

4.4. Resultados Configuración #2: Metodología base

La Fig. 4-21 presenta, al igual que la Fig. 4-10 en la Sección 4.2, el diagrama de caja y bigotes de las firmas características de falla evaluadas para el MI operando a 1450 rpm. Se observa que, la tendencia es bastante similar a la observada en el caso anterior, con carga; sin embargo, las amplitudes en general se ven reducidas.

Esto se debe a que, al alimentar el MI con voltaje reducido, aproximadamente 100 V para 1450 rpm, el flujo magnético en el entrehierro también disminuye. Dado que el flujo es aproximadamente proporcional al voltaje aplicado, la reducción de tensión provoca una reducción en la intensidad del flujo magnético medido de manera externa. Como resultado, las componentes espectrales asociadas a la falla presentan amplitudes menores en comparación con el caso en que el motor opera a voltaje nominal.

A pesar de que la tendencia es similar a la observada para el caso de 1450 rpm del MI operando con carga, se observa que, ya en esta condición, la amplitud de la firma $f_s + f_r + 2sf_s$ para el escenario de tres barras rotas resulta menor que la correspondiente a una barra rota y muy cercana a la obtenida para el escenario sano. Esto sugiere que, la confiabilidad de la detección de fallas mediante la

evaluación de la amplitud puntual de estas firmas se ve afectada bajo estas condiciones de operación.

De manera análoga, la Fig. 4-22 presenta los resultados para el motor operando a 1485 rpm. Para alcanzar esta velocidad, el motor debió ser alimentado con aproximadamente 200 V. A pesar de este aumento respecto al escenario anterior, se observa que las amplitudes de las firmas características se reducen aún más, seguramente por el efecto del deslizamiento sobre las firmas características, comentado en mayor detalle en la evaluación con carga.

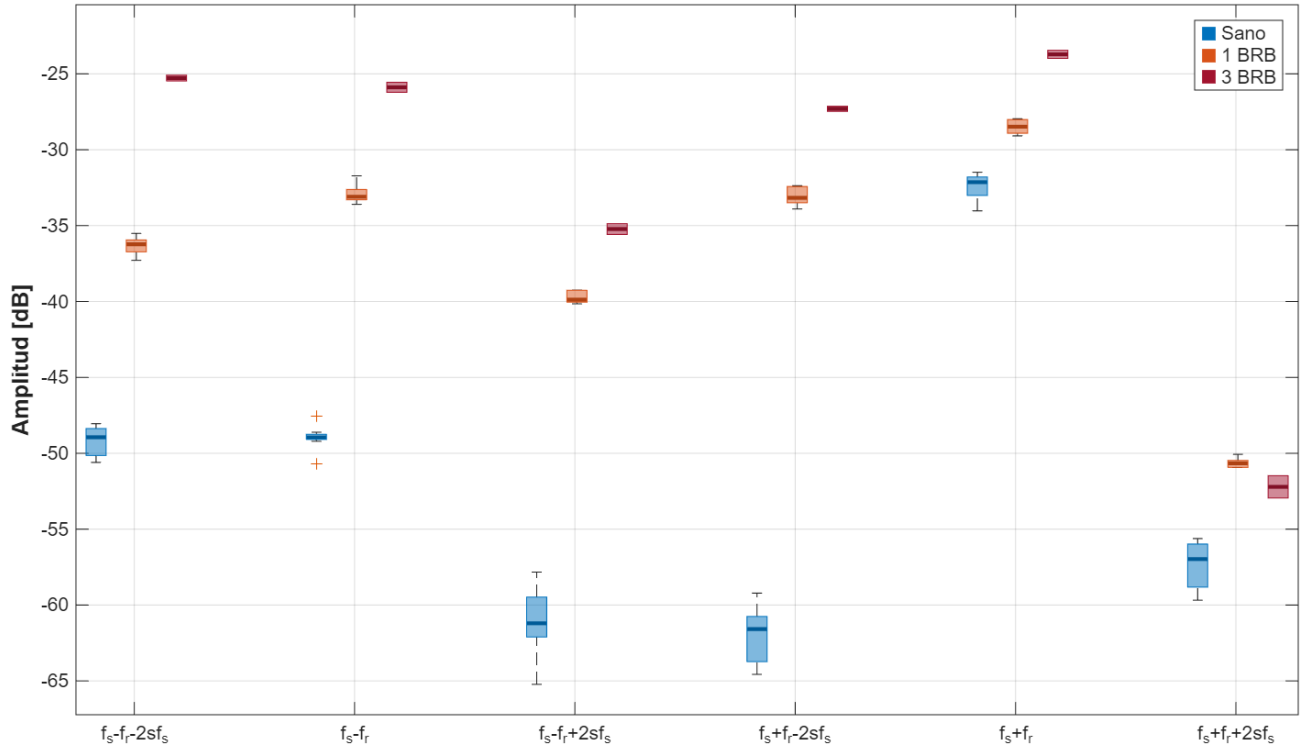


Fig. 4-21 Amplitud de las firmas características para el motor a 1450 rpm operando a voltaje reducido

A diferencia del escenario con carga, en esta condición de operación ni siquiera las firmas $f_s \pm f_r$ permiten detectar de manera consistente la presencia de la falla, lo que evidencia las limitaciones asociadas a la operación del motor a voltaje reducido. La única firma que presenta resultados coherentes es $f_s - f_r - 2sf_s$; sin embargo, este comportamiento no resulta consistente con lo reportado en la literatura ni con los resultados obtenidos previamente bajo condiciones de carga, donde las firmas más robustas corresponden a $f_s \pm f_r$, particularmente la banda inferior. Por lo tanto, no es posible establecer que la detección de la falla puede basarse en el incremento de esta componente en estas condiciones de operación.

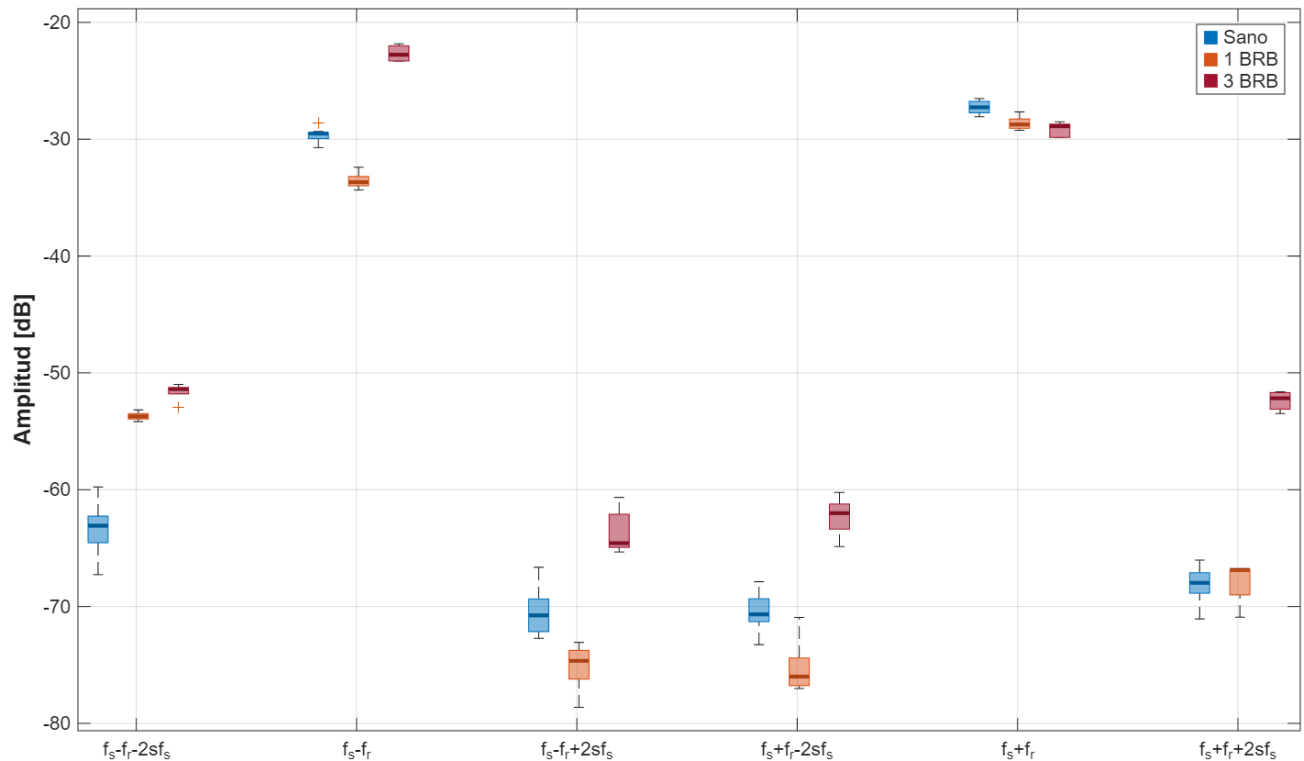


Fig. 4-22 Amplitud de las firmas características para el motor a 1485 rpm operando a voltaje reducido

La Fig. 4-23 presenta los resultados para el motor operando a 1497 rpm. En este escenario, el MI es alimentado con 380 V, lo que corresponde al mismo escenario evaluado en la Sección 4.1 para 0% de carga. Por esta razón, el análisis detallado de las firmas características no se repite. No obstante, es importante señalar que los resultados obtenidos en este escenario presentan una mayor claridad en la identificación de las firmas de falla en comparación con el caso evaluado a 1485 rpm con voltaje reducido. Esto sugiere que la operación a voltaje nominal favorece el diagnóstico de fallas mediante SFSA.

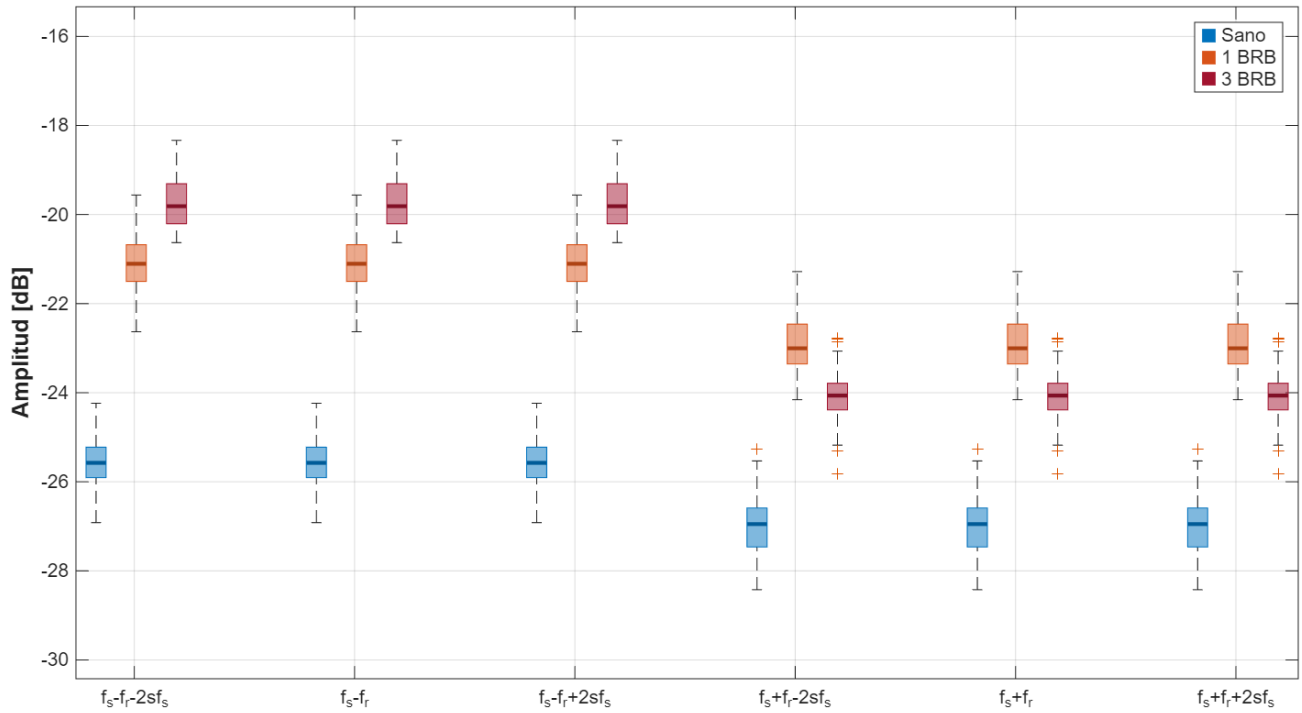


Fig. 4-23 Amplitud de las firmas características para el motor a 1497 rpm operando en vacío

4.5. Resultados Configuración #2: Metodología propuesta

4.5.1 Potencia integrada

Antes de analizar los resultados obtenidos para el índice γ , es conveniente evaluar los resultados de potencia integrada para las bandas centradas en $f_s \pm f_r$, con el objetivo de comprender el origen de los comportamiento atípicos que se observarán posteriormente. Este análisis se presenta de formas más resumida que en el escenario anterior, destacando principalmente los hallazgos relevantes y las limitaciones asociadas a esta condición de operación, la cual resulta más compleja en comparación con el escenario tradicional del motor operando con carga.

La Fig. 4-24 presenta la potencia integrada en las bandas centradas en $f_s \pm f_r$. Se observa que, a 1485 rpm, la potencia integrada en la banda inferior resulta mayor en el escenario sano que en condición de barra rota, lo que implica una perdida de capacidad discriminatoria en torno a 1485 rpm. Sin embargo, como se reportó anteriormente, al operar a 1497 rpm es posible detectar la falla, a pesar de presentar menor deslizamiento, lo que se atribuye a que en esta condición el motor opera a voltaje nominal. Por otra parte, el escenario de tres barras rotas presenta resultados coherentes con la presencia de la falla, siguiendo la tendencia observada en los análisis anteriores, evidenciando que la banda inferior suele mostrar un comportamiento más robusto que la banda superior para la detección

de fallas rotóricas.

La banda superior presenta un comportamiento similar. A 1485 rpm, los valores de potencia integrada tanto para el caso de una barra rota como para tres barras rotas resultan menores que los correspondientes al escenario sano, mostrando el mismo comportamiento observado en la banda inferior

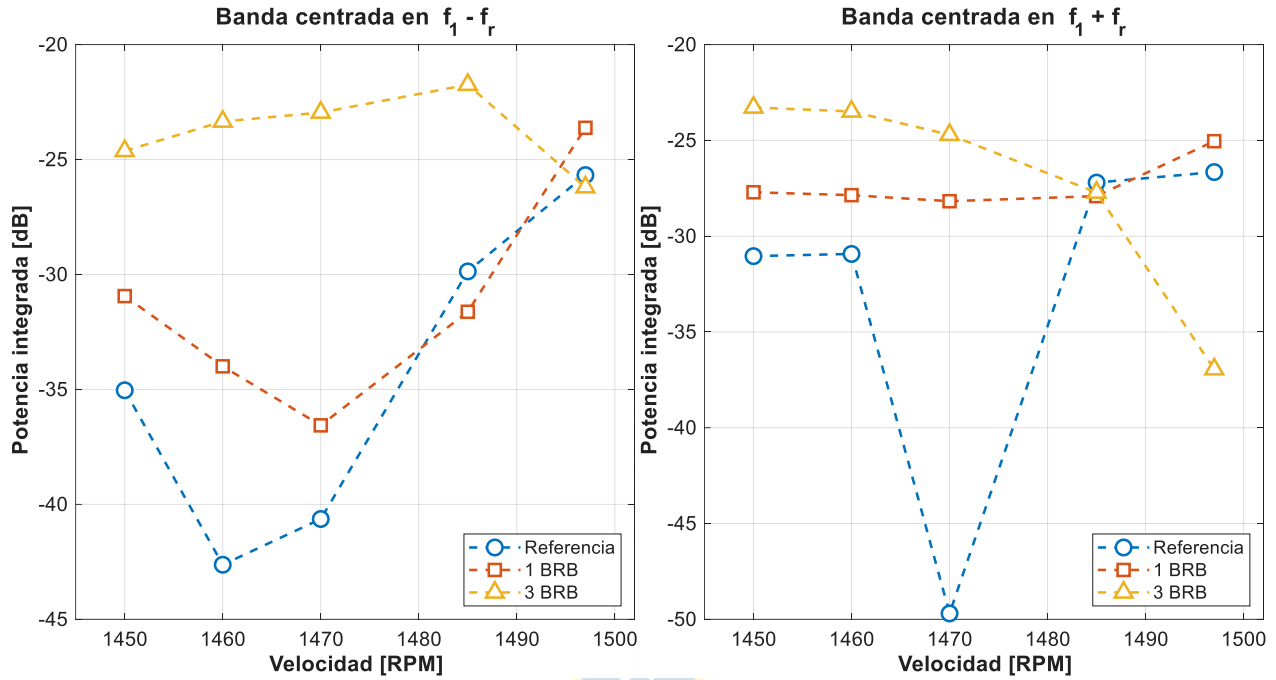


Fig. 4-24 Potencia integrada en las bandas de frecuencia centradas en $f_s \pm f_r$ en función de la velocidad

4.5.2 Valor de γ

La Fig. 4-25 presenta el valor mediano de γ para las mediciones realizadas en vacío a voltaje reducido, en función de la velocidad de operación. Se observa que, en la banda inferior, el valor de γ se reduce de manera significativa al alcanzar 1470 rpm. A pesar de esta disminución, los valores de γ mantienen una relación gradual con la severidad de la falla; sin embargo, el margen entre escenario es muy reducido, lo que no garantiza una clasificación confiable de la condición en este régimen.

Por otra parte, a 1485 rpm se observa que, a diferencia de lo obtenido mediante la evaluación basada en los valores puntuales de amplitud de la firma (ver Fig. 4-11), el índice γ sí permite discriminar la presencia de la falla. Este resultado evidencia la mayor robustez del método basado en la MAD, aunque el margen entre condición sana y defectuosa sigue siendo reducido.

En conjunto, los resultados muestran que el índice γ presenta mayor estabilidad y capacidad

diagnóstica cuando el motor opera bajo carga, mientras que en condición de vacío su desempeño de vuelve más dependiente de la velocidad de operación. Sin embargo, a pesar de la disminución en el voltaje medido con el sensor de flujo, a velocidades cercanas a la nominal, 1450 y 1460 rpm, los valores de γ presentan un margen considerable entre condiciones.

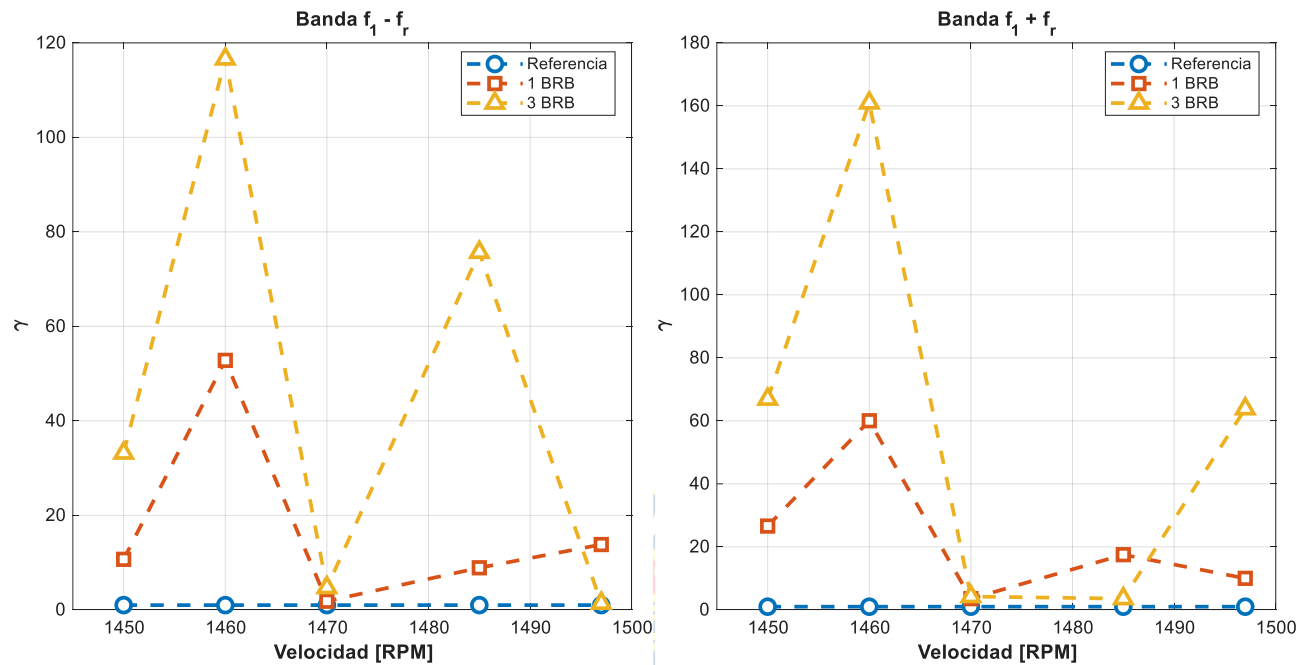


Fig. 4-25 Valores de γ para el motor operando en vacío a voltaje reducido en función de la velocidad

5. Conclusiones

5.1. Sumario

La presente MdeT aborda el diagnóstico de fallas en el rotor de MIJA mediante el análisis del flujo magnético disperso. Se presenta el fundamento teórico de las firmas características utilizadas en métodos de diagnóstico espectral y se describe la metodología base, ampliamente empleada en SFSA, que evalúa la condición de la máquina a partir de la amplitud de dichas firmas. Sobre esta base, se propone una metodología que analiza la potencia contenida en una banda de frecuencias alrededor de las firmas características mediante la integración de la densidad espectral de potencia, con el objetivo de obtener una evaluación más robusta frente a variaciones experimentales.

El estudio se desarrolló mediante simulaciones por elementos finitos y validación experimental utilizando un motor del LEME de la UdeC, evaluando condiciones de operación sana, una barra rota y tres barras rotas.

Los resultados muestran que la metodología convencional, basada en la amplitud de firmas espectrales, permite detectar la falla, pero su capacidad discriminatoria disminuye significativamente con la carga, pasando de amplificaciones entre 5 y 22 veces a carga nominal a aproximadamente 1.7 veces en vacío. En contraste, el índice γ propuesto mantiene valores entre 25 y 150 en condición defectuosa en todo el rango de velocidades, permitiendo una discriminación robusta y la definición de un umbral de detección preliminar ($\gamma > 25$). No obstante, no es posible establecer un criterio consistente para la severidad de la falla, y se observa que reducciones en el voltaje de alimentación afectan negativamente el desempeño del método.

5.2. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el estudio, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- A partir del estudio realizado, se demuestra que es posible detectar la falla mediante la evaluación de la diferencia de amplitud de las firmas características c/r a una referencia en condición sana. En particular, las firmas características en la banda inferior, f_{brb2} y sus bandas laterales, demostraron capacidad discriminatoria a lo largo de todo el rango de velocidades evaluado. Sin embargo, al operar por debajo del 50% de carga, el margen en dB entre las firmas asociadas a la falla y la referencia sana se reduce de manera significativa. Según

resultados presentados en la Sección 4.2, en condición de carga nominal, las firmas analizadas presentan amplificaciones entre 5 y 22 veces respecto a condición sana; al operar al 25% de carga nominal, estos incrementos disminuyen a valores entre aproximadamente 1.8 y 15 veces; mientras que en condición de vacío la amplificación se reduce a alrededor de 1.7 veces. Este comportamiento evidencia que la separación entre las condiciones sana y con falla disminuye a medida que se reduce la carga mecánica, lo que dificulta el diagnóstico en condiciones de bajo torque.

- Como se demuestra en la Sección 4.3, el índice γ propuesto en esta Memoria de Título presenta amplificaciones de entre 25 a 150 veces a lo largo de todo el rango de velocidades evaluado para la banda inferior. Este resultado sugiere que, al considerar la información contenida en una banda de frecuencias, en lugar de realizar un análisis puntual de la amplitud de las firmas espectrales, es posible lograr una discriminación más robusta entre estados del motor. Además, para el motor analizado y bajo las condiciones de operación evaluadas, es posible definir umbrales del índice γ que permitan discriminar de manera clara entre condición sana y defectuosa. En particular, en este estudio se propone que, valores de $\gamma > 25$ unidades podrían estar asociados a la presencia de una falla de barra rota.
- El índice γ permite discriminar de manera clara entre condición sana y defectuosa en los distintos regímenes de operación evaluados, incluso utilizando un número reducido de adquisiciones para los escenarios de falla. Esto podría resultar relevante para aplicaciones industriales, donde la reducción de los tiempos de adquisición de datos es un factor importante para la implementación de sistemas de monitoreo en línea.
- A pesar de que es posible definir un umbral, de manera preliminar, para la detección de la falla y que el índice γ presenta una relación coherente con la severidad del defecto, no es posible establecer un umbral que permita identificar de manera consistente el nivel de severidad de la falla. Esto se debe a que, al evaluar el motor en distintos regímenes de carga, los valores de γ correspondientes a la condición de tres barras rotas se solapan con los obtenidos para una barra rota bajo ciertas condiciones de operación. Un ejemplo de este comportamiento puede observarse en la Fig. 4-20, donde los valores de γ para la condición de tres barras rotas a 1450 rpm resultan menores que los obtenidos para una barra rota a 1460 rpm. No obstante, se observa que valores de γ superiores a 160 unidades solo se alcanzan en condición de tres barras

rotas. En este sentido, se requieren estudios adicionales, considerando distintos motores y condiciones de operación, que permitan analizar la posible relación entre la velocidad de operación y la magnitud del índice γ , con el objetivo de establecer criterios más robustos para la definición de umbrales asociados a la severidad de la falla.

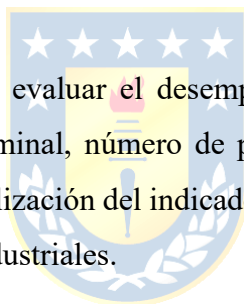
- La medición de flujo magnético disperso se dificulta cuando el motor es alimentado a voltajes inferiores al nominal (380 V). En este estudio, se observa que, bajo esta condición, los valores de γ a 1450 y 1460 rpm permiten identificar la falla de manera consistente, superando el umbral propuesto en la Sección 4.3. Asimismo, se evidencia que la reducción del voltaje de alimentación tiene un impacto más significativo en el desempeño diagnóstico que la disminución del torque de carga. En efecto, como se observa en la Fig. 4-25, los valores de γ obtenidos a voltaje reducido para velocidades de 1470 y 1485 rpm presentan resultados menos favorables que aquellos registrados a 1497 rpm bajo voltaje nominal.

5.3. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro, se propone evaluar el desempeño del índice γ en MI con diferentes características, tales como potencia nominal, número de polos, diferente marca, etc. Este análisis permitiría determinar el grado de generalización del indicador propuesto y evaluar su aplicabilidad en un espectro más amplio de máquinas industriales.

Además, resulta de interés extender la validación experimental a entornos industriales reales. En este tipo de escenarios, la presencia de ruido electromagnético, vibraciones estructurales, interferencias provenientes de otros equipos eléctricos y variaciones dinámicas de carga pueden afectar las mediciones de flujo magnético disperso. La evaluación del método bajo estas condiciones permitiría analizar la robustez del índice frente a perturbaciones propias de la operación industrial.

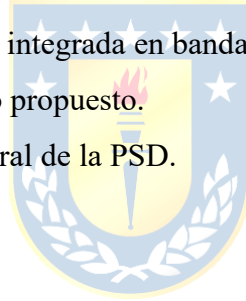
Finalmente, se propone ampliar el alcance del estudio hacia el análisis de señales en régimen transitorio mediante técnicas de descomposición tiempo-frecuencia, tales como la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT). Este enfoque permitiría analizar la evolución temporal de las componentes espectrales asociadas a fallas rotóricas.



Nomenclatura

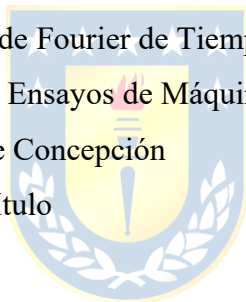
f_s	: Frecuencia de suministro.
f_r	: Frecuencia mecánica del rotor.
s	: Deslizamiento.
P	: Número de pares de polos.
J	: Momento de inercia total del sistema.
ω	: Velocidad angular eléctrica.
ω_r	: Velocidad angular del rotor.
$\Delta\omega_r$	: Ondulación de velocidad del rotor.
$\Delta T(t)$	: Ondulación de torque electromagnético.
θ	: Posición angular respecto al sensor de flujo.
$\Delta\theta$	: Variación angular del rotor.
ϕ	: Flujo magnético fundamental.
F_{ag}	: Fuerza magnetomotriz en el entrehierro.
P_{ag}	: Permeancia del entrehierro.
B_{ag}	: Densidad de flujo magnético en el entrehierro.
J_s	: Densidad de corriente del estator.
J_r	: Densidad de corriente del rotor.
D_r	: Distribución espacial de corriente en las ranuras del rotor.
μ_0	: Permeabilidad magnética del vacío.
g	: Longitud del entrehierro.
N_r	: Número de ranuras del rotor.
$X(f)$	: Transformada de Fourier de la Señal.
A_x	: Amplitud máxima de una firma característica.
f_{brb1}	: Frecuencia característica en $f_s \pm 2sf_s$.
f_{brb2}	: Frecuencia característica en $f_s \pm f_r$.
f_{brb2sb}	: Frecuencia característica en $f_s \pm f_r \pm 2sf_s$.
B_x	: Banda de búsqueda centrada en la frecuencia característica.
Δf_{bus}	: Semiancho de la banda de búsqueda.
f_t	: Frecuencia teórica de la firma característica de falla.

Δf_{res}	: Resolución espectral.
k	: Parámetro que define el ancho de la banda de búsqueda.
$w[n]$	: Función ventana de Hanning.
P_{xx}	: Densidad espectral de potencia.
P_{xx}^W	: PSD estimada mediante el método de Welch.
M	: Longitud de cada segmento en el método de Welch.
L	: Número de segmentos utilizados en la estimación de la PSD.
$X_i[k]$	: Transformada discreta de Fourier del segmento i .
$\tilde{P}_{xx}$	: Periodograma modificado.
U	: Factor de normalización de la ventana.
PB	: Potencia espectral integrada en una banda de frecuencias.
$PB_{\text{fr}}^{(-)}$	: Potencia espectral integrada en banda inferior centrada en $f_s - f_r$.
$PB_{\text{fr}}^{(+)}$	: Potencia espectral integrada en banda superior centrada en $f_s + f_r$.
PB_{fs}	: Potencia espectral integrada en banda centrada en la frecuencia fundamental.
γ	: Índice diagnóstico propuesto.
Δf	: Resolución espectral de la PSD.



Abreviaciones

MI	: Motor de Inducción.
MIJA	: Motor de Inducción de Jaula de Ardilla.
MIRB	: Motor de Inducción de rotor bobinado.
CBM	: Monitoreo Basado en la Condición.
SFSA	: Análisis de la Firma del Flujo Disperso
MCSA	: Análisis de la Firma de Corriente del Motor
FFT	: Transformada Rápida de Fourier.
PSD	: Densidad Espectral de Potencia.
PB	: Potencia en Banda.
FEM	: Método de Elementos Finitos.
WSS	: Estacionario en sentido amplio.
MAD	: Desviación mediana absoluta
STFT	: Transformada de Fourier de Tiempo Corto.
LEME	: Laboratorio de Ensayos de Máquinas Eléctricas
UdeC	: Universidad de Concepción
MdeT	: Memoria de Título



Referencias

- [1] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, 5ª ed. México: McGraw Hill/Latinoamérica, 2012.
- [2] D. F. de Souza, F. A. M. Salotti, I. L. Sauer, H. Tatizawa, A. T. de Almeida and A. G. Kanashiro, "A performance evaluation of three-phase induction electric motors between 1945 and 2020," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2002, 2022.
- [3] S. Kumar, D. Mukherjee, P. K. Guchhait, R. Banerjee, A. K. Srivastava and N. Vishwakarma "A comprehensive review of condition based prognostic maintenance (CBPM) for induction motor," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 90690-90704, 2019.
- [4] D. Chaudhari, "How does an AC Motor Work? | Its Purpose," DipsLab. [On line]. Available: <https://dipslab.com/how-ac-motor-work-purpose/>. [Accessed: May 12, 2025].
- [5] tecnind2, "Motor trifásico," *Máquinas eléctricas*, WordPress. [On line]. Available: <https://maquinaselectricastecnind.wordpress.com/2015/04/14/motor-trifasico/>. [Accessed: May 12, 2025].
- [6] J. Faiz, V. Ghorbanian, and G. Joksimović, "Fault diagnosis of induction motors," *Institution of Engineering and Technology*, pp. 71–167, 2017.
- [7] T. A. Garcia-Calva, D. Moríñigo-Sotelo, V. Fernandez-Cavero, and R. D. J. Romero-Troncoso, "Early detection of faults in induction motors—A review," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7855, 2022.
- [8] S. Ruzimov, Z. Jiangzhong, S. Latipov and M. A. Shahzad, "Fault detection in induction motors: recent advances and future prospects," *2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*, Novosibirsk, Russian Federation, 2024, pp. 1420-1427.
- [9] B. H. Bahgat, E. A. Elhay, T. Sutikno, and M. M. Elkholy, "Revolutionizing motor maintenance: A comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. (IJPEDS)*, vol. 15, no. 3, pp.

1968–1989, Sep. 2024.

- [10] A. Choudhary, D. Goyal, S. L. Shimi, and A. Akula, “Condition monitoring and fault diagnosis of Induction Motors: A Review,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 1221–1238, Sep. 2018.
- [11] J. de Jesus Rangel-Magdaleno, “Induction Machines Fault Detection: An overview,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 24, no. 7, pp. 63–71, Oct. 2021.
- [12] B. H. Bahgat, E. A. Elhay, and M. M. Elkholy, “Advanced fault detection technique of three phase induction motor: Comprehensive review,” *Discover Electronics*, vol. 1, no. 1, Jun. 2024.
- [13] O. Vitek, M. Janda, V. Hajek, and P. Bauer, “Detection of eccentricity and bearings fault using Stray Flux Monitoring,” *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, pp. 456–461, Sep. 2011.
- [14] S. A. Afolalu, S. I. Monye, A. T. Ogundipe, T. M. Azeez and O. M. Ikumapayi, "Maintenance Strategies and Procedures: an Overview," *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)*, Omu-Aran, Nigeria, 2024, pp. 1-8.
- [15] A. A. Manjare and B. G. Patil, "A Review: Condition based techniques and predictive maintenance for motor," *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 807-813.
- [16] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [17] S. Gundewar and P. Kane, “Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor,” *J. Vibrat. Eng. Technol.*, vol. 2020, pp. 643–674, Oct. 2020.
- [18] D. Liu, H. Inoue and M. Kanemaru, "Robust motor current signature analysis (MCSA)-based fault detection under varying operating conditions," *2022 25th International*

Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-5.

- [19] PRUFTECHNIK, "Sensores de vibración y accesorios," PRUFTECHNIK. [On line]. Available: <https://www.pruftechnik.com/es/productos-y-servicios/sistemas-de-monitoreo-de-condici%C3%B3n/sensores-y-accesorios/sensores-devibraci%C3%B3n-y-accesorios/>. [Accessed: July 17, 2025].
- [20] E. Mazaheri-Tehrani and J. Faiz, "Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 16, no. 3, pp. 277–299, Mar. 2022.
- [21] A. A. Anteliz Jaimes, "El flujo de dispersión magnético como herramienta de análisis para detección de fallas en motores de inducción mediante técnicas de análisis espectral," 2009.
- [22] G.-A. Capolino, R. Romary, H. Henao, and R. Pusca, "State of the art on stray flux analysis in faulted Electrical Machines," *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, pp. 181–187, Apr. 2019.
- [23] P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu and K. N. Gyftakis, "A new approach for broken rotor bar detection in induction motors using frequency extraction in stray flux signals," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 3501-3511, July-Aug. 2019.
- [24] Luka Čulić, Nediljko Kaštelan, Marko Zubčić, Ivan Pavić, "Induction motor multiple fault análisis using stray flux signals: a review", *Transactions on Maritime Science*, vol. 14, no. 2, pp 5-5, 2025.
- [25] I. Zamudio-Ramírez, Jose M. Mendoza-Ortiz, Roque A. Osomio-Ríos, and J. Antonino-Daviu, "Stray Flux Signal Analysis for Faults Detection in Induction Motors During Startup Transient By Means Of Statistical Indicators," *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2023.

- [26] M. Zubčić, I. Pavić, P. Matić, and A. Polak, "Broken rotor bar detection based on steady-state stray flux signals using triaxial sensor with random positioning," *Sensors*, vol. 24, no. 10, Art. no. 10, 2024.
- [27] K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou and S. B. Lee, "Generation of mechanical frequency related harmonics in the stray flux spectra of induction motors Suffering from rotor electrical faults," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 4796-4803, Sept.-Oct. 2020.
- [28] S. B. Lee, J. Shin, Y. Park, H. Kim and J. Kim, "Reliable flux-based detection of induction motor rotor faults from the fifth rotor rotational frequency sideband," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 7874-7883, Sept. 2021.
- [29] T. Goktas, M. Arkan, M. S. Mamis and B. Akin, "Broken rotor bar fault monitoring based on fluxgate sensor measurement of leakage flux," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, USA, 2017, pp. 1-6.
- [30] Y. Park, H. Choi, S. B. Lee and K. N. Gyftakis, "Search coil-based detection of nonadjacent rotor bar damage in squirrel cage induction motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 4748-4757, Sept.-Oct. 2020.
- [31] P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu and K. N. Gyftakis, "Analysis of stray flux spectral components in induction machines under rotor bar breakages at various locations," *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 2345-2351.
- [32] M. Salinas, N. Trachalakis, P. A. Panagiotou and K. N. Gyftakis, "Reliable detection of non-adjacent broken rotor bars via the analysis of the zero-sequence flux" *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Torino, Italy, 2024, pp. 1-6.
- [33] Y. Park, H. Choi, S. B. Lee and K. Gyftakis, "Flux-based detection of non-adjacent rotor bar damage in squirrel cage induction motors," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 7019-7026.
- [34] C. Yang, T. -J. Kang, D. Hyun, S. B. Lee, J. A. Antonino-Daviu and J. Pons-Llinares,

"Reliable detection of induction motor rotor faults under the rotor axial air duct influence," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2493-2502, 2014.

[35] A. Bellini et al., "On-field experience with on-line diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 1045–1053, 2002.

[36] W. T. Thomson, "On-line current monitoring—The influence of mechanical loads or a unique rotor design on the diagnosis of broken rotor bars in induction motors," in *Proc. ICEM*, 1992, pp. 1236–1240.

[37] S. Lee et al., "Evaluation of the influence of rotor axial air duct design on condition monitoring of induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2024–2033, Sep./Oct. 2013.

[38] Y. Park et al., "Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 7561-7570, Oct. 2019.

[39] K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou and S. B. Lee, "The role of the mechanical speed frequency on the induction motor fault detection via the stray flux," *IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Toulouse, France, 2019, pp. 201-207.

[40] S. V. Vaseghi, *Advanced digital signal processing and noise reduction*. Chichester, U. K.: John Wiley & Sons, 2008.

[41] R. B. Randall, *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2021.

[42] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard and L. Licata, "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median," *J. Exp. Soc. Psychol*, vol. 49, pp. 764–766, 2013.

[43] V. Biot-Monterde, A. Navarro-Navarro, J. A. Antonino-Daviu, and H. Razik, "Stray

flux analysis for the detection and severity categorization of rotor failures in induction machines driven by soft-starters,” *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021, Art. no. 5757.

[44] International Organization for Standardization, *ISO 10816-3: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min*, Geneva, Switzerland, 2009.

[45] W. T. Thomson and I. Culbert, *Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors: Industrial application and case histories*. John Wiley & Sons, 2017.



6. Anexo

Se envió un artículo a la conferencia ICEM 2026 que presenta los principales hallazgos de esta Memoria de Título.

Robust Rotor Fault Diagnosis in Induction Motors Using Stray-Flux Spectral Power Integration and Median-Based Statistics

Leonardo Burgos
Department of Electrical Engineering
University of Concepción
Concepción, Chile
lburos2020@udec.cl

Carlos Madariaga-Cifuentes
Department of Electrical Engineering
University of Concepción
Concepción, Chile
carlosmadariaga@udec.cl

Jose, E. Ruiz-Sarrió
Instituto Tecnológico de la Energía
Universitat Politècnica de Valencia
Valencia, Spain
joruisar@die.upv.es

Cesar Gallardo
Power Electronics, Machines and
Control Research Institute
University of Nottingham
Nottingham, United Kingdom
cesar.gallardoSanchez@nottingham.ac.uk

Juan A. Tapia
Department of Electrical Engineering
University of Concepción
Concepción, Chile
juantapia@udec.cl

Jose A. Antonino-Daviu
Instituto Tecnológico de la Energía
Universitat Politècnica de Valencia
Valencia, Spain
joanda@die.upv.es

Abstract— This paper proposes a robust method for rotor fault diagnosis in induction motors based on stray-flux measurements. Unlike conventional approaches relying on the amplitude of discrete fault-related frequencies, the proposed method evaluates the power spectral density (PSD) over selected frequency bands and characterizes its statistical variability using a median-based indicator. Experimental results obtained under different load conditions show that conventional amplitude-based metrics exhibit differences below 3–5 dB with significant overlap between healthy and faulty cases. In contrast, the proposed indicator achieves clear separation between conditions, with order-of-magnitude differences and minimal dispersion. The method enables reliable detection of rotor asymmetries and fault severity using a simple, non-invasive sensor.

Keywords—Induction motors, statistical analysis, stray flux.

I. INTRODUCTION

Induction motors remain the backbone of modern industry due to their robustness, efficiency, and low maintenance requirements. However, rotor faults, particularly broken rotor bars and distributed rotor asymmetries, continue to represent a critical source of performance degradation, energy inefficiency, and unexpected downtime. Consequently, the development of reliable, sensitive, and non-invasive diagnostic techniques has become a central topic in condition monitoring research [1]–[2].

Among the available approaches, stray flux signature analysis (SFSA) has emerged as a powerful alternative to traditional methods such as motor current signature analysis (MCSA). Unlike current-based techniques, stray flux measurements directly capture the electromagnetic field leaking outside the machine, providing rich information about internal asymmetries without requiring electrical access to the stator terminals [4]. This has motivated extensive research demonstrating that stray flux analysis can achieve detection capabilities comparable to those of current-based methods [4]–[8].

Significant efforts have been developed on identifying rotor faults through the analysis of characteristic frequency components in stray flux signals. These include components related to slip-dependent sidebands and mechanical frequencies, which have been successfully used for detecting

both adjacent and non-adjacent broken rotor bars [5], [9]. In this context, different signal processing strategies have been proposed, including frequency extraction techniques, harmonic tracking, and steady-state spectral analysis, [10]–[11].

Despite these advances, most existing methods still rely on a frequency-domain paradigm centered on discrete spectral components, where the amplitude at specific fault-related frequencies is used as the main diagnostic indicator. Even more sophisticated approaches (such as enhanced spectral analysis, time–frequency representations, or advanced feature extraction) ultimately depend on the identification of localized spectral features [8], [11]. However, this single-frequency or localized spectral approach presents fundamental limitations. First, the amplitude of fault-related components is highly sensitive to operating conditions, including load level, slip variations, and measurement noise [2]. Second, spectral leakage and limited frequency resolution can impede the detection of the fault signature, especially in cases of incipient or distributed rotor asymmetries. Third, the implicit assumption that diagnostic information is concentrated at specific frequencies neglects the fact that rotor faults inherently introduce global spectral distortions, affecting not only discrete harmonics but also the overall energy distribution of the signal.

Recent studies have suggested that improved diagnostic performance can be achieved when broader spectral information is considered, rather than isolated peaks. For instance, approaches based on harmonic pattern analysis, energy distribution, or statistical descriptors have shown increased robustness in challenging operating conditions [12]–[14]. Nevertheless, these methods often involve increased computational complexity or reduced interpretability, limiting their practical adoption in industrial environments.

In this context, there remains a clear gap in the literature: a simple, physically interpretable, and robust method capable of exploiting the global spectral information contained in stray flux signals, without relying on single-frequency indicators, with clear thresholds to separate the healthy and faulty conditions, categorizing the fault severity as well.

To address this limitation, this paper proposes a diagnostic methodology based on the statistical analysis of the power