

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Carlos F. Madariaga C.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Análisis de firma de corriente para detectar fallas de
rotor en máquinas de inducción comerciales
alimentadas mediante variador de frecuencia.

Concepción, Abril de 2026

Diego Andrés Espinoza Torres

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Carlos F. Madariaga C.

Análisis de firma de corriente para detectar fallas de rotor en máquinas de inducción comerciales alimentadas mediante variador de frecuencia.

Diego Andrés Espinoza Torres

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Abril 2026

Resumen

El análisis de firma de corriente de motor, Motor Current Signature Analysis (MCSA), ha sido ampliamente estudiado y aplicado en la industria desde la década de 1980 para el diagnóstico de motores de inducción alimentados directamente desde la red, siendo un método destacado por su naturaleza no invasiva y bajo costo de implementación. Sin embargo, el aumento de uso de Variadores de Frecuencia (VDF) de la última década ha supuesto un reto para su implementación debido a limitaciones en escenarios de velocidad y frecuencia variable.

Esta memoria presenta el desarrollo, implementación y validación experimental de un algoritmo de diagnóstico utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT), el cual permite identificar firmas de falla de rotor, específicamente barras rotas, mediante el procesamiento de señales de corriente y velocidad en motores alimentados a través de variadores de frecuencia, evaluando si es posible un diagnóstico y determinando que parámetros afectan el diagnóstico, como la frecuencia de conmutación, estrategia de control y frecuencia de alimentación.

La validación se desarrolla de forma experimental en el Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas (LEME), utilizando Hardware in the loop (HITL) a través de MicroLabBox de dSPACE, un motor de inducción jaula de ardilla (MIJA) y un VDF operado con un lazo de control abierto y un control cerrado escalar V/f , evaluando operaciones en estado estacionario con distintos niveles de carga.

Los resultados muestran que el algoritmo es robusto frente al ruido de conmutación del VDF para todas las pruebas experimentales realizadas, sin que este afecte en la tasa de detección. Se observa un mejor desempeño en lazo cerrado donde es posible detectar en un rango amplio de frecuencias de alimentación, en lazo abierto la tasa de detección disminuye a medida que se disminuye la frecuencia de alimentación, evidenciando la importancia del control utilizado para asegurar un diagnóstico correcto.



A mi familia.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente al profesor Carlos Madariaga y al profesor Juan Antonio Tapia por su gran disposición para guiarme y orientarme con conocimiento y experiencia en el desarrollo de esta memoria de título.

Al LEME, por su buena onda, consejos y paciencia durante todo este tiempo, gracias por aguantar todo el ruido que hacía mientras realizaba pruebas, que no fue poco ni duró poco.

A las personas que hicieron posible esta memoria, Don René, Don Ernesto y Don Ramón Lillo, gracias por su buena disposición para ayudar y por la preocupación para que todo funcione correctamente.

A todas las personas que estuvieron durante estos años, profesores, funcionarios, personas que estuvieron ahí, especialmente a amigos y compañeros, gracias por hacer de esto una etapa llevadera y divertida.

Finalmente quiero agradecer a Dios y a las personas que me han brindado apoyo durante todos estos años, especialmente a mis padres Guido y Marlene y a mi hermano Gustavo, gracias por confiar en mí y por aguantarme todos estos años, también a mis primos, tíos y tías, gracias a todos por brindarme apoyo para estudiar, les estoy infinitamente agradecido y espero retribuirles algún día todo lo que han hecho por mí.

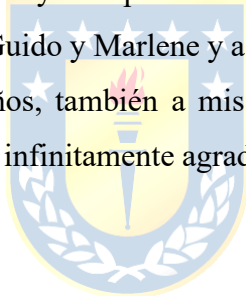


Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. VARIADOR DE FRECUENCIA	4
1.3. TRABAJOS PREVIOS	7
1.3.1 Detección de fallas en MI sin VDF – métodos establecidos	7
1.3.2 Detección de fallas en MI con VDF – desafíos	10
1.3.3 Discusión	13
1.4. OBJETIVOS	16
1.4.1 Objetivo General	16
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	18
2.1. METODOLOGÍA ASOCIADA AL OE1	18
2.2. METODOLOGÍA ASOCIADA AL OE2	19
2.3. METODOLOGÍA ASOCIADA AL OE3	22
CAPÍTULO 3. ALGORITMO IMPLEMENTADO	24
3.1. DERIVACIÓN DE BANDAS LATERALES DE FALLA	24
3.2. FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO	26
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE CONTROL DE MI EN MICROLABBOX	29
4.1. VINCULACIÓN MLB - SIMULINK – CONTROLDESK	29
4.2. CONTROL DESARROLLADO	31
4.2.1 Control V/f lazo abierto	32
4.2.2 Control V/f lazo cerrado	33
4.3. HARDWARE IN THE LOOP	34
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE ALGORITMO EN MOTOR Y VDF	40
5.1. SET DE PRUEBAS	40
5.2. FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN	41
5.3. CASOS NO ESTUDIADOS	42
5.4. RESULTADOS EN LAZO ABIERTO	43
5.5. RESULTADOS EN LAZO CERRADO	51
5.6. RUIDO, SENSIBILIDAD Y DESLIZAMIENTO	58
5.6.1 Lazo abierto	61
5.6.2 Lazo cerrado	65
5.7. VARIACIONES DE CARGA	67
5.8. LIMITACIONES	72
5.8.1 Limitaciones técnicas	72
5.8.2 Limitaciones económicas	72
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	75
6.1. SUMARIO	75
6.2. CONCLUSIONES	75
6.3. TRABAJO FUTURO	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ANEXO A.	ESQUEMAS MICROLABBOX Y ENCODER INCREMENTAL	82
ANEXO B.	TABLAS DE DIAGNÓSTICO	83
B.1 LAZO ABIERTO		83
B.2 LAZO CERRADO		104



Lista de Tablas

Tabla 1.1 Potenciales ahorros para variadores de velocidad para bombas y ventiladores [10].	6
Tabla 1.2 Frecuencias características de falla producidas por fallas en motores de inducción	14
Tabla 2.1 Frecuencia de falla característica para fallas de rotor en motores de inducción [3]	19
Tabla 2.2 Datos de placa máquina motor Cantoni	21
Tabla 3.1 Estimador de severidad de barras rotas de rotor [3].	27
Tabla 5.1 Escenarios a evaluar	40
Tabla 5.2 Rangos de diagnóstico	41
Tabla 5.3 VDFs comerciales y sus respectivas frecuencias de conmutación.	42
Tabla 5.4 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 1 kHz	46
Tabla 5.5 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 2,5 kHz	47
Tabla 5.6 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 4 kHz	47
Tabla 5.7 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 5,5 kHz	48
Tabla 5.8 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 7 kHz	49
Tabla 5.9 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 8,5 kHz	49
Tabla 5.10 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 10 kHz	50
Tabla 5.11 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 1 kHz	54
Tabla 5.12 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 2,5 kHz	55
Tabla 5.13 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 4 kHz	56
Tabla 5.14 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 5,5 kHz	56
Tabla 5.15 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 7 kHz	57
Tabla 5.16 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 8,5 kHz	57
Tabla 5.17 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 10 kHz	58
Tabla 5.18 Diferencia de magnitud con la fundamental de armónicos de conmutación	60
Tabla 5.19 Diagnósticos clasificados por frecuencia de conmutación - lazo abierto	61
Tabla 5.20 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto	62
Tabla 5.21 Corriente a 10 Hz - lazo abierto - 1 kHz de conmutación	65
Tabla 5.22 Diagnósticos clasificados por frecuencia de conmutación - lazo cerrado	66
Tabla 5.23 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - global	66
Tabla 5.24 Resultados ante variación de carga	68
Tabla 5.25 Cotización implementación MCSA en Chile	73
Tabla B.1 Resultados en lazo abierto para 1 kHz conmutación	83
Tabla B.2 Información adicional: lazo abierto - 1 kHz conmutación	84
Tabla B.3 Resultados en lazo abierto para 2,5 kHz conmutación	86
Tabla B.4 Información adicional: lazo abierto - 2,5 kHz conmutación	87
Tabla B.5 Resultados en lazo abierto para 4 kHz conmutación	89
Tabla B.6 Información adicional: lazo abierto - 4 kHz conmutación	90
Tabla B.7 Resultados en lazo abierto para 5,5 kHz conmutación	92
Tabla B.8 Información adicional: lazo abierto - 5,5 kHz conmutación	93
Tabla B.9 Resultados en lazo abierto para 7 kHz conmutación	95
Tabla B.10 Información adicional: lazo abierto - 7 kHz conmutación	96
Tabla B.11 Resultados en lazo abierto para 8,5 kHz conmutación	98
Tabla B.12 Información adicional: lazo abierto - 8,5 kHz conmutación	99
Tabla B.13 Resultados en lazo abierto para 10 kHz conmutación	101
Tabla B.14 Información adicional: lazo abierto - 10 kHz conmutación	102
Tabla B.15 Resultados en lazo cerrado para 1 kHz conmutación	104

Tabla B.16 Información adicional: lazo cerrado - 1 kHz conmutación	105
Tabla B.17 Resultados en lazo cerrado para 2,5 kHz conmutación	106
Tabla B.18 Información adicional: lazo cerrado - 2,5 kHz conmutación	107
Tabla B.19 Resultados en lazo cerrado para 4 kHz conmutación	109
Tabla B.20 Información adicional: lazo cerrado - 4 kHz conmutación	110
Tabla B.21 Resultados en lazo cerrado para 5,5 kHz conmutación	112
Tabla B.22 Información adicional: lazo cerrado - 5,5 kHz conmutación	112
Tabla B.23 Resultados en lazo cerrado para 7 kHz conmutación	114
Tabla B.24 Información adicional: lazo cerrado - 7 kHz conmutación	115
Tabla B.25 Resultados en lazo cerrado para 8,5 kHz conmutación	117
Tabla B.26 Información adicional: lazo cerrado - 8,5 kHz conmutación	118
Tabla B.27 Resultados en lazo cerrado para 10 kHz conmutación	120
Tabla B.28 Información adicional: lazo cerrado - 10 kHz conmutación	121



Lista de Figuras

Fig. 1.1 Porcentaje de falla por componente a) Bajo Voltaje b) Alto Voltaje	2
Fig. 1.2 Esquema de Variador de Frecuencia con IGBTs	5
Fig. 1.3 Bandas laterales de frecuencia para motor sano y con barra rota	15
Fig. 2.1 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE1	19
Fig. 2.3 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE2	20
Fig. 2.3 Máquina Cantoni usada para evaluación experimental.	21
Fig. 2.4 Setup experimental de laboratorio a) MicroLabBox y encoder incremental b) VDF Danfoss FC302	21
Fig. 2.5 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE3	23
Fig. 3.1 Campos de rotación directo e inverso en presencia de barra rota de rotor	24
Fig. 3.2 Visualización de algoritmo - lazo cerrado - motor 3 BRB	28
Fig. 4.1 Bloques utilizados Librería dSPACE	29
Fig. 4.2 Interfaz ControlDesk	30
Fig. 4.3 Encoder incremental con acople de DUROCOTON® y conector ensamblado	30
Fig. 4.4 Esquema de control en lazo abierto	32
Fig. 4.5 Esquema de control en lazo cerrado	33
Fig. 4.6 Comportamiento en vacío de lazo de control cerrado	34
Fig. 4.7 Utilización de MLB según aplicación específica	35
Fig. 5.1 Lazo abierto en motor sano con 50% de carga, 10 kHz de conmutación	44
Fig. 5.2 Lazo abierto en motor con 1 BRB a plena carga 5,5 kHz de conmutación	45
Fig. 5.3 Lazo abierto en motor con 3 BRB a plena carga - 1 kHz de conmutación	45
Fig. 5.4 Lazo cerrado en motor sano con 100% de carga, 10 kHz de conmutación	52
Fig. 5.5 Lazo cerrado en motor 1BRB con 75% de carga, 5,5 kHz de conmutación	52
Fig. 5.6 Lazo cerrado en motor 3 BRB con 50% de carga, 1 kHz de conmutación	53
Fig. 5.7 Primer armónico de banda lateral de conmutación - 1khz	60
Fig. 5.8 Primer armónico de banda lateral de conmutación - 2,5khz	61
Fig. 5.9 Falso positivo - Motor 1BRB - Lazo abierto	62
Fig. 5.10 Falso negativo - Motor 1BRB - Lazo abierto	63
Fig. 5.11 Circuito equivalente MI	65
Fig. 5.12 Perfil de carga variable	67
Fig. 5.13 Variación de carga - lazo cerrado motor sano	69
Fig. 5.14 Velocidad motor Cantoni antes, durante y después de variación de carga – lazo cerrado motor sano	69
Fig. 5.15 Variación de carga - lazo abierto motor 1 BRB	71
Fig. 5.16 Velocidad motor Cantoni antes, durante y después de variación de carga – lazo abierto motor 1 BRB	71
Fig. 5.17 Interfaz MCSA Megger Baker EXP4000	73
Fig. 5.18 Soluciones en la industria a) ALL-TEST Pro MD III b) Megger Baker EXP4000	74
Fig. A.1 Mapeo y pines de conexión encoder incremental	82

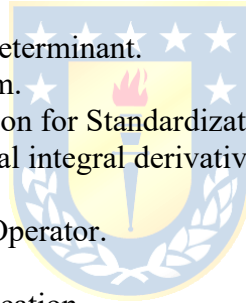
Nomenclatura

N_{sinc}	: Velocidad sincrónica
f_e	: Frecuencia eléctrica
P	: Número de polos de la máquina
N_{slip}	: Velocidad de deslizamiento
s	: Deslizamiento
N_m	: Velocidad mecánica de rotor
f_2	: Frecuencia de corriente de rotor
p	: Número de pares de polos
N_r	: Velocidad de rotor
N_{sb}	: Velocidad del campo magnético giratorio inverso
f_{sb}	: Frecuencia de banda lateral de falla
Δf	: Resolución espectral
f_s	: Frecuencia de muestro
N	: Número de muestras
t_{acq}	: Tiempo de adquisición
ψ_m	: Flujo máximo de entrehierro
V_s	: Voltaje de fase
K_a	: Constante de relación voltaje/frecuencia
V_{LL}	: Voltaje línea-línea
V_{LLnom}	: Voltaje línea-línea nominal
f_{nom}	: Frecuencia nominal
V_{boost}	: Voltaje boost
f_{harm}	: Frecuencia de armónico de conmutación
m	: Índice de frecuencia de conmutación
n	: Índice de frecuencia fundamental
f_{sw}	: Frecuencia de conmutación



Abreviaciones

MI	: Motor de inducción.
MIJA	: Motor de inducción jaula ardilla.
VDF	: Variador de frecuencia.
MCSA	: Motor Current Signature Analysis.
AC	: Corriente alterna.
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
RPM	: Revoluciones por minuto.
MOSFET	: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor.
PWM	: Modulación por ancho de pulso.
HVAC	: Heating, ventilation and air conditioning.
BRB	: Broken Rotor Bar.
FFT	: Transformada Rápida de Fourier.
DWT	: Transformada discreta Wavelet.
EMD	: Descomposición Empírica Modal.
HOG	: Histograma de Gradientes Orientados.
MLP	: Red Neuronal Multicapa.
VSI	: inversor fuente voltaje.
MCD	: Minimun Covariance Determinant.
DAQ	: Data Acquisition System.
ISO	: International Organization for Standardization.
PID	: Controlador proporcional integral derivativo.
STMN	: Short-Time Min-Norm.
TKEO	: Teager-Kaiser Energy Operator.
MLB	: MicroLabBox.
MUSIC	: Multiple Signal Classification.
AFE	: Active Front End.
DOL	: Direct On Line.
BJT	: Bipolar Junction Transistor.
SiC	: Carburo de Silicio.
GaN	: Nitruro de galio.
CMV	: Common Mode Voltage.
HITL	: Hardware-in-the-Loop.
SVPWM	: Modulación por Ancho de Pulso de Vector Espacial.
SPWM	: Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal.
THD	: Total Harmonic Distortion.
PI	: Controlador proporcional-integral.
FPGA	: Field Programmable Gate Array.
DSP	: Digital Signal Processor.
LEME	: Laboratorio de Ensayo de Máquinas Eléctricas.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

El motor de inducción (MI) es altamente conocido por ser una máquina robusta y confiable, además de ser un convertidor de energía electromecánica eficiente y uno de los más utilizados, específicamente el motor de inducción de jaula ardilla (MIJA), siendo esencial dentro de la industria, estableciéndose que alrededor de un 90% lo emplean como fuente principal de movimiento [1].

Aproximadamente la mitad de toda la electricidad generada es convertida en energía mecánica mediante el MI jugando un papel clave en la industria, impulsando maquinarias, bombas, ventiladores, compresores, transportadores, elevadores y tareas rutinarias pero vitales [1]. Los MI son los más utilizada en la industria en aplicaciones de velocidad fija, y también en el ámbito de la velocidad controlada gracias a la disponibilidad de variadores de frecuencia (VDF) [2].

Los MI consumen un 40-50% de la electricidad generada en un país industrializado, siendo estos el principal accionamiento electromecánico de la era moderna [3]. Es por ello que el funcionamiento de estos debe ser confiable, de tal forma de mantener la productividad, eficiencia y seguridad de una instalación industrial.

Los MI y demás máquinas eléctricas están sujetos a fallas originadas por estrés mecánico, sobrecargas térmicas o cortocircuitos, pudiendo ocurrir en cualquier componente del motor, donde el riesgo de la falla depende del tipo y diseño del motor. Las fallas pueden clasificarse según su naturaleza (eléctrica, magnética o mecánica) y localización dentro de la máquina. La Fig. 1.1 muestra los porcentajes de falla por ubicación dentro del motor (estator, rotor, rodamientos y otros componentes, incluyendo excentricidad), distinguiendo por baja y alta tensión respectivamente. En este último caso, se observa un mayor porcentaje de fallas en el estator, debido a condiciones operativas adversas en entornos industriales, ausencia de elementos rodantes en los rodamientos y mayor complejidad en los sistemas de aislamiento [4].

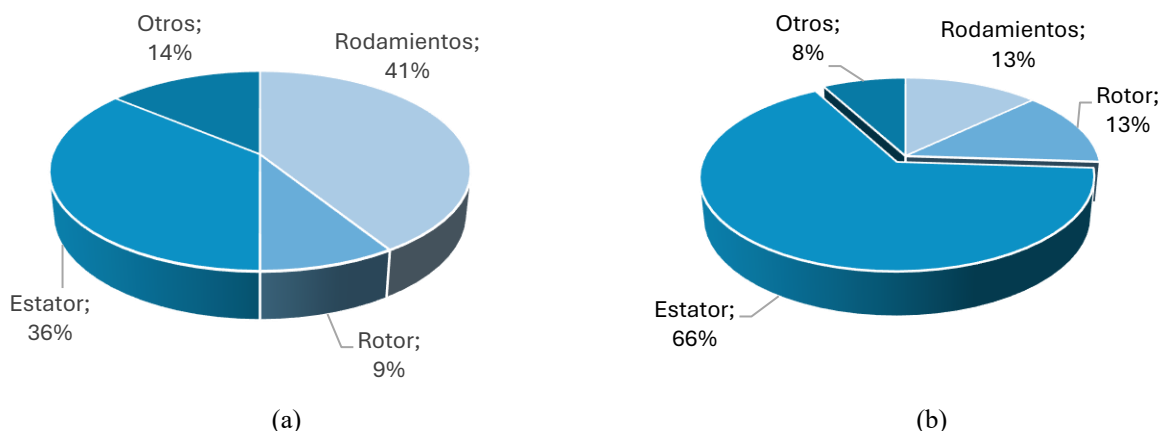


Fig. 1.1 Porcentaje de falla por componente a) Bajo Voltaje b) Alto Voltaje

Los MI se utilizan con frecuencia en ambientes hostiles, con presencia de agua, humedad, polvo y corrosión. Estos son principales fuentes de fallas en baja tensión, específicamente en rodamientos. Una instalación deficiente de rodamiento puede causar daños físicos en las pistas, además de desalineación y desplazamientos mecánicos. Las cargas altas, baja lubricación y contaminación también pueden provocar fallas en rodamientos. Una degradación de rodamiento da lugar a excentricidades estáticas y dinámicas, las cuales perturban las fuerzas magnéticas entre polos adyacentes y aumentan la carga sobre el propio rodamiento, aumentando también las vibraciones. Algunos síntomas comunes en fallas en rodamiento son [1]:

- Vibraciones mecánicas
- Aumento de temperatura
- Disminución del torque promedio
- Cambios en torque y velocidad
- Aumento de pérdidas y disminución de eficiencia
- Asimetría en corriente de línea, flujo de entrehierro y tensiones.

La segunda falla más común en motores de baja tensión, y la primera en motores de alta tensión son las de devanado de estator. El aislamiento es el componente más vulnerable en este, conformado por laminas con diversas capas. La principal falla de estator es el cortocircuito entre espiras. Esta provoca degradación progresiva del devanado, siendo una falla altamente destructiva. Si esta falla no se detecta en una etapa inicial, puede evolucionar a un cortocircuito entre bobinas, un cortocircuito entre fases y una falla fase-tierra.

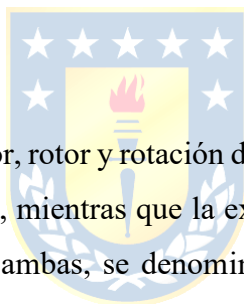
El fallo de aislamiento conduce a la quema de aislamiento, al derretimiento localizado del

cobre y daños en el núcleo, si no se detecta en una etapa temprana esta puede evolucionar hacia una falla catastrófica.

Las fallas de menor ocurrencia en baja tensión y segunda más común en motores de alta tensión junto a la falla de rodamiento son las fallas en el rotor. El rotor de un MI está compuesto por barras aisladas dispuestas en las ranuras de rotor. Las tensiones térmicas y mecánicas son las principales causas de falla en rotor, los cuales dañan la estructura del rotor. Pulsaciones en la corriente, velocidad y flujo disperso de fuga son indicadores en fallas de rotor.

La categoría “Otros” incluye fallas de excentricidad entre rotor y estator, esta produce fuerzas radiales desequilibradas, las cuales pueden provocar contacto entre estator y rotor, dañando ambos. Las fuentes de excentricidad incluyen:

- Sección transversal elíptica de estator.
- Desalineación durante la instalación.
- Desalineación entre el eje del motor y carga.
- Cargas desequilibradas.
- Resonancia mecánica.



En un motor ideal, el eje de estator, rotor y rotación de rotor coincide. La excentricidad estática se da cuando se separa el eje del estator, mientras que la excentricidad dinámica se produce cuando se separa el eje del rotor. Si coexisten ambas, se denomina excentricidad mixta. La excentricidad produce roce entre estator y rotor, degradando devanado y la jaula del rotor. Si no se detecta a tiempo, puede provocar fallas severas y colapso del motor.

Además de excentricidad, existen las tensiones térmicas, eléctricas, mecánicas y ambientales. Las tensiones térmicas dañan el aislamiento y lubricación de rodamientos, las eléctricas provocan daños en rodamientos y en aislamiento de estator, las mecánicas desplazamientos de bobinas o contacto rotor-estator. Finalmente, las tensiones ambientales producen fallas por erosión, humedad y contaminación en rodamientos [5].

Para lograr un funcionamiento confiable de los MI dentro de la industria, se emplea la detección y diagnóstico de fallas. Durante mucho tiempo el monitoreo de condición de máquinas eléctricas se basó en pruebas offline y en el monitoreo térmico y de vibraciones. Desde la década de 1980, se han realizado importantes esfuerzos de investigación para desarrollar herramientas de monitoreo eléctrico que prevengan fallas, permitiendo monitoreo remoto a bajo costo [6].

La detección y diagnóstico de máquinas eléctricas busca principalmente evitar los siguientes

eventos [3]:

- 1) Tiempos de inactividad no programados y pérdida de producción e ingresos.
- 2) Fallas catastróficas.
- 3) Condiciones operativas peligrosas que pueden provocar accidentes graves.

Existen variadas formas de detección y diagnóstico de máquinas eléctricas, entre ellas [6]: pruebas de aislamiento y/o eléctricas, análisis de flujo en la zona de entrehierro, análisis de transientes y flujo. Dentro de las pruebas eléctricas, el análisis de firma de corriente, “MCSA” por sus siglas en inglés, es de los más popular, conocido por ser poco invasivo en entornos industriales, de bajo costo y con la posibilidad de un monitoreo remoto (on-line).

Sin embargo, la detección y diagnóstico de fallas mediante análisis eléctrico en máquinas ha visto complicaciones en su implementación en motores alimentados desde VDF, tendencia en los últimos años debido al aumento de eficiencia energética y mecánica, disminuyendo costos de operación [7]. Este trabajo busca utilizar la técnica de MCSA, una de las técnicas de detección y diagnóstico más utilizada en la industria, en motores alimentados por VDFs, donde no se ha llegado a resultados generalizados hasta la fecha.

1.2. Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia, cuyo esquema común se muestra en la Fig 1.2, es un dispositivo electrónico que permite regular velocidad y par de motores de corriente alterna (AC). Su funcionamiento se basa en la modificación de la frecuencia de alimentación suministrada al estator, permitiendo controlar procesos, lograr partidas suaves y mejorar la eficiencia energética del accionamiento [8].

La ecuación (1.1) muestra la relación entre la frecuencia de alimentación y la velocidad de la máquina que utiliza un VDF, donde N_{sinc} es la velocidad síncrona del motor en RPM (velocidad a la que gira el campo magnético de estator), f_e es la frecuencia de alimentación en Hertz y P es el número de polos de la máquina.

No obstante, la velocidad mecánica del rotor (N_r) no es igual a la velocidad sincrónica. El principio de funcionamiento se basa en que el voltaje y la corriente inducidas en las barras de rotor dependen de la velocidad relativa existente entre el rotor y el campo magnético giratorio del estator [8].

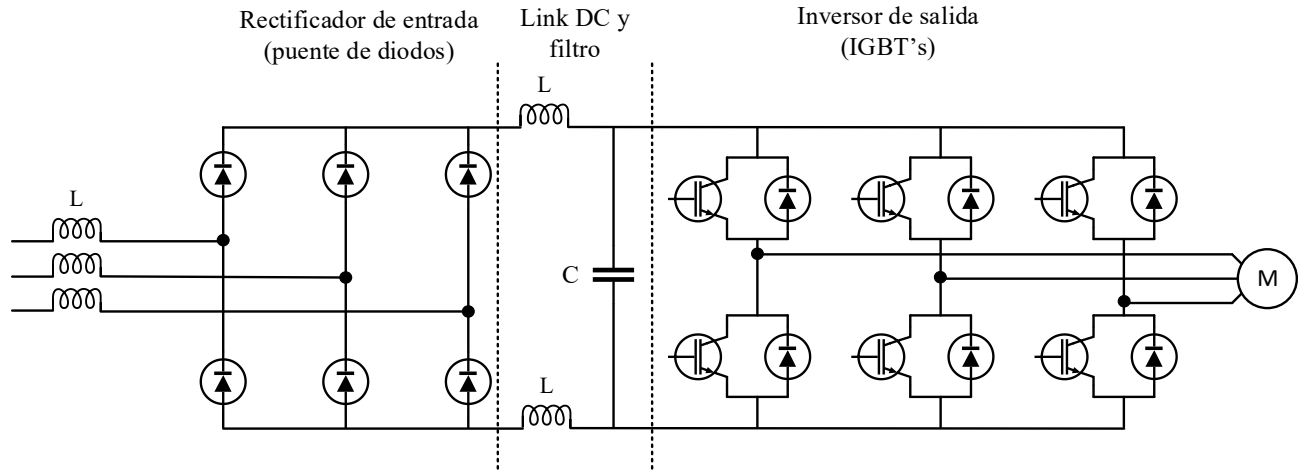


Fig. 1.2 Esquema de Variador de Frecuencia con IGBTs

$$N_{\text{sinc}} = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (1.1)$$

Dado que el comportamiento electromagnético está determinado por esta interacción, se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo. El primero es la velocidad de deslizamiento (N_{slip}), definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$N_{\text{slip}} = N_{\text{sinc}} - N_m \quad (1.2)$$

El otro término para describir el movimiento relativo es el deslizamiento (s) que es la velocidad relativa expresada comúnmente en por unidad o porcentaje:

$$s = \frac{N_{\text{sinc}} - N_m}{N_{\text{sinc}}} = \frac{N_{\text{slip}}}{N_{\text{sinc}}} \quad (1.3)$$

Los VDF generan armónicos en el sistema eléctrico como resultado de la conmutación electrónica (encendido y apagado de interruptores electrónicos), generado por dispositivos semiconductores como IGBT, MOSFET y tiristores. Durante la etapa de rectificación, la forma de onda de voltaje pierde su naturaleza senoidal, generando componentes armónicas. En la etapa inversora, la técnica más empleada de modulación es la modulación de ancho de pulso, PWM, que genera una señal de salida mediante pulsos de alta frecuencia [9]. El nivel de armónicos resultante está

directamente influenciado por la frecuencia de conmutación utilizada, a mayor frecuencia de conmutación, la distorsión de corriente disminuye, pero incrementa las pérdidas por conmutación. Además de esto, el nivel de distorsión armónica está condicionado por el diseño del VDF, siendo mayor en aquellos que no incorporan filtros de entrada o salida, como los LC, en comparación a los que sí los integran.

La búsqueda de la eficiencia energética y sustentabilidad han impulsado el uso de variadores de frecuencia, teniendo la capacidad de reducir el consumo de energía en un 30-40% en edificaciones comerciales equipados con motores eléctricos. La Tabla 1.1 muestra potenciales ahorros económicos y de energía eléctrica al usar variadores de frecuencia en bombas y ventiladores, donde se ajusta la velocidad o par del motor a los requisitos del proceso o carga y se optimiza el consumo de energía y la eficiencia [10].

Tabla 1.1 Potenciales ahorros para variadores de velocidad para bombas y ventiladores [10].

Reducción promedio de velocidad	Ahorro energético potencial	Ahorro anual en costos de energía para un motor de 5 HP	Ahorro anual en costos de energía para un motor de 10 HP
10%	22%	272 USD	543 USD
20%	44%	543 USD	1087 USD
30%	61%	753 USD	1506 USD
40%	73%	901 USD	1806 USD
50%	83%	1025 USD	2050 USD
60%	89%	1099 USD	2198 USD

Estimaciones dentro de la industria mencionan que menos del 20% de los motores eléctricos son controlados por VDFs, estando en el Asia-Pacífico la mayor concentración del mercado dada la alta tecnología y automatización de la industria, mientras que América Latina está experimentando un crecimiento constante impulsado por la industrialización y eficiencia energética, con Brasil México como los países con mayor cuota de mercado, y en términos generales, se visualiza un elevado mercado de expansión debido a la búsqueda de eficiencia energética, industrialización y automatización [11] [12]. Las nuevas tecnologías de velocidad variable como captura de carbono, generación de hidrógeno verde están siendo áreas de crecimiento importante para la implementación de VDF. De forma general, el VDF es común en las siguientes aplicaciones [10]:

- **Sistemas de ventilación:** El uso del VDF es popular dentro de sistemas de ventilación, donde variar la velocidad del ventilador de acuerdo con los requerimientos de la carga puede ahorrar energía de forma importante, desde un 20% según lo especificado en la Tabla 1.1.

- Sistemas de bombeo: Controlar el caudal de válvulas o ajustar la velocidad de bombeo permite ahorros energéticos, mejor rendimiento, fiabilidad y aumento del ciclo de vida (sistemas de bombeo utilizan entre el 25-50% del consumo total de energía eléctrica en instalaciones industriales).
- Ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés): Ajustes de flujo de aire o agua dependiendo de los requerimientos del sistema/carga. Las instalaciones son diseñadas para operar a máxima condición de carga, llegando a este caso en cortos periodos durante el día.
- Sistemas de compresión de aire: Son sistemas que absorben el aire del ambiente y aumentan su presión. Un sistema de compresión de aire con velocidad variable puede ahorrar energía, reducir el mantenimiento, disminuir tiempos de inactividad, aumentar producción, mejorar calidad del producto.

1.3. Trabajos Previos

Esta sección reúne y analiza investigaciones sobre el estado actual de la detección y diagnóstico de máquinas eléctricas, específicamente en motores de inducción jaula ardilla (MIJA). La discusión se estructura en dos ejes, el primero, trabajos basados en operación con alimentación directamente desde la red (sin VDF) donde el MCSA posee métodos ya establecidos dentro de la industria, y el segundo, trabajos que incorporan efecto de VDFs, donde se mencionan los problemas que este trae y posibles soluciones a estos.

1.3.1 Detección de fallas en MI sin VDF – métodos establecidos

♣ **Condition Monitoring of Industrial Electric Machines: State of the Art and Future Challenges [6]**

En este artículo se abordan métodos de monitoreo de máquinas eléctricas, identificando sus fortalezas, debilidades y escenarios donde es factible utilizarlos. Entre ellos se especifican pruebas de aislamiento y electricidad, donde en este último se destaca el uso de MCSA dentro de la industria, identificando las frecuencias características de cada falla, causas de falsos positivos y negativos, mientras que en el análisis de entrehierro y flujo, este último posee una mayor sensibilidad en comparación al MCSA y no está influenciada por defectos de carga. A pesar de estas ventajas, se reconoce como principal limitación del análisis de entrehierro la instalación de sensores dentro de la máquina. También se detalla el análisis de transiente de corriente, flujo o vibración, ya que los

métodos mencionados anteriormente analizan datos en estado estacionario. La investigación de esta técnica ha conducido al desarrollo de dispositivos comerciales que permiten el análisis de transitorios. La técnica ha demostrado ser fiable para detectar defectos de arranque en jaulas de rotor, excentricidad y reactor en el campo, pero faltando una mayor implementación dentro de la industria.

♣ **Condition Monitoring of Three-Phase Induction Motor [13]**

Este trabajo hace una comparativa entre dos métodos ampliamente utilizados en la industria, MCSA y análisis de vibraciones dentro de un setup experimental de un motor de 3 HP con fallas individuales y partida directa. Se analizan fallas de cortocircuito en la bobina de estator, barra rota de rotor (BRB) y fallas de rodamientos. Se extraen las señales de corriente y vibraciones a partir de un osciloscopio y un analizador de vibraciones. Se aplica FFT a las señales obtenidas a través de un algoritmo implementado en MATLAB, donde se comparan las señales obtenidas de motores con falla con señales de un motor sano, se seleccionan los armónicos principales y se analizan (solo los 10 armónicos de mayor amplitud). El uso de MCSA, destaca por ser no intrusiva y económica, pero necesitando un porcentaje de carga no mínimo para detectar falla. Se destaca para detectar fallas de barra de rotor y defectos en rodamiento, no así para fallas de cortocircuito de bobina de estator, donde es requerida aproximadamente un 50% o más de carga y un cortocircuito severo. El análisis de vibraciones destaca para fallas mecánicas y muestra una menor dependencia del nivel de carga en comparación a MCSA, logrando buenos resultados para fallas de rotor y rodamientos, dentro de los casos estudiados no logra identificar la falla de cortocircuito con el análisis de vibraciones. El método propuesto proporciona un algoritmo que destaca por su simplicidad computacional, requiriendo ampliar a fallas simultaneas y a más máquinas para validar su generalización.

♣ **A comparative study dedicated to rotor failure detection in induction motors using MCSA, DWT, and EMD techniques 2020 [14]**

El estudio compara tres métodos para la detección de barras rotas de rotor en MI jaula ardilla: MCSA, transformada discreta wavelet (DWT) y descomposición empírica modal (EMD). Se comparan los tres métodos dentro de un entorno de laboratorio con motor sin carga, deslizamiento igual a 0, y motor con carga del 75%, deslizamiento igual a 3.6%, con perforaciones de 1 y 2 barras de rotor y midiendo la corriente de estator. MCSA no logra detectar la falla el motor sin carga y a bajo deslizamiento, dado que las frecuencias de falla desaparecen, mientras que para el motor con carga

del 75% logra un diagnóstico correcto, visualizándose las bandas laterales. La DWT descompone la señal de corriente en niveles de detalle, siendo estos niveles intervalos de frecuencia analizados y que poseen distintos niveles de sensibilidad. Es capaz de detectar fallas adecuadamente entre los 25-50 y 50-100 Hz, mostrando sensibilidad en condiciones transitorias. El método EMD utiliza el desglose de la corriente en 7 funciones intrínsecas que permiten obtener las frecuencias instantáneas. El método responde correctamente para entornos no estacionarios y posee un mejor contraste que los otros dos métodos. Si bien el método EMD y DWT posee mejores resultados al poseer sensibilidad en estados no estacionarios, poseen una complejidad computacional mayor a MCSA típico a través de FFT. Se debe ampliar la investigación en más entornos para generalizar el uso de EMD y DWT, mientras que el MCSA ya se ha establecido dentro de entornos industriales reales. Si bien el artículo declara tres técnicas distintas: MCSA, DWT y EMD, hay que remarcar que las tres basan su funcionamiento en la firma de corriente, solo que cambia el método de procesamiento de señal.

♣ **Fault Diagnosis of Electric Motors Using Deep Learning Algorithms and Its Applications: A Review 2021 [15]**

Este trabajo menciona y resalta la necesidad que existe dentro de la detección y diagnóstico de fallas en motores eléctricos, donde se requiere la extracción manual de información y características (dominio de tiempo, frecuencia), lo que introduce complejidad en la aplicación. Los algoritmos de aprendizaje profundo extraen características de manera más rápida y automática, mejorando la precisión del diagnóstico. El trabajo presenta distintos métodos de aprendizaje profundo como redes neuronales profundas, red convolucional y red neuronal recurrente. El trabajo es una revisión de trabajos previos y artículos de otros autores, donde se comparan resultados y enfoques utilizados. Las redes neuronales profundas y redes recurrentes obtuvieron altas tasas de precisión, mayores al 90% en la clasificación de fallas en mayoría de estudios. Estos métodos son capaces de extraer características de una manera más eficaz dependiendo en el contexto que se utilice; son capaces de reducir complejidad computacional y manejar grandes volúmenes de datos. Estos métodos a pesar de ser efectivos y utilizados, su entrenamiento es lento y requiere de información precisa, generalización de motores y condiciones operativas. El aprendizaje profundo ha mejorado, pero su implementación en entornos industriales aun requiere de investigación.

♣ **A Histogram of Oriented Gradients Approach for Detecting Broken Bars in Squirrel-Cage Induction Motors 2020 [16]**

El artículo propone un método innovador para la detección de barras rotas en rotores de motores de inducción mediante el uso del Histograma de Gradientes Orientados (HOG), una técnica tradicionalmente empleada para la detección de objetos dentro de imágenes. En este contexto, el HOG se adapta para analizar señales de corriente del estator en el dominio del tiempo, identificando cambios en la pendiente y asimetrías en la forma de onda que son características de fallas en las barras del rotor. Este enfoque supera una limitación de los métodos convencionales como el MCSA, ya que permite detectar fallas incluso en condiciones de bajo deslizamiento (menos del 1%), donde las técnicas basadas en análisis espectral suelen fallar. Además, el método reduce significativamente el tiempo de adquisición de datos (de 100 segundos a menos de 10 segundos).

La clasificación de fallas se realiza mediante una red neuronal multicapa (MLP) entrenada con datos de motores sanos y fallados, lo que elimina subjetividad y proporciona diagnósticos consistentes. Las pruebas experimentales, realizadas bajo diversas condiciones de carga, incluyendo escenarios oscilantes similares a entornos industriales reales demostraron una precisión del 96.5%. Sin embargo, el método requiere un cuidadoso preprocesamiento de la señal, incluyendo un filtrado pasa-bajos para eliminar ruido de alta frecuencia, y presenta un compromiso entre la precisión del diagnóstico y el costo computacional, particularmente en la selección de parámetros como el tamaño de la ventana de tiempo y los intervalos de ángulo del HOG. Futuras investigaciones podrían enfocarse en optimizar estos parámetros para implementaciones en tiempo real.

1.3.2 **Detección de fallas en MI con VDF – desafíos**

♣ **Robust Detection of Incipient Faults in VSI-Fed Induction Motors Using Quality Control Charts [17]**

En este trabajo se aborda el desafío de diagnosticar fallos incipientes en MI alimentados por inversores fuente voltaje (VSI), donde métodos basados en aprendizaje supervisado presentan limitaciones debido a sensibilidad a variaciones en la fuente de alimentación. Se realizan pruebas en dos MI, uno de 0.75 kW y otro de 1.1 kW. Se propone combinar el procesamiento de señales como la transformada rápida de Fourier (FFT) con estadística robusta y gráficos de control multivariable, denominado “control de calidad”, de tal forma de detectar anomalías sin necesidad de datos de entrenamientos y siendo una solución universal para todo inversor. La metodología de trabajo es

extrayendo firmas de corriente, posteriormente se procesa mediante FFT con ventana Hanning y finalmente se aplica un “control de calidad”, se utiliza un estimador llamado Minimum Covariance Determinant (MCD), y se utilizan gráficos de control de Hotelling. Se reconoce la dificultad de aplicar MCSA con la presencia de inversores debido a ruido, armónicos y frecuencias variables, al ser combinado con control de calidad multivariable se obtiene una efectividad en promedio de 95% en la detección de barras rotas, en comparación a sin combinar control de calidad donde se obtiene una efectividad del 65%. En comparación a algoritmos de aprendizaje supervisado, este no requiere datos previos del motor en condición de falla. La técnica propuesta es capaz de detectar fallas, posee baja tasa de falsos positivos y posee consistencias entre distintas frecuencias de alimentación, el trabajo menciona la necesidad de expandir la investigación para mejorar la capacidad de adaptación a sistemas reales.

♣ **Research into the Possibilities for Diagnosis of Asynchronous Electric Drives Powered by a Frequency Inverter in the Presence of Unbalance 2020 [18]**

El artículo aborda la detección de desbalances a través de MCSA y un estándar para calcular las bandas de excentricidad dinámica. Se realizan pruebas en un entorno experimental, motor de inducción trifásico jaula ardilla (MIJA) alimentado desde un VDF. La corriente de estator se adquiere con un DAQ de National Instruments y se procesa por FFT. Se realizan pruebas con 62% de carga nominal, carga en vacío, distintas frecuencias de alimentación y un desbalance de 20 gramos adicionales a 60 mm del eje, se realizan solo mediciones de corriente de estator, estas se realizan primero para el MIJA sano y después para el MIJA con desbalance. Se utiliza el método del estándar ISO 20958 para determinar las componentes de frecuencia para indicar presencia de excentricidad. Para cada banda prevista, la amplitud con desbalance supera a la del motor sano en ≥ 5 dB, umbral que se adopta como criterio de fallo. Los resultados muestran una distorsión de la señal debido al PWM, pero aun así se observan picos de frecuencia de falla. En cuanto a la sensibilidad, el desbalance es capaz de diagnosticarse con y sin carga, a diferencia de otro tipo de fallas que requieren un nivel de carga (barras de rotor rota según literatura). Para aplicar el método de manera precisa, es necesario una planificación, de tal forma de conocer el estado inicial del motor, siendo más efectiva en accionamientos recién instalados o después de una reparación. Las bandas de excentricidad dinámica se emplean como indicadores de desbalance, pero no implica que estos sean equivalentes.

♣ **Broken Rotor Bar Detection in Closed Loop Inverted Fed Induction Motors Through Time-Frequency Techniques. 2024 [19]**

Este artículo aborda el diagnóstico de barras rotas en motores con control PID de velocidad mediante técnicas avanzadas de tiempo-frecuencia como la Transformada Dragón y el algoritmo Min-Norm (STMN), demostrando su superioridad frente al análisis FFT tradicional que resulta ineficaz en lazo cerrado (con tasas de detección inferiores al 50%). Las pruebas se realizan en un set experimental de un MI de 2.2kW con barra rota, VDF Danfoss comercial, encoder incremental y un banco de carga. El estudio revela que el control PID rápido genera ruido y fugas espectrales que enmascaran las bandas laterales características, mientras que el control lento permite mejor detección. La STMN emerge como la técnica más robusta, logrando un incremento de 35 dB en la amplitud de las frecuencias de falla y detectando múltiples bandas incluso en condiciones dinámicas, sin requerir medición de velocidad adicional, lo que la posiciona como solución ideal para aplicaciones industriales con operación en lazo cerrado. Si bien el artículo menciona las ventajas de estas técnicas, solo se limita a un tipo de motor e inversor, se debe validar con más configuraciones y entregar métricas de falsos positivos/sensibilidad. Este artículo es bastante reciente, por lo que faltan mayores validaciones con más marcas de inversores, motores y expandir a otro tipo de fallas.

♣ **Mono-Dimensional Demodulation Techniques for Diagnosing Broken Rotor Bars Faults Within Inverted-Fed Induction Machine at Low Load Operation Condition [20]**

Este artículo se centra en la detección y diagnóstico de fallas en barras rotas de rotor en motores alimentados por inversores en condiciones de baja carga. Analiza métodos como la Transformada de Hilbert, Demodulación de Amplitud Sincrónica, Operador de Energía Teager-Kaiser (TKEO) y Demodulación de amplitud mediante detección de picos, todos estos métodos se comparan con MCSA tradicional. Se evaluaron los métodos para un MI de 4 kW sano y con barras rotas, con el inversor operando a 25, 40 y 50 Hz. Los métodos de demodulación mono dimensional obtuvieron mejores resultados para las tres frecuencias estudiadas, en comparación al MCSA tradicional, donde para obtener mejores resultados es necesario aumentar el deslizamiento provocando posibles sobrecargas en el motor. Cada uno de los métodos presentados mostró superioridad a MCSA para la detección de barras rotas en condición de baja carga, son capaces de eliminar el ruido del inversor y requieren la toma de una sola señal de corriente de estator. MCSA pierde efectividad a medida que se baja la frecuencia de alimentación. No se discute su implementación ni viabilidad en un entorno industrial, donde existe ruido y variaciones de carga, la validación de los resultados solo se basa en lo obtenido

en el setup experimental. no se mencionan fabricantes de los componentes usados, tampoco se menciona la complejidad computacional de cada método, solo se nombra que el TKEO es simple computacionalmente.

♣ **Machine Learning for Inverter-Fed Motors Monitoring and Fault Detection: An overview 2024 [21]**

El artículo se centra en el aumento de la complejidad del diagnóstico en motores alimentados desde variadores de frecuencia, dificultando la modelación matemática/física y distorsionándose las firmas de falla. Se propone el aprendizaje automático y profundo, capaces de aprender directamente de los datos, evitando la modelación matemática y física. Estos métodos se prueban en un setup experimental de dos motores acoplados, realizando mediciones directas de corriente, velocidad y temperatura, centrándose en el diagnóstico de degradación de aislamiento y aumento de temperatura. Se definen modelos para aprendizaje automático, MLP y SVR y también para aprendizaje profundo, CNN y LSTM. Se analiza señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, en este último se extraen características basadas en los armónicos ($h = 6n \pm 1$) y en las impedancias de secuencia directa/inversa, aportando robustez al ruido. Las señales en el dominio del tiempo permiten evaluar señales en estados transitorios, mientras que el análisis de FFT brinda descripciones más robustas frente al ruido, pero requiere de régimen estacionario. Para el análisis en el dominio del tiempo los modelos de aprendizaje profundo CNN y LSTM ofrecen mejores resultados, siendo capaces de analizar estado estacionario y destacando en la estimación de temperatura, mientras que para el dominio de la frecuencia son los de aprendizaje automático, MLP y SVR. El artículo muestra buenos resultados para el entorno experimental planteado, pero destaca la línea de investigación para el diagnóstico de otro tipo de fallos, como barras de rotor rotas o rodamientos. Además, menciona la necesidad de optimizar los algoritmos, de tal forma de lograr una generalización del algoritmo, ya que dependen en gran medida de las condiciones operativas (resultados provienen de un único setup experimental).

1.3.3 Discusión

MCSA es de los métodos más frecuentes dentro de la literatura e industria para la detección de barras rotas, junto al análisis de vibración, siendo el primero el más destacado debido a ser poco intrusivo y permitir un control remoto, esto se considera una ventaja ya que no requiere la instalación de sensores de vibración o flujo además de cables, requiriendo una inversión inicial y posibles

problemas de fiabilidad en instalaciones con gran flota de motores [21], [22].

El método se basa en el procesamiento de la corriente del estator (I_s), generalmente aplicando FFT para su análisis en el dominio de la frecuencia y ver magnitudes asociadas a fallo. Posee capacidad de diagnóstico en estado estacionario, no así, posee complicaciones en estados transitorios. Cada tipo de falla produce una frecuencia característica diferente [23], mostrado en la Tabla 1.2.

Actualmente, solo se ha adoptado ampliamente la detección de barras rotas de rotor en motores de inducción mediante el análisis de bandas laterales de frecuencia 2 veces el deslizamiento, como lo mostrado en la Fig 1.3, las fallas que generan bandas laterales en la frecuencia de rotación de rotor son:

- Desequilibrios de carga
- Desalineaciones mecánicas

Para fallas como las mencionadas anteriormente, como defectos mecánicos, el análisis de vibraciones se considera más fiable. La dificultad de MCSA para aplicarse en fallas mecánicas se debe a que la magnitud de los componentes de frecuencia asociados a una falla depende del diseño de la maquina y las condiciones de operación, siendo difícil establecer un umbral universal de falla [23].

Tabla 1.2 Frecuencias características de falla producidas por fallas en motores de inducción

Falla (componente)	Frecuencia Característica de Falla
Excentricidad estática	$\left[kR \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n \right] f_s$
Excentricidad dinámica y mixta	$\left[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n \right] f_s$
Barra de rotor rota y anillos externos en Máquina de inducción	$\left[\frac{k}{p} (1-s) \pm s \right] f_s$
Pista exterior de rodamiento	$f_s \pm k \frac{N}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$
Pista interior de rodamiento	$f_s \pm k \frac{N}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$
Elemento rodante de rodamiento (bola)	$f_s \pm k \frac{D_c}{D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)^2 \right]$

f_s : frecuencia fundamental, f_r : frecuencia de rotación del rotor, s : deslizamiento del rotor, p : número de pares de polos, R : número de ranuras de rotor, k : número entero ($k = 1, 2, 3, \dots$), n : orden armónico ($n = 1, 3, 5, \dots$), n_d : orden de excentricidad dinámica, N : número de elementos rodantes, D_b : diámetro de bola de rodamiento, D_c : diámetro de paso de bola, β : ángulo de contacto de bola

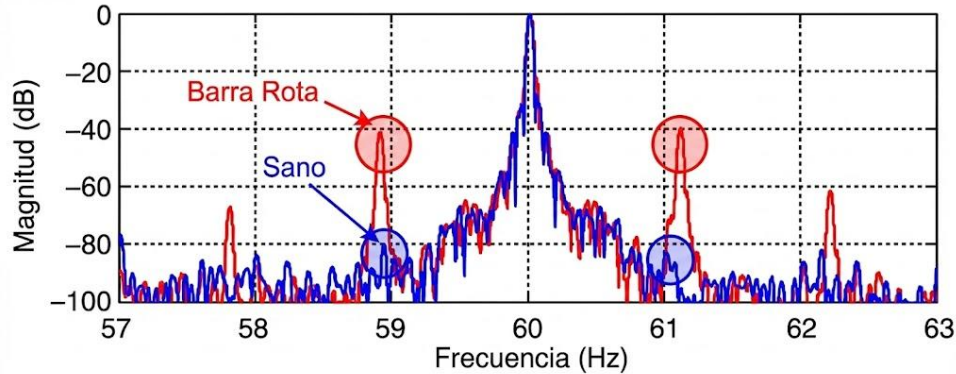


Fig. 1.3 Bandas laterales de frecuencia para motor sano y con barra rota

A pesar de que el MCSA es ampliamente usado, enfrenta problemas de fiabilidad, como lo son falsas alarmas y fallas no detectadas. En el caso de falsas alarmas o falsos positivos esto conlleva llevar el motor a un centro de reparaciones, lo que significa apagar operaciones de producción, desconexión, desmontaje de motor y transporte a un centro de reparación. Todo esto sumado genera grandes pérdidas económicas y puede ser incluso más caro que comprar un motor nuevo. Casos reales demuestran que realizar pruebas con alto deslizamiento (motor detenido o en arranque) reduce los falsos positivos ya que la distribución de flujo *minimiza* la influencia de asimetría del rotor y el efecto de la carga es casi despreciable [3].

La implementación de VDF y la utilización de MCSA ha sido estudiado por varios autores, estudiando distintas técnicas de MCSA principalmente en condiciones de frecuencia constante. Sin embargo, estas técnicas han demostrado ser efectivos en régimen estacionario, no siendo válidas durante la operación normal de un VDF, donde la frecuencia fundamental es variable (régimen transitorio) [24].

El aumento del poder computacional ha permitido potenciar los métodos convencionales de detección y diagnóstico de fallas típicas en MI mediante algoritmos de aprendizaje automático, lo que ha mejorado la precisión y robustez de los diagnósticos. Sin embargo, el principal problema sigue siendo la obtención de conjunto de datos de entrenamiento adecuados, ya que la cantidad y calidad de estos son determinantes para un diagnóstico correcto. Para lograr resultados precisos y hacer predicciones exactas, la cantidad y calidad de datos juega un papel vital [25], si bien se ha implementado en algunas industrias específicas como la eólica, falta expandirlo a más industrias [14].

En virtud de lo anterior, aún existen desafíos en la detección de fallas de rotor en MI alimentadas desde VDF, en condición de frecuencia variable y baja carga. El contenido armónico inducido y la modulación PWM dificultan la identificación clara de frecuencias características de

falla, llevando a falsos positivos o negativos. Se ha demostrado que métodos alternativos a la FFT como Transformada Hilbert permiten mejores resultados en frecuencia variable. Sin embargo, soluciones como Hilbert se han validado solo en laboratorio, mientras que el uso de FFT ya ha sido aplicado dentro de la industria y validado hace muchos años.

Es por ello, que esta memoria busca contribuir al vacío existente abordándolo desde el uso de FFT y MCSA clásico, incorporando ventana Hanning para reducir la fuga espectral y medición precisa de velocidad mediante un encoder incremental, de tal forma de aumentar la sensibilidad del diagnóstico sin comprometer la sensibilidad del algoritmo. Este se valida en un setup experimental con un motor con distintos niveles de carga y falla, y un VDF comercial a través de Hardware-in-the-loop, el cual permite modificar la frecuencia de conmutación, frecuencia de alimentación y velocidad de referencia de forma simple, además de obtener mediciones de corriente y velocidad del motor. Se observa como el cambio de estos parámetros afecta el diagnóstico y la tasa de detección de barras rotas de rotor.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar un algoritmo de análisis basado en la técnica de MCSA (Motor current signature analysis), para la detección y diagnóstico de fallas típicas en el rotor de máquinas de inducción de jaula de ardilla conectadas a variadores de frecuencia, evaluando su sensibilidad y factibilidad de aplicación en un entorno experimental.

1.4.2 Objetivos Específicos

- OE1: Implementar un algoritmo de detección de fallas basado en la técnica industrial MCSA en ambiente computacional, usando frecuencias características de falla encontradas en la literatura técnica.
- OE2: Evaluar el algoritmo en una máquina y variador comercial (Cantoni y Danfoss respectivamente), usando plataforma de hardware-in-the-loop (MicroLabBox) o resultados experimentales directos para la lectura de velocidad y control del motor de inducción.
- OE3: Determinar la sensibilidad y aplicabilidad del algoritmo implementado, estableciendo limitaciones técnicas.

1.5. Alcances y Limitaciones

Los resultados de la detección y diagnóstico de fallas pueden variar significativamente entre distintos modelos de VDF, debido a diferencias en su arquitectura (topología de conmutación, filtros, PWM). Estas variaciones afectan directamente el contenido armónico de la corriente de estator, enmascarando frecuencias características de falla ($f_s(1 \pm 2ks)$). Además, la operación con velocidad variable altera directamente al deslizamiento, dificultando la aplicación directa de MCSA, por lo que es necesario una etapa de filtrado/proceso adicional de señal para garantizar diagnósticos confiables.

Para esta Memoria de Título se cuenta con el set experimental disponible en el L.E.M.E., compuesto por un motor Cantoni (sano, una barra rota y tres barras rotas) y un VDF Danfoss FC302, por lo que el método desarrollado se limita a la detección de barras rotas y no a otro tipo de falla. El VDF utilizado corresponde a un inversor de dos niveles con semiconductores IGBT, rectificador de diodos de seis pulsos en la etapa de entrada y bus DC intermedio con banco de condensadores. La estrategia de modulación utilizada es SVPWM (Space Vector PWM), implementada externamente desde MicroLabBox de dSPACE mediante Simulink, reemplazando el control interno del equipo.

Los resultados de esta memoria son válidos únicamente para la combinación de motor y VDF estudiada, es decir, un VDF de dos niveles, un rango de frecuencias de conmutación de 1 a 10 kHz, alimentación del VDF desde la red (50 Hz), y la utilización de SVPWM como técnica de modulación, tanto en lazo abierto como cerrado. Los resultados no pueden generalizarse a otros equipos sin validación experimental adicional en distintos niveles de potencia, marcas o topologías de inversor.

Capítulo 2. Metodología

2.1. Metodología asociada al OE1

La metodología propuesta para lograr el Objetivo Especifico 1 se muestra en la Fig. 2.1, donde la entrada del algoritmo desarrollado en MATLAB es un archivo de formato txt/csv. Estos formatos son simples y ampliamente compatibles entre aplicaciones, útiles para la adquisición de datos (amperímetros actuales y sistemas de adquisición como osciloscopios y MicroLabBox (MLB) permiten exportar datos en estos formatos). MATLAB permite leer estos formatos de manera directa.

Al trabajar con motores alimentados desde VDF, se requiere una etapa de filtrado/procesado para obtener un diagnóstico robusto, en la literatura se encuentra la transformada de Hilbert, clasificación múltiple de señal (MUSIC), asistencia vía Machine Learning. En este caso se utiliza ventana Hanning, el cual es utilizado en trabajos para mejorar la detectabilidad de MCSA [17] [24], que se define como:

- Ventana Hanning: Función matemática que facilita el procesamiento de señales, usado para evitar discontinuades de la señal (ruido) al principio y al final de los bloques a analizar, permitiendo reducir la fuga espectral de la señal. Matlab trabaja ventana hanning de forma directa a través del comando “hann”.

Posteriormente se aplica la FFT para la conversión de la señal al dominio de la frecuencia, dominio donde la señal es procesada, esta herramienta es ampliamente utilizada debido a su eficiencia computacional en comparación a otros algoritmos como la Transformada Discreta de Fourier. En el contexto de MCSA permite identificar frecuencias asociadas a fallas de manera eficaz para señales en estado estacionario, la Tabla 2.1 muestra las frecuencias características de falla encontradas en la literatura para fallas de rotor.

Finalmente, se obtiene un gráfico en el dominio de la frecuencia en dB normalizados (referenciados a la fundamental). Para la decisión de la detección se utiliza un estimador de severidad establecido en la literatura técnica. Este permite clasificar el estado del rotor (sano, barra rota y múltiples barras rotas) en función del valor N_{av} , que es la diferencia de magnitud entre la banda lateral de falla y la fundamental.

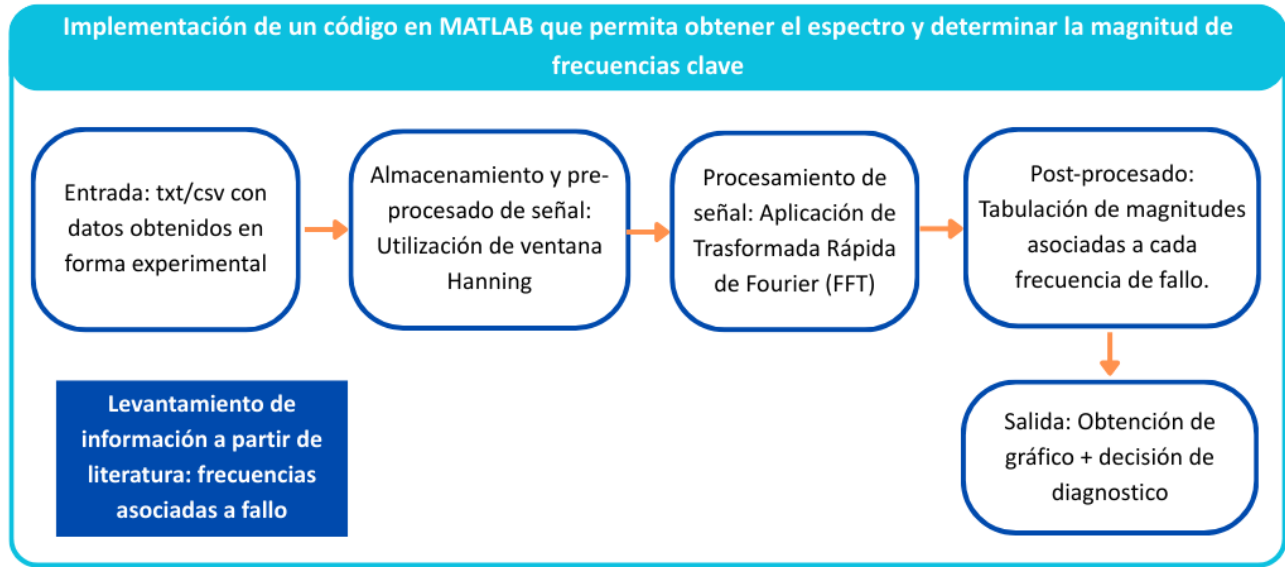


Fig. 2.1 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE1

Tabla 2.1 Frecuencia de falla característica para fallas de rotor en motores de inducción [3]

Falla	Frecuencia característica de falla
Excentricidad estática	$\left[kR \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n \right] f_s$
Excentricidad dinámica y mixta	$[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n] f_s$
Excentricidad mixta	$n f_s \pm k f_r = \left[n \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] f_s$
Barras de rotor rotas y anillos externos	$\left[\frac{k}{p} (1-s) \pm s \right] f_s$

f_s : frecuencia fundamental, f_r : frecuencia rotacional de rotor, s: deslizamiento de rotor, p: número de pares de polos, R: número de ranuras de rotor, k: constante (= 1,2,3, ...), n_d : orden excentricidad dinámica

2.2. Metodología asociada al OE2

La metodología propuesta para cumplir el Objetivo Especifico 2 se muestra en la Fig. 2.2 Esta contempla la evaluación del algoritmo implementado mediante combinación de simulación hardware-in-the-loop y pruebas experimentales directas.

Para ello, se utiliza la plataforma MLB de dSPACE para el desarrollo del esquema de control (vinculado a MATLAB-Simulink) y la adquisición de datos en tiempo real a través de ControlDesk, el software para guardar las mediciones recompiladas por MLB recibidas a través de pinzas

amperimétricas AC y un encoder incremental, los cuales permitirán registrar corriente y velocidad del motor.

Se utiliza un motor Cantoni sano, con una barra rota y tres barras rotas, el cual se muestra en la Fig. 2.3 y cuyos parámetros se muestran en la Tabla 2.2. Para la alimentación del motor, se utiliza el conjunto MicroLabBox y VDF Danfoss FC302 de 22kW, los cuales se muestran en la Fig. 2.4. La alimentación de la carga se realiza mediante un conjunto Active Front End (AFE) Parker AC30V (lado red) y Parker AC30P (lado carga).

Para validar el algoritmo se desarrollan pruebas que evalúan el motor en condiciones saludables y en falla., estas consisten en:

- Variación de velocidad y carga: Se realizan variaciones del 100%, 75%, 50% y 25% de la velocidad sincrónica del motor. Para cada nivel de velocidad, se aplican cinco niveles de carga, desde operación en vacío hasta la carga nominal del motor.
- Variación de frecuencias de conmutación: Se evalúa el impacto de la conmutación del VDF analizando siete frecuencias de conmutación: una frecuencia alta de 10 kHz (máxima permitida por MLB en el modelo realizado), cuatro frecuencias intermedias y una frecuencia baja de 1 kHz, siendo esta la frecuencia de conmutación más baja permitida por el fabricante.
- Control en lazo abierto y lazo cerrado: Se utiliza un lazo de control escalar de velocidad V/f en lazo abierto y en lazo cerrado, implementado en Simulink y ejecutado en tiempo real a través de la interfaz MLB.

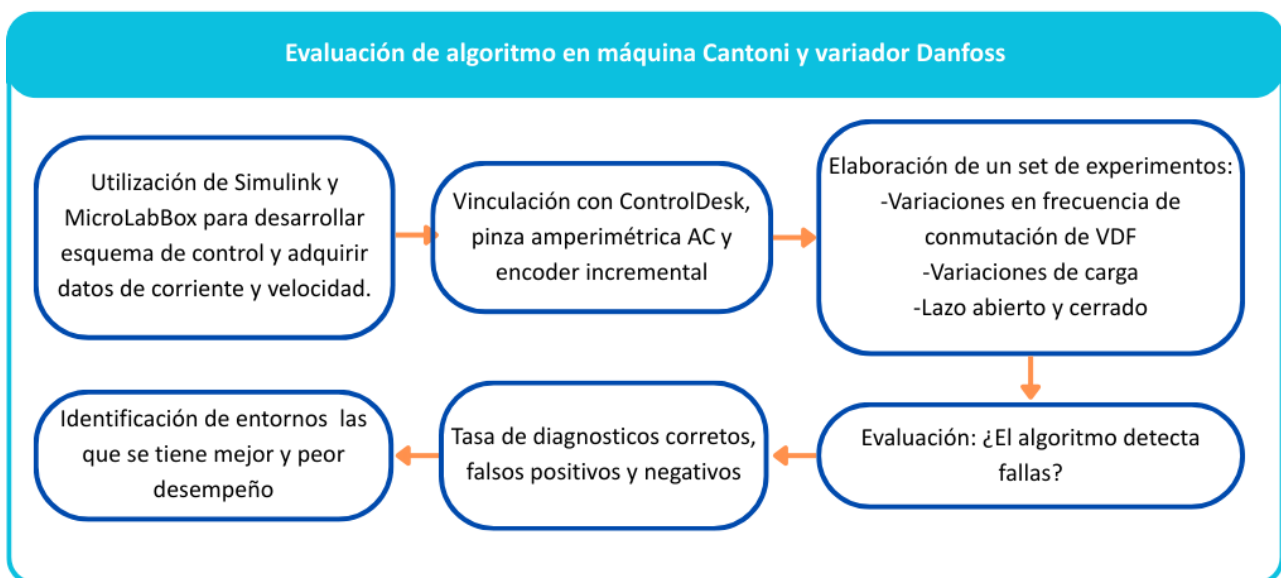


Fig. 2.2 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE2

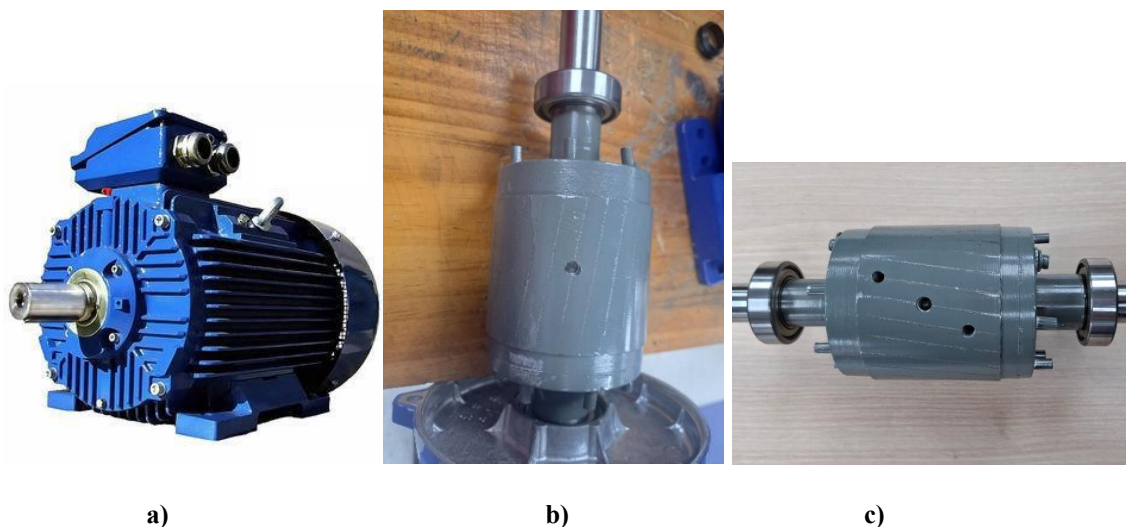


Fig. 2.3 Máquina Cantoni usada para evaluación experimental.

a) Fotografía de máquina completa b) Perforación en una barra de rotor c) Perforación en tres barras de rotor

Tabla 2.2 Datos de placa máquina motor Cantoni

Ítem	Valor	Unidad
Fabricante	Cantoni Motor	-
Modelo	2SIE90S4-N	-
Protección	IP55	-
Año	2012	-
Potencia	1.1	kW
Factor de potencia	0.74	-
Velocidad nominal	1450	RPM
Tensión nominal	220Δ/380Y	V
Corriente nominal	4.8Δ/2.8Y	A
Eficiencia	81.4	%
Torque	7.4	Nm

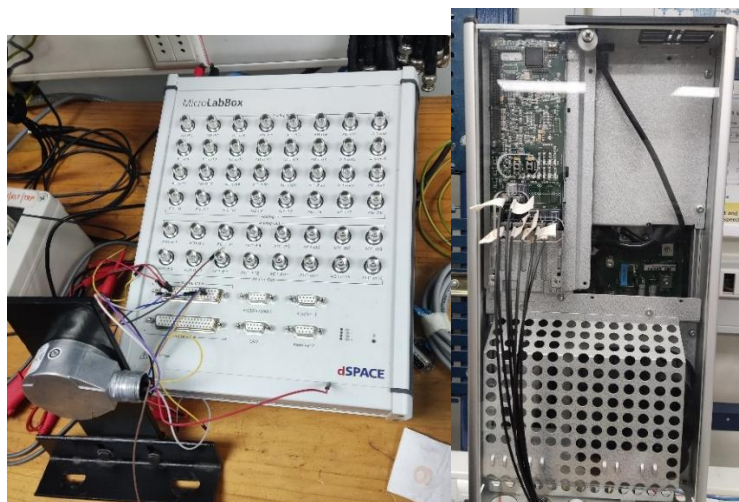


Fig. 2.4 Setup experimental de laboratorio a) MicroLabBox y encoder incremental b) VDF Danfoss FC302

2.3. Metodología asociada al OE3

Se mide la sensibilidad del algoritmo determinando si es capaz o no de detectar fallas de rotor, en qué condiciones de operación y con qué parámetros, como pueden ser el nivel de carga, deslizamiento, velocidad o frecuencia de alimentación y frecuencia de conmutación, además de determinar la tasa de falsos negativos, falsos positivos y diagnósticos correctos.

Parte importante de un buen diagnóstico en la aplicación de MCSA alimentado desde VDF es el manejo del ruido originado por este, el cual varía entre modelo, frecuencia de conmutación, fabricante, presencia de filtros y nivel de potencia. El ruido, presente en entornos industriales, puede llevar a falsos positivos/negativos afectando la sensibilidad del algoritmo, por lo que los efectos de este son mitigados en el pre-procesamiento, a través de Ventana Hanning.

Se evalúa si el algoritmo es capaz de detectar fallas de rotor con una tasa de detección correcta, estableciéndose como meta una precisión mayor al 80%. Esta precisión incluye si el algoritmo es capaz de detectar la falla o no y el tipo de falla, detección de fallas inexistentes (falsos positivos) o la no detección de una falla (falso negativo).

Se realiza una comparación directa de los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos en literatura, evaluando:

- Si los valores de N_{av} se alinean con los rangos establecidos.
- Si las condiciones que afectan la sensibilidad del algoritmo coinciden con la literatura técnica.
- Si el comportamiento del algoritmo es generalizable o depende del entorno experimental.

Se identifican las limitaciones técnicas y económicas del algoritmo propuesto, como es el requerimiento de hardware y sensores existentes dentro de la industria, analizando la viabilidad de implementar el algoritmo en un entorno industrial real.

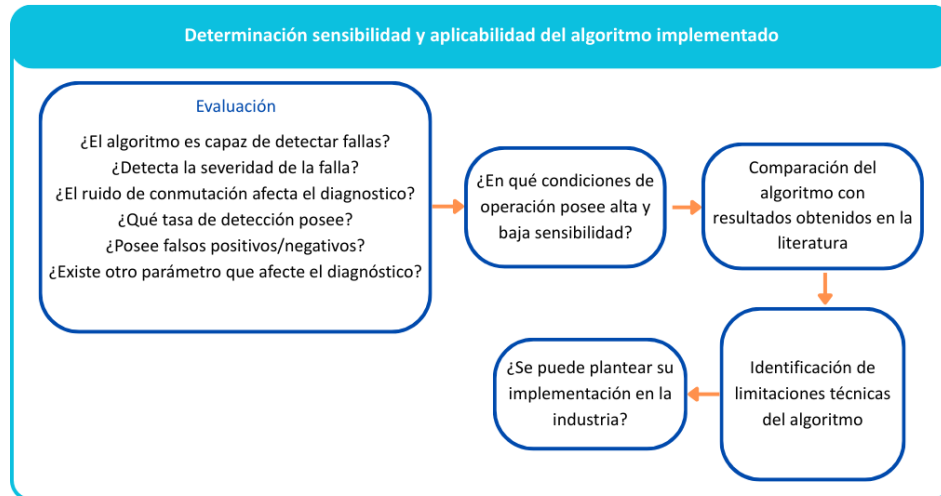


Fig. 2.5 Diagrama de flujo para metodología asociada al OE3



Capítulo 3. Algoritmo implementado

En este capítulo se presentan los fundamentos y teoría del algoritmo implementado para la detección de barras rotas de rotor con mediciones obtenidas de forma experimental con MLB.

3.1. Derivación de bandas laterales de falla

La expresión de bandas laterales se obtiene a partir de [3], donde la frecuencia de corriente de rotor está dada por:

$$f_2 = \frac{(N_s - N_r)p}{60} = \frac{sN_s p}{60} \quad (3.1)$$

con p el número de pares de polos y N_r la velocidad del rotor. Cuando ocurre una asimetría en la jaula del rotor debido a la rotura de una barra de rotor, se genera un campo de rotación inverso, definido como N_{sb} a una velocidad de sN_{sb} en dirección opuesta al campo de rotación directo producido por las corrientes de rotor con respecto a un observador fijo en el motor, tal como se muestra en la Fig 3.1.

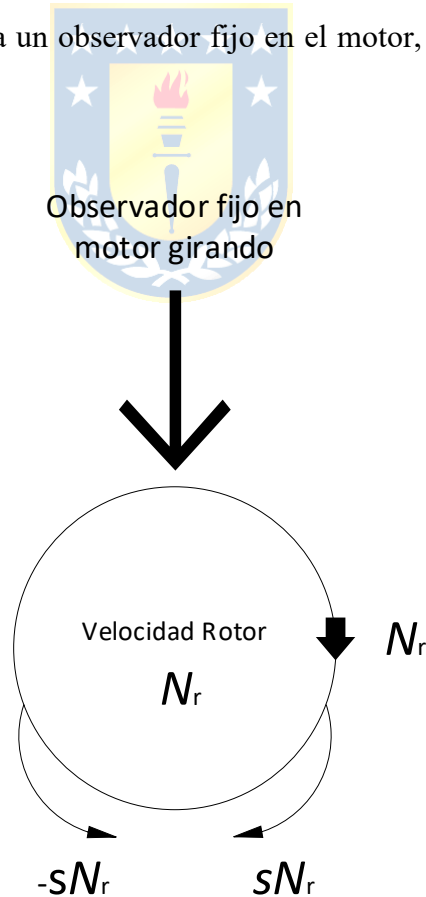


Fig. 3.1 Campos de rotación directo e inverso en presencia de barra rota de rotor

Con respecto al devanado estacionario del estator, la velocidad del campo magnético giratorio inverso debido a la rotura de una barra de rotor viene dada por:

$$N_{sb} = N_r - sN_s \quad y \quad N_{sb} = N_s(1 - s) - sN_s = N_s(1 - 2s) \quad (3.2)$$

El devanado estacionario de estator ve ahora un campo giratorio a igual a la ecuación anterior, en términos de frecuencia ($f_e = N_s p / 60$). El campo giratorio de barra rota de rotor viene dado a una frecuencia dada por:

$$f_{sb} = \frac{(N_s - 2sN_s)p}{60} = \left(\left(\frac{60f_e}{p} \right) - 2s \left(\frac{60f_e}{p} \right) \right) p = f(1 - 2s) [Hz] \quad (3.3)$$

es decir, debido a una barra rota de rotor se produce un campo magnético giratorio a $f(1 - 2s)$, que conecta los devanados de estator e induce una fuerza electromotriz que impulsa una corriente en el estator y por lo tanto, puede detectarse este campo magnético a través del análisis de espectro de corriente de estator del motor. Esta banda se denomina banda lateral de frecuencia de doble deslizamiento por debajo de f , o banda lateral inferior. La variación cíclica de la corriente producida por una barra rota de rotor produce una variación del torque del motor al doble de la frecuencia de deslizamiento que es función de la inercia, apareciendo una nueva componente en $f(1 + 2s)$, siendo esta conocida como banda lateral por sobre f , o banda lateral superior.

Para el algoritmo empleado se analiza la banda lateral inferior, que es la banda de la cual se derivan las dos bandas laterales, es decir, el estado del motor se basa en la magnitud que esta posee, no tomándose en consideración la banda lateral superior.

Para el análisis espectral de las bandas laterales se utiliza escala logarítmica (decibeles), ya que la magnitud de componente de frecuencia de alimentación puede ser entre 20 y 1000 veces mayor que la magnitud de las bandas laterales de falla. El uso de escala lineal dificulta el análisis visual de estas bandas, por lo que se requiere y se aconseja utilizar escala logarítmica.

La magnitud normalizada en decibeles se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Magnitud_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (3.4)$$

donde I_1 es la magnitud de corriente a una frecuencia específica e I_2 la magnitud de corriente de la fundamental, la cual se utiliza como referencia de normalización (0 dB) para utilizar el criterio de falla de Thomson.

Para una detección correcta en un rango amplio de deslizamientos se requiere de una resolución espectral alta, la cual está dada por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{t_{acq}} \quad (3.5)$$

con f_s la frecuencia de muestreo, 10 kHz, t_{acq} el tiempo de adquisición y N el número de muestras, siendo en promedio aproximadamente 200 000, es decir, un tiempo de 20 segundos por muestra. Esto da como resultado una resolución espectral de 0,05 Hz, siendo una excelente resolución y mayor a la mayoría de los trabajos que utilizan MCSA [3], permitiendo la detección de bandas laterales de forma precisa, pero igual con presencia de fuga espectral y la posibilidad de diagnósticos erróneos.

Si se utiliza una resolución espectral de 0,05 Hz, esta solo ve picos de energía en números múltiplos, es decir, en un caso hipotético de deslizamiento bajo en la cual la banda lateral se encuentre en 49,87 Hz, la FFT repartirá la energía de la banda entre los 49,85 Hz y 49,9 Hz.

La utilización de MCSA y la elaboración de un algoritmo para detectar firmas características de corriente de falla ya está ampliamente estudiado y comprobado tanto en entornos experimentales como industriales en motores alimentados directamente desde la red [3] [6] [12] [28]. Sin embargo, en motores alimentados a través de inversores o VDFs las validaciones son parciales, se limitan a niveles de carga, frecuencias de alimentación o velocidades acotadas ni establecen criterios en función de los parámetros del VDF, como la frecuencia de conmutación o el esquema de control utilizado [19].

3.2. Funcionamiento del algoritmo

Para determinar el estado del motor, se utiliza el estimador de severidad de Thomson [3] para barras rotas de rotor, mostrado en la Tabla 3.1.

Establecida la expresión teórica de bandas laterales a utilizar, estimador, frecuencia de muestreo y tiempo de adquisición, se explica el funcionamiento del algoritmo.

Tabla 3.1 Estimador de severidad de barras rotas de rotor [3]

N_{av} = dB (Diferencia)	Interpretación
>55 dB	Bobinado normal
50-55 dB	Asimetría normal del bobinado de jaula
45-50 dB	Rango difícil para diagnosticar. Con N_{av} = 45 dB en motores de 2 a 4 polos puede existir uniones defectuosas o una barra rota. En motores de más polos hay mayor probabilidad de barra rota.
40-45 dB	Con N_{av} = 40 dB en motores de 2 a 4 polos existe alta probabilidad de una a dos barras rotas. A mayor número de polos, crece probabilidad de barras rotas.
35-40 dB	Con N_{av} = 35 dB en un motor de 2 polos existe probabilidad alta de barras rotas. Con N_{av} = 40 dB en motor de 4 polos normalmente hay de 1 a 3 barras rotas. Motor de 36 polos es probable problema grave de barras rotas
30-35 dB	Problema grave de barras rotas. Con N_{av} = 30 dB en un motor de 2 polos indica falla severa de barra rota. En motores de 4 polos o más, normalmente hay múltiples barras rotas.
<30 dB	Existencia de problema muy grave de barras de rotor rotas en cualquier número de polos. Normalmente existen múltiples barras de rotor rotas.

- Preprocesamiento y aplicación de FFT: La primera etapa es adquirir corriente y velocidad del motor, obtenidas a través de una sonda de corriente y encoder incremental respectivamente, estas son leídas y guardadas a través del software ControlDesk en formato txt. Para minimizar la fuga espectral se aplica ventana Hanning sobre la señal de corriente, esta ensancha el rango de frecuencias en que se distribuye la energía de las bandas laterales de falla, facilitando su detección.
- Normalización de la señal de corriente: Para aplicar el estimador de Thomson es necesario normalizar todos los valores de corriente en torno a la fundamental. Para detectar la fundamental se busca el pico de magnitud de la corriente en un rango de 5 a 60 Hz, siendo este rango definido por las frecuencias de operación a utilizar. Una vez encontrada la fundamental se pasa a decibeles normalizados con la ecuación vista anteriormente.

Por otro lado, la lectura de velocidad está acondicionada en Simulink para que entregue su valor en RPM. Utilizando la frecuencia fundamental y el número de polos de la máquina se calcula la velocidad sincrónica del motor, y de esta forma, el deslizamiento

y su porcentaje. Con estos parámetros se calcula la posición teórica de las bandas laterales derecha e izquierda $f_{sb} = f(1 \pm 2s)$.

- Búsqueda de bandas laterales de falla: Debido a la dispersión espectral propia de la FFT y resolución espectral, el algoritmo implementa un rango de búsqueda de máximo local acotado en torno a las bandas laterales teóricas dependiendo del valor de la fundamental, de tal forma de detectar los picos reales de magnitud de falla.
- Diagnóstico de severidad y gráfico: Posterior a el cálculo de parámetros, el algoritmo evalúa la máxima magnitud de la banda lateral izquierda encontrada (real) y se compara la diferencia de amplitud que esta posee con la fundamental, de tal forma de evaluar el estado del motor según el estimador de Thomson. Finalmente se obtiene como resultado un gráfico que muestra el espectro de corriente, deslizamiento, magnitud de la banda lateral izquierda, fundamental y diagnóstico del motor, tal como lo muestra la Fig 3.2.

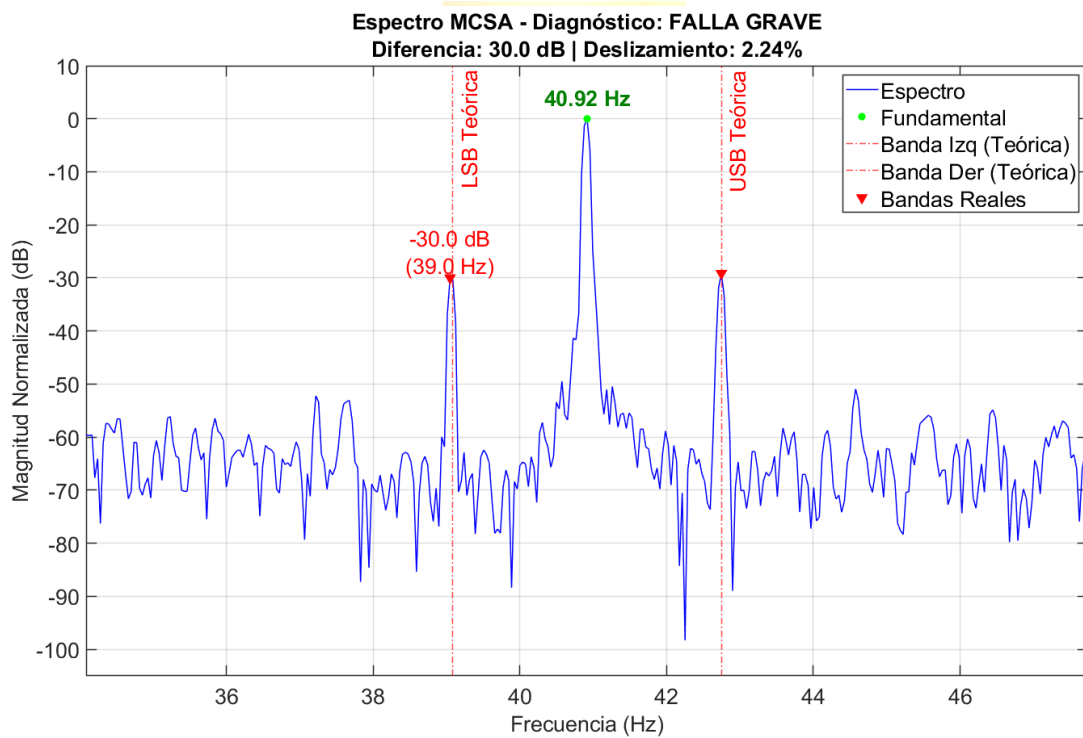


Fig. 3.2 Visualización de algoritmo - lazo cerrado - motor 3 BRB

Capítulo 4. Desarrollo de control de MI en MicroLabBox

En este capítulo se muestra el diseño e implementación del lazo de control básico para el MIJA estudiado, incluyendo su implementación en la plataforma de tiempo real Hardware-in-the-loop (HITL) en el entorno dSPACE MicroLabBox.

4.1. Vinculación MLB - Simulink – ControlDesk

Primero se desarrolla y valida un esquema de control escalar V/f constante en el entorno simulación Simulink, utilizando los parámetros del circuito equivalente del motor para asegurar precisión en los resultados. Una vez comprobado el funcionamiento en simulación, se implementa y vincula su funcionamiento en la plataforma MicroLabBox mediante bloques dedicados de la librería dSPACE para Simulink, mostrados en la Fig 4.1. Adicionalmente, se desarrolla una interfaz en ControlDesk que permite el monitoreo en tiempo real de corriente y velocidad, además de permitir el cambio de parámetros de interés, como el encendido y apagado del motor, la velocidad de referencia, la frecuencia de alimentación y la frecuencia de conmutación, mostrada en la Fig 4.2. Desde ControlDesk se exportan los archivos de corriente y velocidad para su posterior procesamiento en el algoritmo desarrollado.

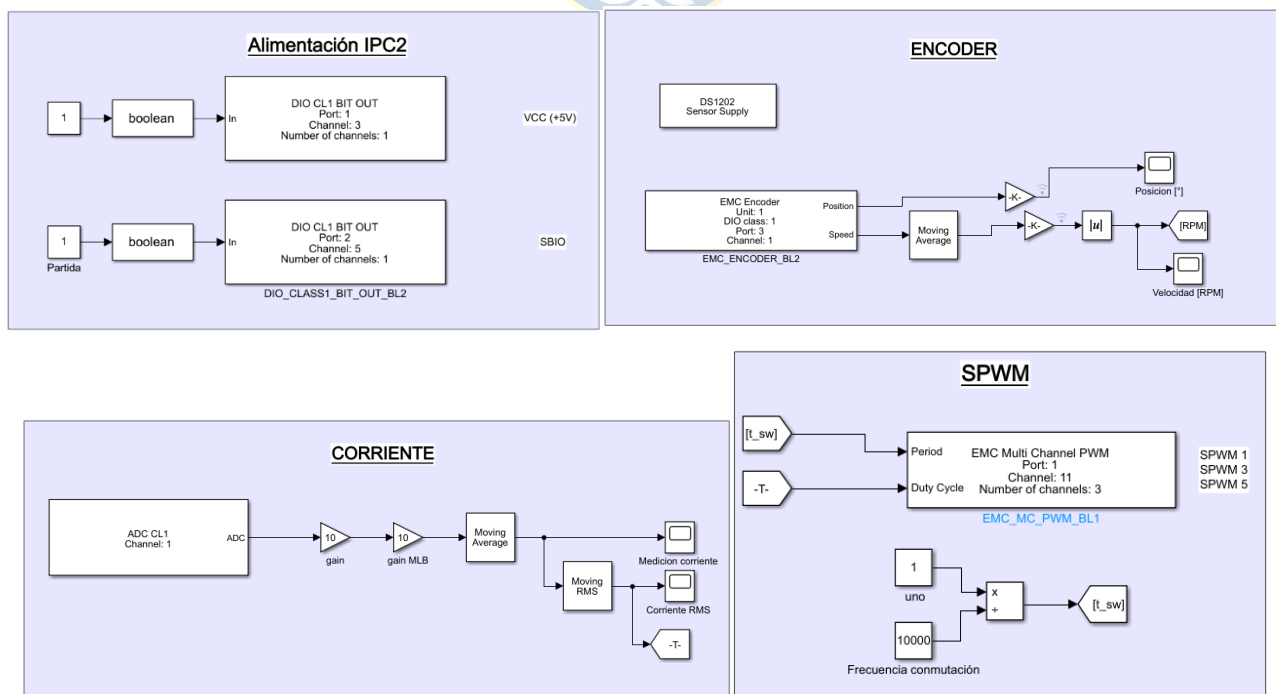


Fig. 4.1 Bloques utilizados Librería dSPACE

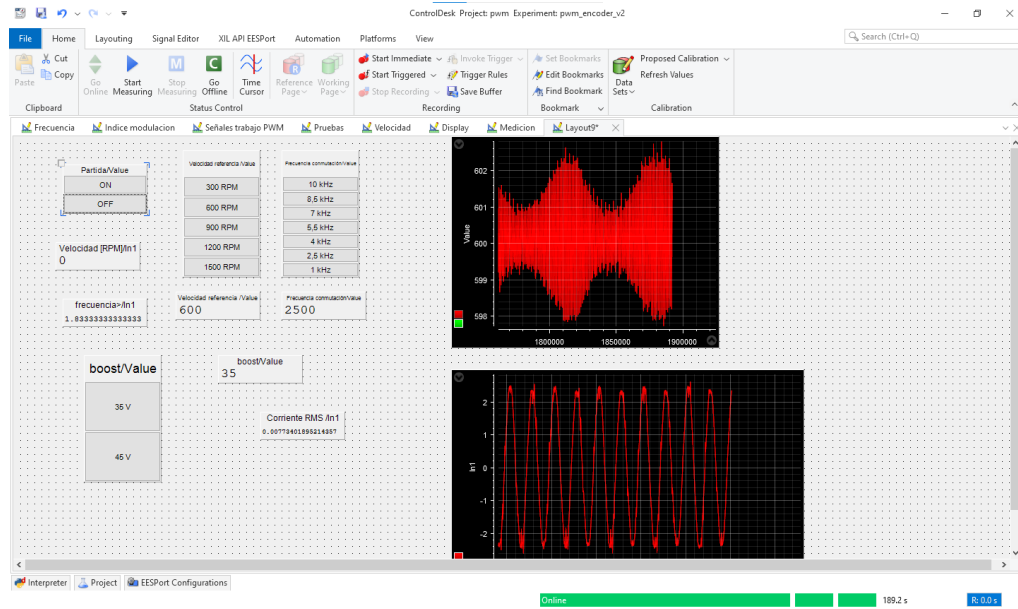


Fig. 4.2 Interfaz ControlDesk

La adquisición de velocidad del motor es un requisito tanto para la estimación correcta de deslizamiento (s) en el algoritmo de MCSA como para el cierre del lazo de control de velocidad (V/f lazo cerrado). Esta se obtiene a través de un encoder incremental de 1024 pulsos acoplado al eje trasero del motor sano (lado ventilación). Para obtener una medición precisa y sin oscilaciones mecánicas, se diseñó un cableado de 1,5 metros y un acople rígido de laminación de algodón (Durocoton[®]) fabricada en el Laboratorio de Diseño y Construcción de Máquinas Eléctricas, mostrado en la Fig 4.3 y cuyo mapeo de pines se muestra en la Fig A.1. Este permite una medición correcta de velocidad y libre de vibraciones mecánicas que puedan inducir en lecturas erróneas de velocidad.



Fig. 4.3 Encoder incremental con acople de DUROCOTON[®] y conector ensamblado

4.2. Control desarrollado

El control escalar V/f en lazo abierto y lazo cerrado permite variar la velocidad de motores de inducción a través de la frecuencia de alimentación. Es destacado por su estructura sencilla, bajo costo y un error en estado estacionario bajo, además de poseer una corriente de partida baja. A diferencia de otros esquemas de control, no requiere de los parámetros eléctricos de la máquina a accionar. Es seleccionada en aplicaciones de torque y velocidad variable. El principio de este control es mantener una relación constante entre tensión y frecuencia de alimentación, lo que mantiene el flujo magnético de entrehierro constante y cercano al nominal, lo que permite mantener la capacidad de par sin provocar saturación del núcleo magnético. La relación entre voltaje y frecuencia se puede expresar como [29]:

$$\psi_m \cong \frac{V_p}{f} \cong K_v \quad (4.1)$$

donde ψ_m es el flujo máximo de entrehierro, V_p es el máximo voltaje de fase (380 V) y K_v es la relación entre el voltaje máximo y la frecuencia de alimentación.

Sin embargo, esta relación presenta limitaciones a bajas frecuencias, donde existe una caída de tensión en el estator dominante frente a la fuerza contraelectromotriz, reduciendo el flujo magnético, por ello se requiere de compensación de voltaje (V_{boost}) para mantener el par. Por otro lado, si se sigue la relación en escenarios con una frecuencia superior a la nominal, el motor sufriría de sobretensión y una operación en debilitamiento de campo, disminuyendo la capacidad de torque del motor. Es por ello que en operaciones con una velocidad y frecuencia superior a la nominal el voltaje se mantiene constante, siguiendo la siguiente ecuación:

$$V_{LL} = \begin{cases} (V_{LLnom} - V_{boost}) \frac{f_e}{f_{nom}} & \text{para } f_e \leq f_{nom} \\ V_{LLnom} & \text{para } f_e > f_{nom} \end{cases} \quad (4.2)$$

siendo V_{LLnom} el voltaje línea-línea nominal del motor, f_{nom} la frecuencia nominal, 50 Hz, y f_e la frecuencia a la que se alimenta el motor. Las referencias de voltaje calculadas por el algoritmo deben acondicionarse para ser leídas por los bloques de Simulink de la librería de MLB, es por esto que se normalizan respecto del voltaje del Bus DC medido del VDF Danfoss, generando ciclos de trabajo en el rango de [0, 1], siendo estos valores la representación de la fracción del periodo de conmutación

durante los interruptores de potencia del VDF permanecen encendidos, siendo 1 totalmente prendido y 0 totalmente apagado.

Como estrategia de modulación se utiliza Modulación por Ancho de Pulso de Vector Especial (SVPWM). A diferencia del PWM sinusoidal tradicional (SPWM), este permite una mayor utilización del Bus DC (aproximadamente 85%) a través de la inyección y cancelación de tercer armónico en motores trifásicos. Además de una mayor eficiencia, posee un buen desempeño para distintos tipos de carga (baja carga, vacío, lineales, no lineales) y una menor Distorsión Armónica Total (THD) de la corriente en comparación al SPWM [30].

4.2.1 Control V/f lazo abierto

EL esquema del control desarrollado se muestra en la Fig. 4.4. En este caso se fija como entrada una velocidad sincrónica de referencia estableciendo una frecuencia de alimentación fija, a partir de esta frecuencia se establecen los ciclos de trabajo y señales PWM de alimentación del motor.

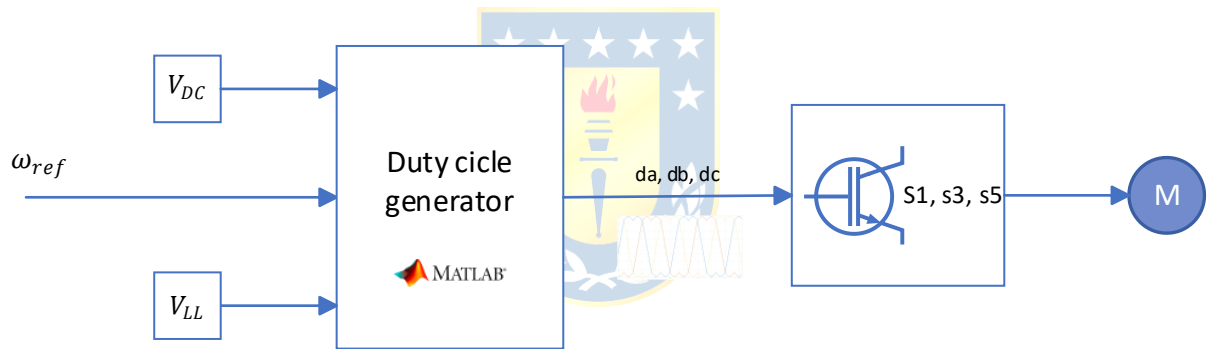


Fig. 4.4 Esquema de control en lazo abierto

Donde V_{DC} es el voltaje del enlace DC del VDF utilizado, 580 V aproximadamente (medido) y d_a , d_b y d_c son los ciclos de trabajo de la rama superior de los IGBT, s1, s3, s5 respectivamente. La tarjeta de disparo y protección utilizada en el VDF genera de forma interna los ciclos de trabajo de la rama inferior de los IGBT con un tiempo muerto configurable, siendo el que viene por defecto el más bajo y el utilizado, 2 μ s. No se implementa una compensación de tiempo muerto dentro del control. El bloque “Duty cycle generator” es una función creada en Simulink que crea los ciclos de trabajo a partir de la frecuencia, V_{DC} y V_{LL} . En lazo abierto las señales de trabajo se mantienen constante durante todo el periodo de operación, dada que la frecuencia no posee variación, las señales de voltaje son constantes y correspondientes a la frecuencia de alimentación seleccionada.

4.2.2 Control V/f lazo cerrado

La Fig 4.5 muestra el esquema del control en lazo cerrado. A diferencia del caso anterior, en lazo cerrado se fija una velocidad de referencia en RPM la cual se mantiene por todo el periodo de operación. Para esto se utiliza un controlador PI con retroalimentación de velocidad, n_r , provista por el encoder incremental acoplado al motor, para luego pasar esta velocidad a frecuencia eléctrica utilizando la ecuación (1.1). Se utiliza el mismo bloque “Duty Cycle Generator” que en lazo abierto, con la diferencia que la frecuencia varía constantemente para mantener la velocidad de referencia deseada, lo que conlleva una variación constante de la señal de voltaje PWM.

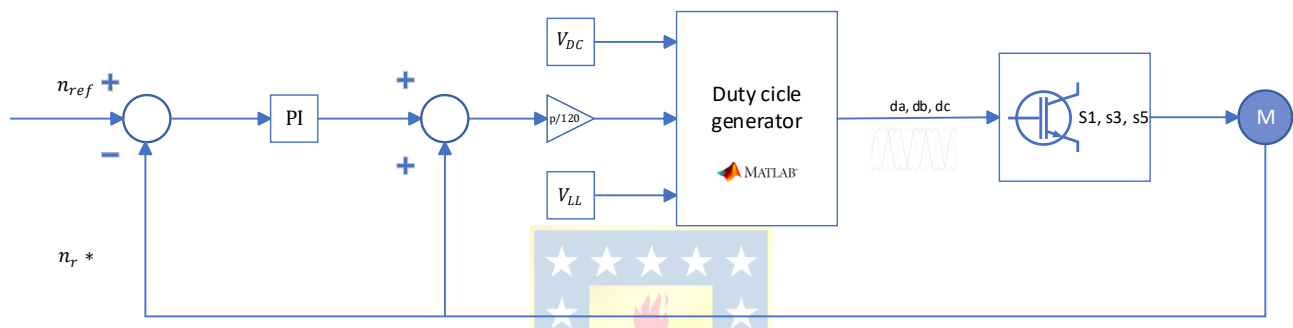


Fig. 4.5 Esquema de control en lazo cerrado

La Fig 4.6 muestra una prueba del comportamiento en vacío del lazo de control para las distintas velocidades de referencia a evaluar. Los primeros cambios de velocidad van en forma decreciente desde los 1500 RPM hasta 300 RPM, para luego hacer incrementos de 600 RPM hasta llegar a la velocidad sincrónica y luego hacer nuevamente una bajada de velocidad hasta los 300 RPM. La frecuencia máxima configurada es de 55 Hz de tal manera de no llegar a velocidades que puedan dañar mecánica y eléctricamente al motor, además de lograr sobrellevar cargas no mayores a velocidades cercanas a la sincrónica.

El mayor sobrepaso de velocidad se logra de los 300 RPM a 900 RPM superando por 376 RPM la velocidad de referencia por aproximadamente 1,5 segundos y finalmente estabilizándose en la velocidad de referencia a los 2 segundos del cambio de velocidad de referencia. El tiempo y velocidad de sobrepaso queda sujeto totalmente a la inercia y nivel de carga que se le aplique al motor, siendo a plena carga en el que se logra un menor sobrepaso y tiempo para llegar a estado estacionario.

El lazo de control utilizado posee un K_p igual a 1, K_i igual a 10 y una constante de tiempo de integración T_i de 0,1 s. Estos parámetros lo sitúan como un control con respuesta sobreamortiguado y

estable, pudiéndose considerar con una dinámica “lenta”. Esta condición favorece el diagnóstico según lo establecido en [19], donde comparan la tasa de detección en MCSA con un control considerado “rápido”, el cual es subamortiguado y otro “lento” que es sobreamortiguado. Este último con mejores resultados dado que no enmascara las bandas laterales de falla, lo que si ocurre con el control rápido debido a la supresión de oscilaciones de velocidad de forma rápida.

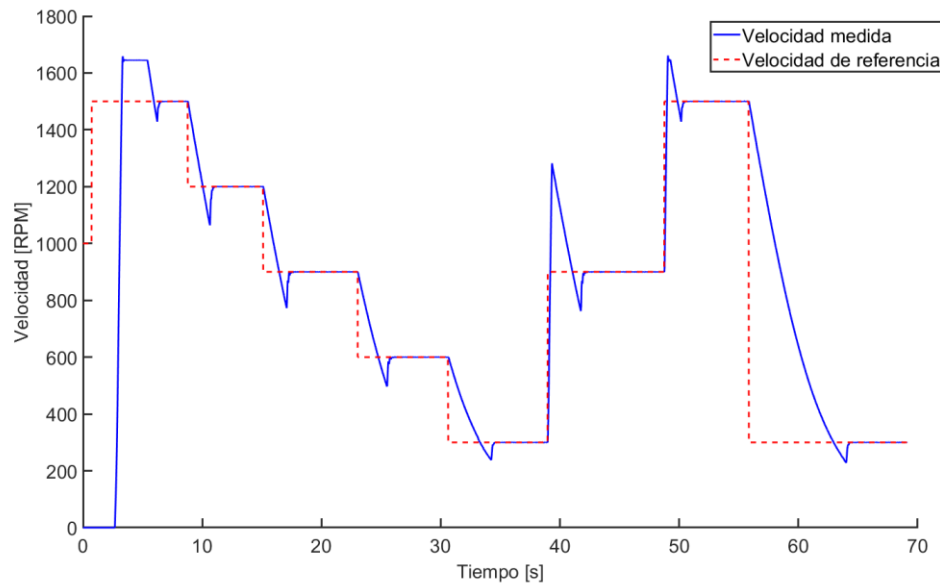


Fig. 4.6 Comportamiento en vacío de lazo de control cerrado

4.3. Hardware in the loop

La técnica de simulación hardware in the loop (HITL) permite la simulación en tiempo real de un objetivo de control complejo, así como la integración gradual con un sistema objetivo desarrollado. Como resultado los tiempos de desarrollo y costes se reducen, es por eso que su uso se ha generalizado en el desarrollo de nuevas aplicaciones en motores eléctricos, como convertidores, máquinas eléctricas y control. HITL requiere de programación, donde generalmente se utilizan microcontroladores, matrices de puerta programable en campo (FPGA) y procesadores de señales digitales (DSP). Ambos requieren de programación manual compleja y con altos tiempos de cálculo y procesamiento de señales. Una alternativa es utilizar FPGA y DSP disponibles en el mercado, que permiten vinculación con software de simulación comercial. MicroLabBox de dSPACE es un FPGA que permite la vinculación mediante Matlab-Simulink, el cual permite reducir tiempos de desarrollo, verificación y simplificar la etapa de programación. Si bien es inferior a placas de control personalizadas de mayor precio, es adecuado para aplicaciones de desarrollo y verificación rápida [33].

La Fig 4.7 muestra las dos configuraciones posibles para aplicar HITL a través de MLB. La primera opción es emular la planta física (en este caso motor) con código a través de hardware dedicado como RT-box de Plexim, o utilizar directamente una planta física como es el caso de esta Memoria de Título. La utilización de uno o de otro depende del objetivo, la utilización de plantas virtuales permite simular la operación de distintos motores, mientras que una aplicación física permite una validación más avanzada de un método /entorno específico, en el caso de esta Memoria de Título se valida el uso de MCSA con tres motores Cantoni disponibles en el LEME alimentados a través de variadores de frecuencia.

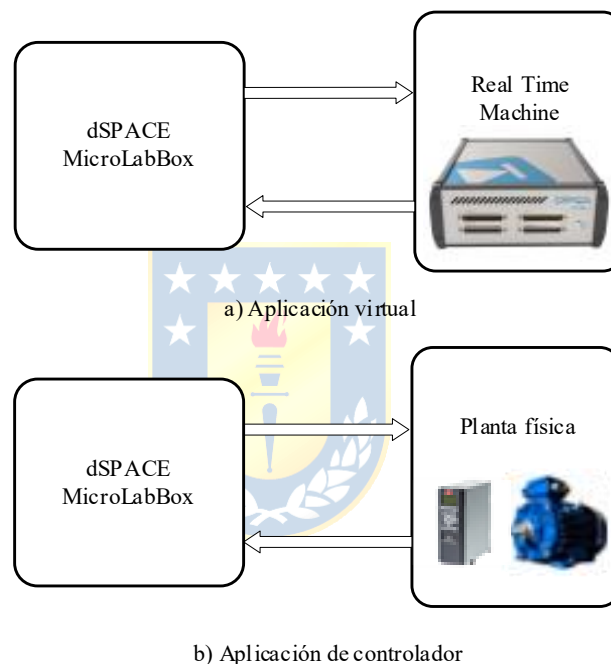


Fig. 4.7 Utilización de MLB según aplicación específica

La Fig. 4.8 muestra el esquema de HILS utilizado, donde se utiliza el MLB como FPGA, el encargado de realizar la conexión mediante Simulink, la conexión entre estos dos es a través de un PC con cable ethernet. El panel superior de MLB se muestra en la Fig 4.9. Para el envío de señales PWM desde el MLB al VDF se utiliza un conector disponible en el LEME, el cual se conecta al Digital I/O A de MLB, mostrado en la Fig 4.10, a la tarjeta de disparo. El conector posee un lado con 50 pines, lado MLB, y otro con 37 pines, lado tarjeta de disparo cuyo mapeo se detalla en la Fig 4.11. Finalmente, la tarjeta de disparo manda señales al VDF a través de fibra óptica. Para alimentar y extraer datos de velocidad del encoder incremental se usa la alimentación trasera de MLB de 5 $[V_{DC}]$ y

dos entradas digitales del Digital I/O B, cuyo mapeo se muestra en la Fig 4.12. Para la lectura de corriente se utiliza una pinza amperimétrica AC conectado a una entrada análoga de MLB.

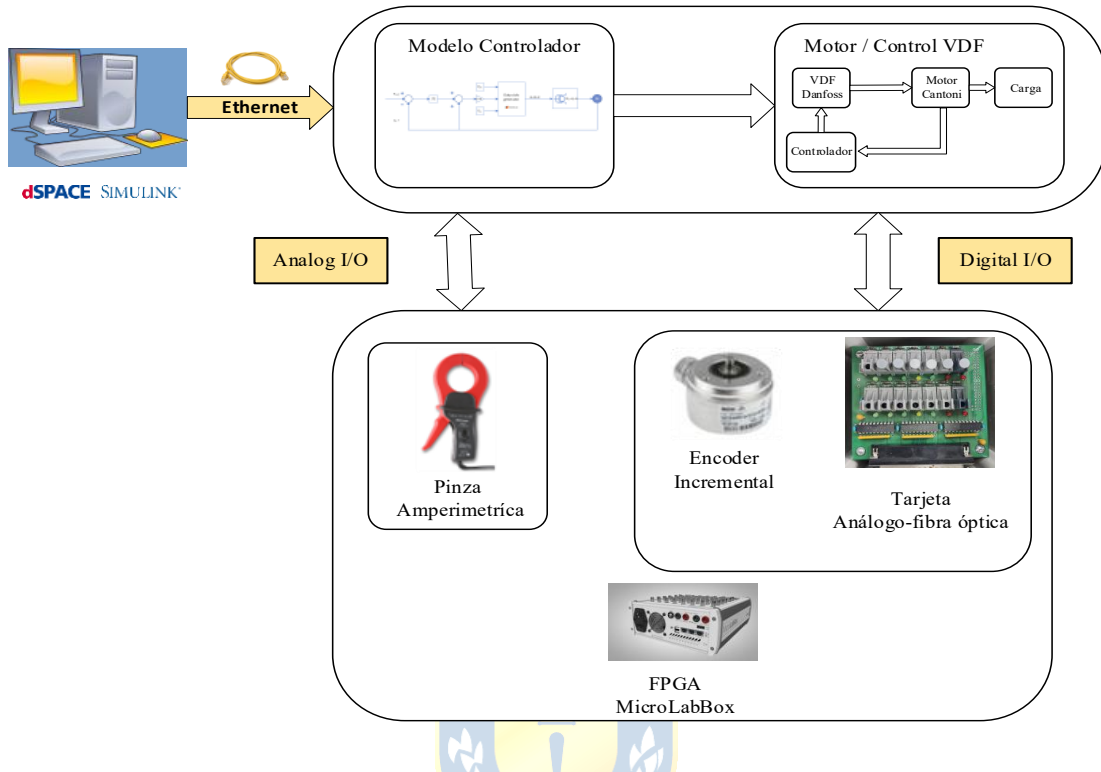


Fig. 4.8 Comunicación entre componentes HITL

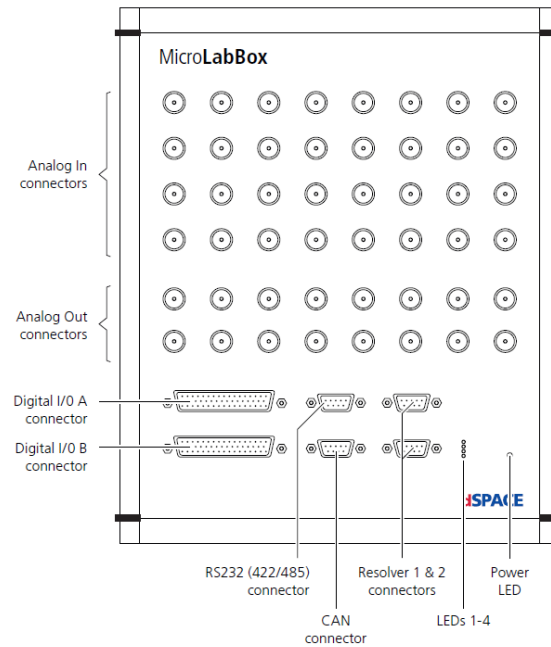


Fig. 4.9 Panel frontal dSPACE MicroLabBox

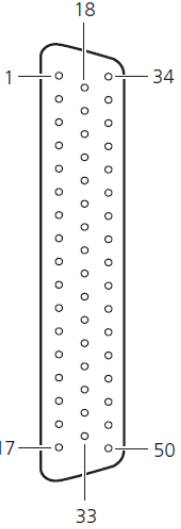
Digital I/O A	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND			34	DIO1 ch32
	2	DIO1 ch16	18	GND	35	DIO1 ch31
	3	DIO1 ch15	19	GND	36	DIO1 ch30
	4	DIO1 ch14	20	GND	37	DIO1 ch29
	5	DIO1 ch13	21	GND	38	DIO1 ch28
	6	DIO1 ch12	22	GND	39	DIO1 ch27
	7	DIO1 ch11	23	GND	40	DIO1 ch26
	8	DIO1 ch10	24	GND	41	DIO1 ch25
	9	DIO1 ch9	25	GND	42	DIO1 ch24
	10	DIO1 ch8	26	GND	43	DIO1 ch23
	11	DIO1 ch7	27	GND	44	DIO1 ch22
	12	DIO1 ch6	28	GND	45	DIO1 ch21
	13	DIO1 ch5	29	GND	46	DIO1 ch20
	14	DIO1 ch4	30	GND	47	DIO1 ch19
	15	DIO1 ch3	31	GND	48	DIO1 ch18
	16	DIO1 ch2	32	GND	49	DIO1 ch17
	17	DIO1 ch1	33	GND	50	GND

Fig. 4.10 Pines y señales Entrada/Salida Digital A



Slave I/O Connector (CP31)

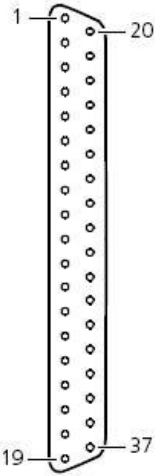
Slave I/O Connector (CP31)	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND		
	2	SCAP1	20	GND
	3	SCAP3	21	SCAP2
	4	GND	22	SCAP4
	5	ST2PWM	23	ST1PWM
	6	GND	24	ST3PWM
	7	SPWM1	25	GND
	8	SPWM3	26	SPWM2
	9	SPWM5	27	SPWM4
	10	SPWM7	28	SPWM6
	11	SPWM9	29	SPWM8
	12	STMCLK	30	GND
	13	GND	31	STMCLK
	14	STINT1	32	SPDPINT
	15	GND	33	STINT2
	16	SSIMO	34	SSOMI
	17	SCLK	35	SSTE
	18	SXF	36	SBIO
	19	VCC (+5 V)	37	GND

Fig. 4.11 Pines y señales para tarjeta de disparo y protección ipc2

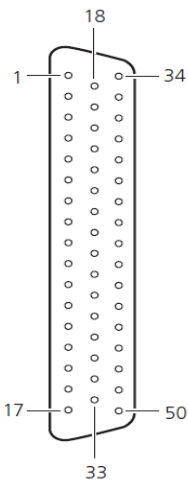
Digital I/O B	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND	18	GND	34	GND
	2	DIO1 ch48	19	DIO2 ch12	35	DIO2 ch12
	3	DIO1 ch47	20	DIO2 ch11	36	DIO2 ch11
	4	DIO1 ch46	21	DIO2 ch10	37	DIO2 ch10
	5	DIO1 ch45	22	GND	38	GND
	6	DIO1 ch44	23	DIO2 ch9	39	DIO2 ch9
	7	DIO1 ch43	24	DIO2 ch8	40	DIO2 ch8
	8	DIO1 ch42	25	DIO2 ch7	41	DIO2 ch7
	9	DIO1 ch41	26	GND	42	GND
	10	DIO1 ch40	27	DIO2 ch6	43	DIO2 ch6
	11	DIO1 ch39	28	DIO2 ch5	44	DIO2 ch5
	12	DIO1 ch38	29	DIO2 ch4	45	DIO2 ch4
	13	DIO1 ch37	30	GND	46	GND
	14	DIO1 ch36	31	DIO2 ch3	47	DIO2 ch3
	15	DIO1 ch35	32	DIO2 ch2	48	DIO2 ch2
	16	DIO1 ch34	33	DIO2 ch1	49	DIO2 ch1
	17	DIO1 ch33			50	GND

Fig. 4.12 Pines y señales Entrada/Salida Digital B

Las conexiones del encoder, MLB a tarjeta ipc2 e ipc2 a VDF se realizan con un previo mapeo de sus funciones. Se realiza un mapeo de pines del cableado existente para la vinculación de MLB con la tarjeta de protección y disparo ipc2: Esta combinación permite mandar señales PWM a través de señales digitales del MLB a través del conector de 50 a 37 pines a la tarjeta ipc2 y esta última manda las señales PWM al VDF Danfoss a través de fibra óptica. Las señales PWM y sus respectivos ciclos de trabajo son configurados en el modelo de Simulink vinculado a MLB. Estas señales controlan el VDF Danfoss y alimentan el motor Cantoni

Además, se calibra el encoder incremental, controlador y señales de corriente para obtener mediciones en tiempo real: Se usa un filtro digital para eliminar el ruido proveniente del VDF y AFE, además de elaborar un acople mecánico y un cableado de aproximadamente 1,5 metros. Por el lado del controlador PI, se acondiciona para que este no se sature aplicando Anti-windup [34] y para que trabaje en rangos de frecuencia desde 1 Hz a 55 Hz.

La Fig. 4.13 muestra el diagrama de componentes y conexiones del setup experimental, detallando la interconexión entre los distintos componentes utilizados, como MLB, conectores, tarjetas, mientras que la Fig. 4.14 muestra el setup físico disponible en el LEME.

Para la alimentación de la carga se utiliza el conjunto AFE disponible en el LEME, donde se configura el nivel de carga a través de su software dedicado conectado a un PC. El nivel de carga aplicado se visualiza a través del torquímetro y su software especializado a través de un tercer PC, este permite la visualización de torque, potencia eléctrica y una segunda lectura de velocidad.

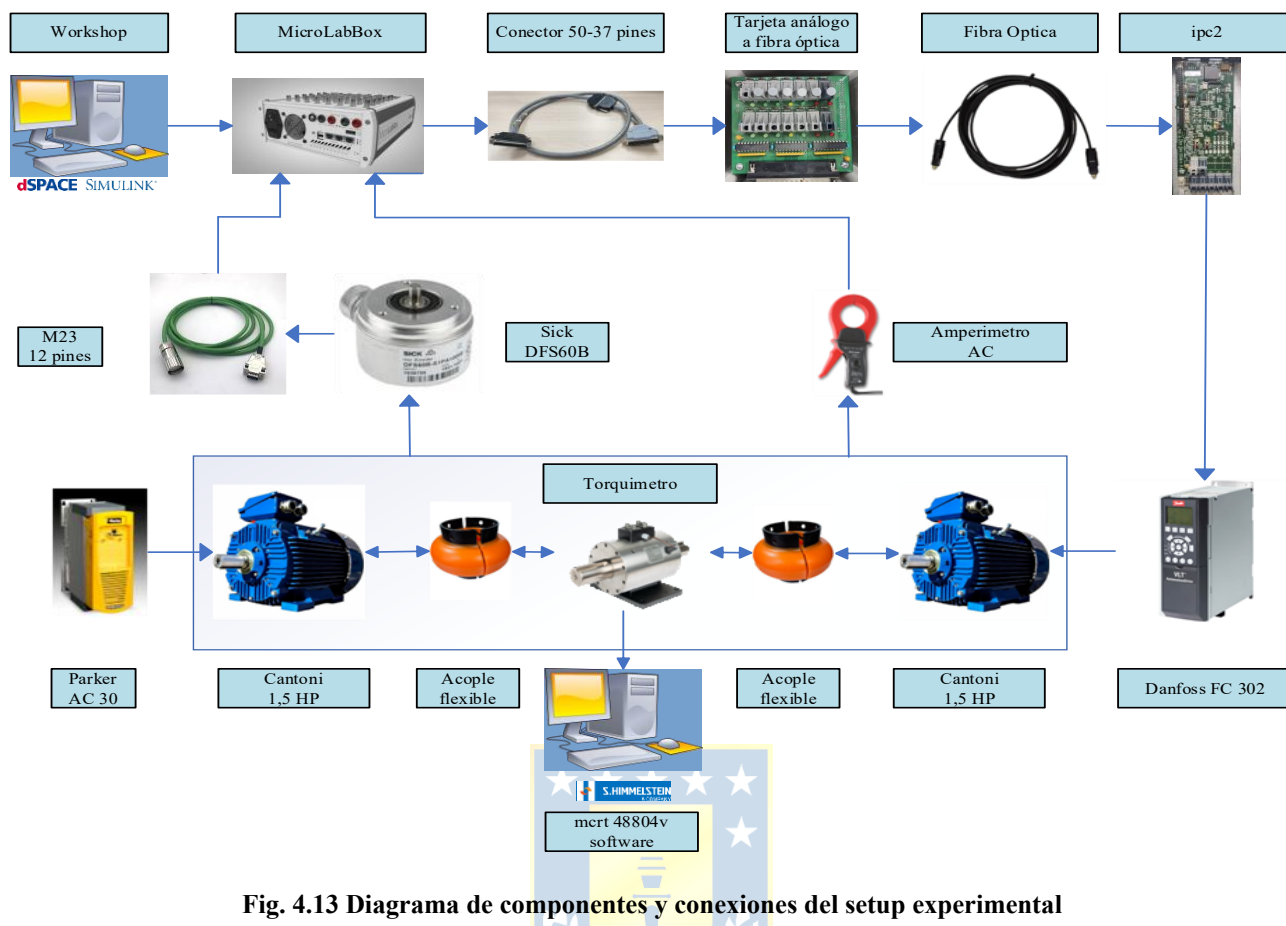


Fig. 4.13 Diagrama de componentes y conexiones del setup experimental

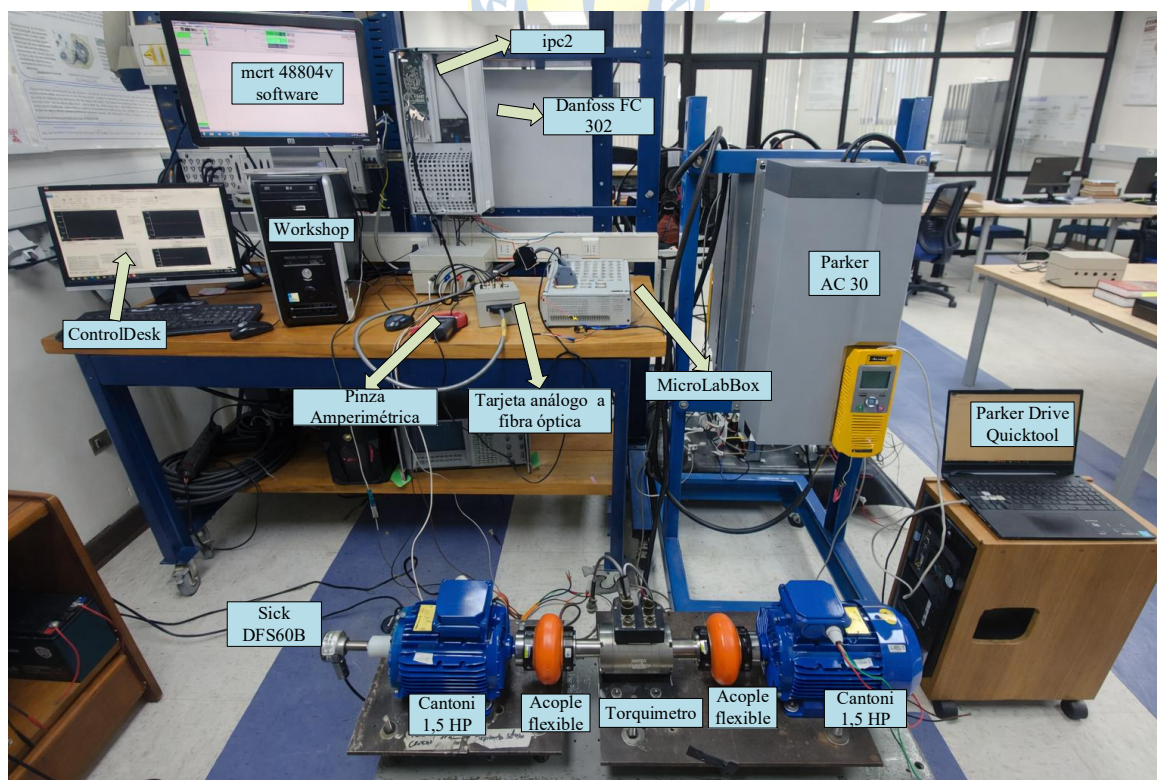


Fig. 4.14 Setup experimental LEME

Capítulo 5. Evaluación de algoritmo en motor y VDF

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos en el algoritmo de MCSA desarrollado, evaluado en tres condiciones; lazo abierto, lazo cerrado y variaciones de carga y en tres motores: sano, 1 BRB y 3 BRB.

Se comienza con la descripción del set de pruebas, sus limitaciones y los casos no considerados. A continuación, se presentan los resultados en lazo abierto y lazo cerrado, posteriormente se analizan la influencia del deslizamiento, el ruido de conmutación y la frecuencia de conmutación sobre la tasa de detección, además de evaluar en qué condiciones se obtienen diagnósticos correctos, falsos positivos o negativos. Se compara el comportamiento de los tres motores evaluados y se discute las diferencias observadas. Finalmente, se analiza las pruebas con variación de carga, evaluadas tanto en lazo abierto como cerrado bajo un perfil de carga industrial.

5.1. Set de pruebas

Se realizan pruebas con distintas frecuencias de conmutación, además de lazo abierto, lazo cerrado y variaciones de carga. La Tabla 5.1 muestra las distintas frecuencias de conmutación, velocidad y carga usadas. Se evalúan 7 frecuencias de conmutación distintas, de tal forma de verificar si estas poseen alguna influencia en el diagnóstico. Además, se prueba con velocidades desde el 20% a 100% de velocidad sincrónica de tal forma de estudiar casos con deslizamientos más alto y bajo.

Primero se realizan pruebas en lazo abierto y luego en lazo cerrado con distintos niveles de carga, para luego evaluar un caso de variación de carga tanto en lazo abierto y cerrado, se recrea un proceso de prensado de la industria papelera, con un aumento desde el 35% hasta un 66,1% del torque nominal del motor estudiado.

Tabla 5.1 Escenarios a evaluar

Ítem	Valor	Unidad
Frecuencia de conmutación	1 – 2,5 – 4 – 5,5 – 7 – 8,5 – 10	kHz
Velocidad referencia	1500 – 1200 – 900 – 600 – 300	RPM
Frecuencia referencia	50 – 40 – 30 – 20 – 10	Hz
Carga	0 – 1,85 – 3,7 – 5,5 – 7,4	Nm

Para interpretar los datos, se utilizan los rangos establecidos en la Tabla 5.2, siguiendo lo establecido en el Capítulo 2, Tabla 2.2 (estimador de Thomson). Para la evaluación se considera como falso positivo cualquier diagnóstico que sobreestime la falla presente en el motor, como detectar más barras rotas de las que existen realmente, o que detecte falla en un motor sano. El caso de falso

negativo representa la subestimación de una falla, es decir, detectar menor número de barras rotas de las que existen realmente o no detectar la presencia de ninguna barra de rotor en un motor con falla.

Tabla 5.2 Rangos de diagnóstico

Estado del motor	Diagnóstico	Diferencia de decibeles " N_{av} "
Sano	Correcto	≥ 45 dB
	Falso positivo	< 45 dB
	Falso negativo	-
1BRB	Correcto	45-35 dB
	Falso positivo	< 35 dB
	Falso negativo	≥ 45 dB
3 BRB	Correcto	< 40 dB
	Falso positivo	-
	Falso negativo	> 40 dB

La diferencia típica de decibeles " N_{av} " entre la componente fundamental y las bandas laterales puede variar en un rango amplio, los casos históricos muestran un rango entre 20-60 dB [3], siendo esta diferencia en función a la asimetría del devanado de jaula de ardilla causada por uniones defectuosas entre barras y anillos extremos rotos o barras rotas de rotor.

Las pruebas realizadas tuvieron una duración de 20 segundos, con una medición de temperatura del motor constante y en periodos no mayores a 45 minutos.

5.2. Frecuencia de conmutación

El parámetro que se evalúa para observar si afecta el diagnóstico es la frecuencia de conmutación, esta se refiere a la velocidad en la que conmutan dispositivos semiconductores de potencia (como BJT, IGBT y MOSFET) entre encendido y apagado. La frecuencia de conmutación es un parámetro que afecta al rendimiento del motor desde el punto de vista del ruido, térmico e interferencias electromagnéticas. Los IGBT sufren de pérdidas de conmutación significativas a medida que se aumenta la frecuencia de conmutación, haciéndolos ineficientes para operar a altas frecuencias, como si lo pueden hacer los dispositivos SiC/GaN, capaces de operar a más de 100 kHz de conmutación. La Tabla 5.3 muestra distintas topologías y fabricantes de VDF del mercado, El VDF utilizado, FC 302 de Danfoss, es el que permite la frecuencia de conmutación configurable más baja, lo que permite estudiar un rango más amplio de frecuencias.

Las pérdidas de conmutación son el resultado de la superposición entre el voltaje y la corriente en el interruptor durante el intervalo de conmutación (encendido-apagado). En IGBTs un aumento de la frecuencia de conmutación aumenta considerablemente las perdidas por conmutación, por lo que

funcionan con frecuencias de conmutación en el rango de 2-16 kHz, bajo en comparación a inversores SiC (Silicon Carbide) que son capaces de operar en rangos de 2 a 500 kHz [29].

Tabla 5.3 VDFs comerciales y sus respectivas frecuencias de conmutación

Fabricante	Modelo	Frecuencia predeterminada	Frecuencia mínima
Danfoss	FC 302	3 kHz	1 kHz
	V1000	8 kHz	2 kHz
Siemens	SINAMICS V20	4 kHz	2 kHz
Schneider	ATV320	4 kHz	2 kHz
Rockwell	PowerFlex700	2 kHz	3 kHz

Si bien el diagnóstico de motores alimentados a través de VDF ha sido incipientemente estudiado, la literatura no ha abordado en profundidad el impacto de la frecuencia de conmutación sobre la efectividad de MCSA. Este trabajo tiene como objetivo determinar la influencia de este parámetro en la detección de fallas de barra rotas de rotor, además de evaluar si la FFT posee robustez en accionamientos de frecuencia variable.

Se ha estudiado que un aumento en la frecuencia de conmutación disminuye el ripple de corriente logrando lo establecido por las normas, pero aumenta la temperatura en uniones/devices y problemas de interferencias electromagnéticas [30]. A medida que se va aumentando la frecuencia de conmutación los problemas de interferencia electromagnética aumentan. Las fuentes de este son voltajes de modo común (CMV), altos valores de dV/dt y di/dt durante transitorios de conmutación. El PWM de frecuencia de conmutación constante (como el caso a analizar) concentra los armónicos en múltiplos enteros de la frecuencia de conmutación.

5.3. Casos no estudiados

Para cuidar la integridad del motor y respetar los valores nominales de placa según la Tabla 2.3, se omiten pruebas en la que la corriente supera la potencia nominal de 1,1 kW o una corriente de $3 A_{rms}$, como es el caso de:

1. Lazo cerrado con referencia de 1500 RPM y carga del 100%, donde la potencia supera la nominal
2. Motor con tres barras rotas a carga mayor al 75% y velocidades bajas: En el caso de lazo cerrado el motor no llega a la referencia sin una compensación extra de voltaje, lo que implica un aumento de la corriente y potencia. Esto debido a la pérdida de eficiencia y torque producida por las barras rotas.

3. Lazo abierto a baja frecuencia (300 RPM velocidad sincrónica): Debido a la caída de tensión resistiva presente en un control V/f, al igual que en el caso anterior es necesario aumentar la compensación de voltaje, lo que lleva a un incremento de la corriente para sostener la carga durante el tiempo de la prueba.

5.4. Resultados en lazo abierto

Para el caso de lazo abierto se realizan un total de 504 pruebas considerando todos los rangos de frecuencias de conmutación a analizar. Se analiza la magnitud de las bandas laterales y se determina si la magnitud está de acuerdo con el estimador de severidad de la Tabla 2.2. Se registra frecuencia de alimentación, nivel de carga, velocidad y deslizamiento. Se evalúa el motor Cantoni sano, con una barra rota y tres barras rotas. Para la medición de velocidad y estimación de deslizamiento se utiliza el encoder incremental y la adquisición de datos de corriente y velocidad a través de MLB.

Para cada frecuencia de conmutación se realizan 72 pruebas, 24 pruebas para cada motor evaluado, es decir sano, 1 y 3BRB.

En modo de ejemplo, se muestran tres resultados en lazo abierto y lazo cerrado, uno para el motor sano, otro para el motor de una barra rota y otra para el de tres barras rotas, de tal forma de establecer similitudes, diferencias y tendencias. Se analiza un caso con la frecuencia de conmutación máxima permitida, 10 kHz, uno con una frecuencia de conmutación intermedia de 5,5 kHz y otro con la mínima de 1 kHz, además de distintas frecuencias de alimentación de tal forma de observar si es posible diagnosticar en distintas frecuencias de conmutación. Se comparan casos similares para lazo cerrado para analizar el espectro de corriente e identificar patrones y diferencias. Posterior a estos ejemplos se muestran las 72 pruebas por cada frecuencia de conmutación a través de comentarios y tablas que cuantifican los diagnósticos clasificados por motor y frecuencia de alimentación.

La Fig 5.1. muestra el resultado para el motor sano, 30 Hz, deslizamiento de 3,07% y una frecuencia de conmutación de 10 kHz. El algoritmo detecta correctamente la severidad de la falla, identificando una unión defectuosa en el rotor, lo que se considera normal por lo que el algoritmo reconoce que la posibilidad de falla es baja. La banda lateral posee una diferencia con la fundamental alta al tratarse en un motor sano. No se observa posible ruido de conmutación y el diagnóstico es correcto.

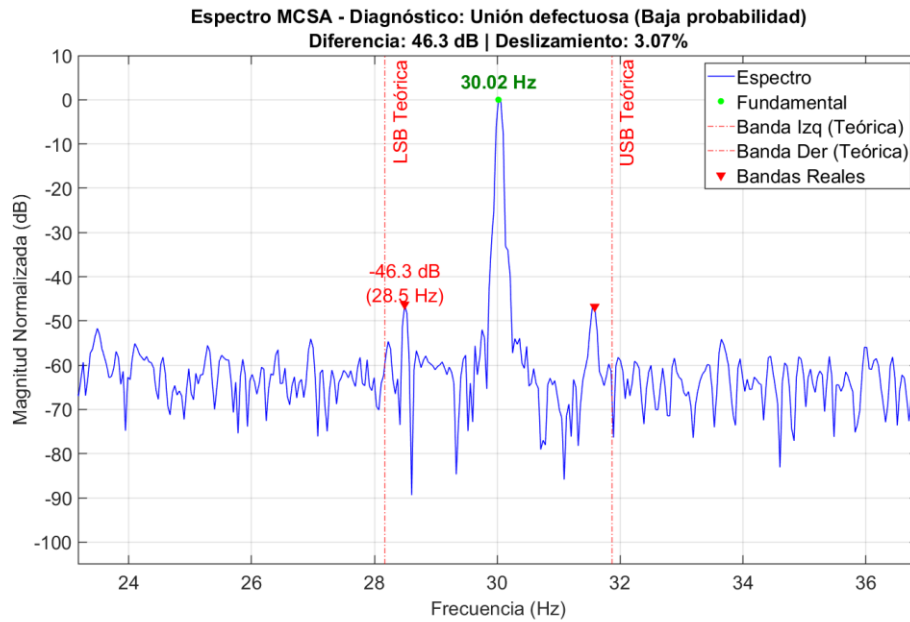


Fig. 5.1 Lazo abierto en motor sano con 50% de carga, 10 kHz de conmutación

La Fig. 5.2 muestra el resultado para el motor de una barra rota, carga nominal, 50 Hz de alimentación, deslizamiento de 4,58% y una frecuencia de conmutación de 5,5 kHz. Las bandas laterales de falla son fácilmente reconocibles y poseen una magnitud correcta a un motor con una barra rota y 4 polos, identificando la severidad de la falla. No se observa una dificultad para diagnosticar debido a ruido de conmutación al igual que el caso anterior, las bandas laterales se encuentran más alejadas de la fundamental que en el caso anterior debido al mayor deslizamiento y con una mayor magnitud debido al estado del motor.

La Fig 5.3 muestra el resultado para el motor con tres barras rotas, 10 Hz de alimentación, carga de 75% y una frecuencia de conmutación de 1 kHz. Al igual que en los casos anteriores las bandas laterales y la severidad de la falla se detectan correctamente. Se posee una diferencia de decibeles casi idéntica al caso anterior, de 38,5 dB, correcto para el motor estudiado. Al trabajar con una frecuencia de alimentación más baja el deslizamiento aumenta considerablemente, y, en consecuencia, las bandas laterales están más alejadas en términos de proporción. Al igual que en los casos anteriores, no hay ruido de conmutación que afecte el diagnóstico en el espectro de corriente.

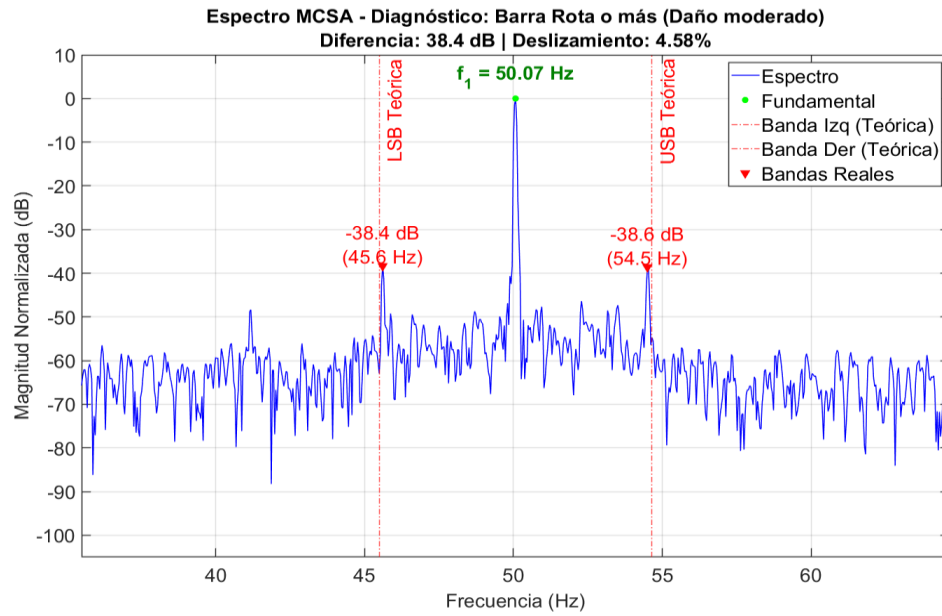


Fig. 5.2 Lazo abierto en motor con 1 BRB a plena carga 5,5 kHz de conmutación

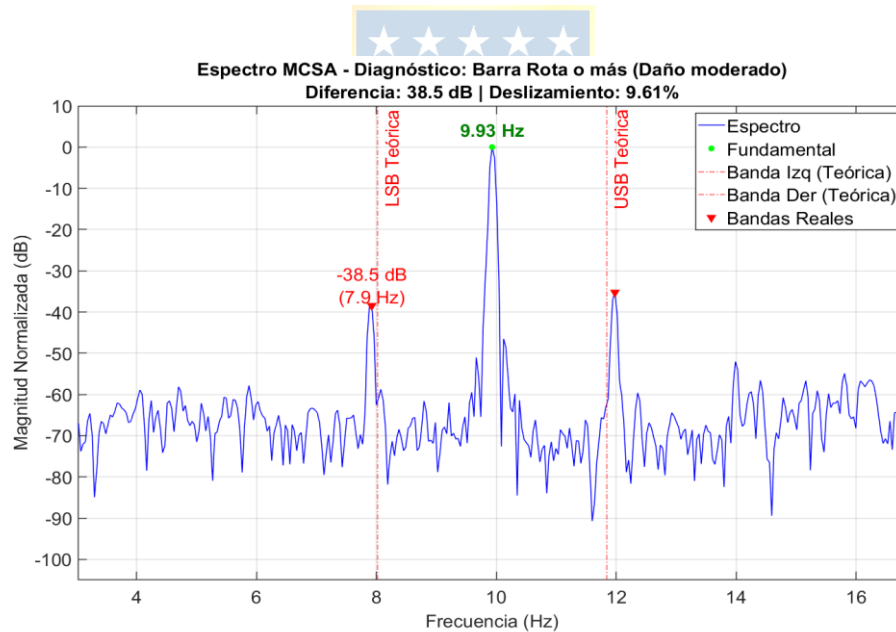


Fig. 5.3 Lazo abierto en motor con 3 BRB a plena carga - 1 kHz de conmutación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la evaluación de las 7 frecuencias de conmutación:

La Tabla 5.4 muestra los diagnósticos obtenidos clasificados por motor a 1 kHz de conmutación, la Tabla B.1 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, de la cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.2 muestra los parámetros

adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. De esta tabla, se evidencia que la mayoría de los diagnósticos erróneos se dan en un deslizamiento menor al 2% y los demás se dan en el motor sano a distintos niveles de carga y frecuencia de alimentación. Hay cinco falsos positivos con un deslizamiento mayor a 2% los cuales se dan el motor sano. En total se tienen 50 diagnósticos correctos, 7 falsos positivos provenientes del motor sano y 15 falsos negativos entre el motor con 1 y 3 BRB. A medida que se disminuye la frecuencia de referencia aumenta la cantidad de falsos negativos, siendo la situación más crítica a 10 Hz. Esta es la frecuencia de conmutación con mayor detectabilidad junto a 10 kHz con un 69,4% de diagnósticos correctos.

Tabla 5.4 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 1 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	5	0	0
40 Hz	Sano	3	2	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	5	0	0
30 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
20 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
10 Hz	Sano	4	0	0
	1 BRB	1	0	3
	3 BRB	1	0	3
Total		50	7	15

La Tabla 5.5 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 2,5 kHz de conmutación, la Tabla B.3 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.4 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Al igual que el caso anterior la mayoría de los diagnósticos erróneos se dan con un deslizamiento menor al 2%. A medida que se baja la frecuencia de alimentación aumenta los falsos negativos. Se obtienen peores resultados que a 1 kHz, con 48 diagnósticos correctos, nuevamente el motor con peor tasa de diagnóstico es el motor con una barra rota.

La Tabla 5.6 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 4 kHz de conmutación, la Tabla B.5 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.6 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento,

velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. La mayoría de los diagnósticos erróneos se encuentran con un deslizamiento menor a 1% y en el motor sano a distintos niveles de carga/deslizamiento. Al igual que en los dos casos anteriores a 10 Hz se obtiene la peor tasa de diagnóstico, con 7 diagnósticos correctos y 5 falsos positivos entre el motor de una y tres barras rotas. El motor con peor tasa de diagnóstico es el motor con una y tres barras rotas, con 9 falsos negativos cada uno.

Tabla 5.5 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 2,5 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	5	0	0
40 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	1	1
	3BRB	4	0	1
30 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
20 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
10 Hz	Sano	3	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	1	0	3
Total		49	6	17

Tabla 5.6 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 4 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
40 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	3	0	2
30 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
20 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	3	0	2
10 Hz	Sano	4	0	0
	1 BRB	1	0	3
	3 BRB	2	0	2
Total		48	6	18

La Tabla 5.7 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 5,5 kHz de conmutación, la Tabla B.7 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.8 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Existen 8 pruebas con un diagnóstico erróneo con un nivel de carga mayor al 50%, de estos diagnósticos erróneos todos se dan en el motor sano. El motor sano es el que posee mayores diagnósticos erróneos. La frecuencia de alimentación que posee peor detectabilidad sigue siendo 10 Hz y la que posee mayor la de 50 Hz.

Tabla 5.7 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 5,5 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	5	0	0
40 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	5	0	0
	3BRB	3	0	2
30 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	3	0	2
20 Hz	Sano	1	4	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
10 Hz	Sano	3	1	0
	1 BRB	3	0	1
	3 BRB	1	0	3
Total		49	12	11

La Tabla 5.8 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 7 kHz de conmutación, la Tabla B.9 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.10 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Existen 25 diagnósticos erróneos, de los cuales 12 se dan en el motor sano, 8 en el motor de una barra rota y 5 en el motor de tres barras rotas. 8 de los diagnósticos erróneos para el motor de una barra rota y tres barras rotas se da en las pruebas de vacío, 2 para un 25% de carga, 2 para un 50% de carga y 1 para 100% de carga. 9 diagnósticos erróneos se dan con un deslizamiento menor al 1% y 16 para un deslizamiento mayor. A diferencia de las frecuencias de conmutación evaluadas anteriormente, la peor tasa de detección se da a 20 Hz, con 6 falsos positivos.

La Tabla 5.9 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 8,5 kHz de conmutación, la Tabla B.11 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental,

del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.12 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Esta es la frecuencia de conmutación con peor tasa de detección, con 44 y 29 diagnósticos correctos e incorrectos respectivamente, obteniendo un 61,1% de efectividad. Las frecuencias con mejor detección son de 50 Hz y 40 Hz, mientras la que peor es de 20 Hz.

Tabla 5.8 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 7 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	3	2	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	5	0	0
40 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	3	1	1
	3BRB	4	0	1
30 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	2	2	1
	3 BRB	4	0	1
20 Hz	Sano	1	4	0
	1 BRB	3	2	0
	3 BRB	4	0	1
10 Hz	Sano	4	0	0
	1 BRB	2	0	2
	3 BRB	2	0	2
Total		46	17	9

Tabla 5.9 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 8,5 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	3	3	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
40 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	3	0	2
30 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	3	0	2
	3 BRB	4	0	1
20 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	1	1	3
	3 BRB	3	0	2
10 Hz	Sano	3	1	0
	1 BRB	2	0	2
	3 BRB	2	0	2
Total		44	11	17

La Tabla 5.10 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 10 kHz de conmutación, la Tabla B.11 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.12 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Hay 22 diagnósticos erróneos, de los cuales el motor sano y el motor con una barra rota concentran el mayor número de diagnósticos erróneos. Junto a 1 kHz de conmutación, es la frecuencia de conmutación con mayor detección, 69,4%.

Tabla 5.10 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto - 10 kHz

Velocidad sincrónica	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
50 Hz	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
40 Hz	Sano	3	2	0
	1 BRB	2	1	2
	3BRB	5	0	0
30 Hz	Sano	3	2	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
20 Hz	Sano	2	3	0
	1 BRB	2	1	3
	3 BRB	3	0	2
10 Hz	Sano	4	0	0
	1 BRB	2	0	2
	3 BRB	2	0	2
Total		50	10	12

En todas las frecuencias de conmutación se observa una debilidad en deslizamientos bajos y menores a 2% aproximadamente, es decir, con una carga del 0% y 25%. Sobre este nivel de carga se mejora considerablemente la detección. En todas las frecuencias de conmutación se observa una disminución de detección a partir de 30 Hz, donde 20 Hz y 10 Hz concentran el mayor número de diagnósticos erróneos.

En la gran mayoría de los casos la estimación de deslizamiento realizada mediante la medición de velocidad con el encoder y cálculo de la fundamental con FFT da buenos resultados, estando las bandas laterales reales cercanos a las bandas laterales teóricas $f(1 \pm 2s)$. En pocos casos esta estimación es errónea, pero es más común en frecuencias bajas y a bajo deslizamiento, donde la oscilación de velocidad y deslizamiento es mayor.

Cabe mencionar que el control aplicado no posee una compensación dinámica de voltaje Boost, es decir, utiliza un Boost fijo para todos los niveles de carga. La implementación de un Boost

dinámico podría permitir mejorar la capacidad de torque a bajas frecuencias y lograr un mayor deslizamiento, aumentando la posibilidad de detección; sin embargo, la corriente superaría el valor nominal del motor. Este efecto se debe considerar al evaluar los resultados a bajas frecuencias. El análisis de la sensibilidad del algoritmo, junto a la discusión de falsos positivos y negativos tanto en lazo abierto como cerrado, se muestran en el Capítulo 5.6.

5.5. Resultados en lazo cerrado

Se analizan los mismos parámetros que para el caso de lazo abierto. Se realizan 480 pruebas experimentales considerando todo el rango de frecuencias de conmutación. Se retroalimenta el lazo de control con lectura de velocidad a través del encoder incremental. Al igual que el caso anterior, se adquieren datos con MLB. Se realizan 68 pruebas experimentales para cada frecuencia de conmutación, 24 pruebas para el motor sano y 1 BRB y 20 pruebas para el motor de 3 BRB.

Al igual que en el caso de lazo abierto, se analizan tres resultados en distintas velocidades de referencia, carga y frecuencia de conmutación.

Para el motor sano se analiza el caso con una velocidad de referencia de 900 RPM, 100% de carga y una frecuencia de conmutación de 10 kHz. La Fig 5.4 muestra el diagnóstico del algoritmo, al igual que el caso de lazo abierto, no se aprecia ruido de conmutación que afecte el diagnóstico, detectando correctamente la severidad del motor.

Para el motor de una barra rota se analiza la prueba con 1500 RPM como velocidad de referencia, 75% de carga y una frecuencia de conmutación de 5,5 kHz. Se detecta correctamente la severidad de la falla, estando las bandas laterales desplazadas aproximadamente 1 Hz de las bandas laterales teóricas, mostrado en la Fig 5.5.

Para el motor de con tres barras rotas se analiza la prueba con 300 RPM como velocidad de referencia, 50% de carga y una frecuencia de conmutación de 1 kHz. El diagnóstico se muestra en la Fig. 5.6, donde se detecta correctamente la severidad de la falla.

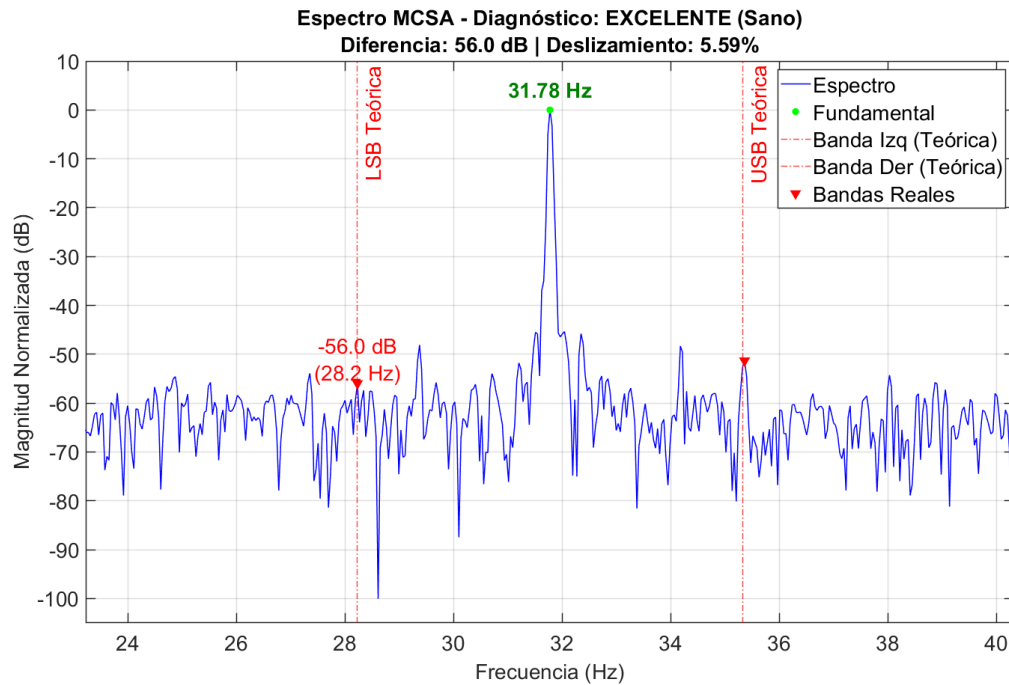


Fig. 5.4 Lazo cerrado en motor sano con 100% de carga, 10 kHz de conmutación

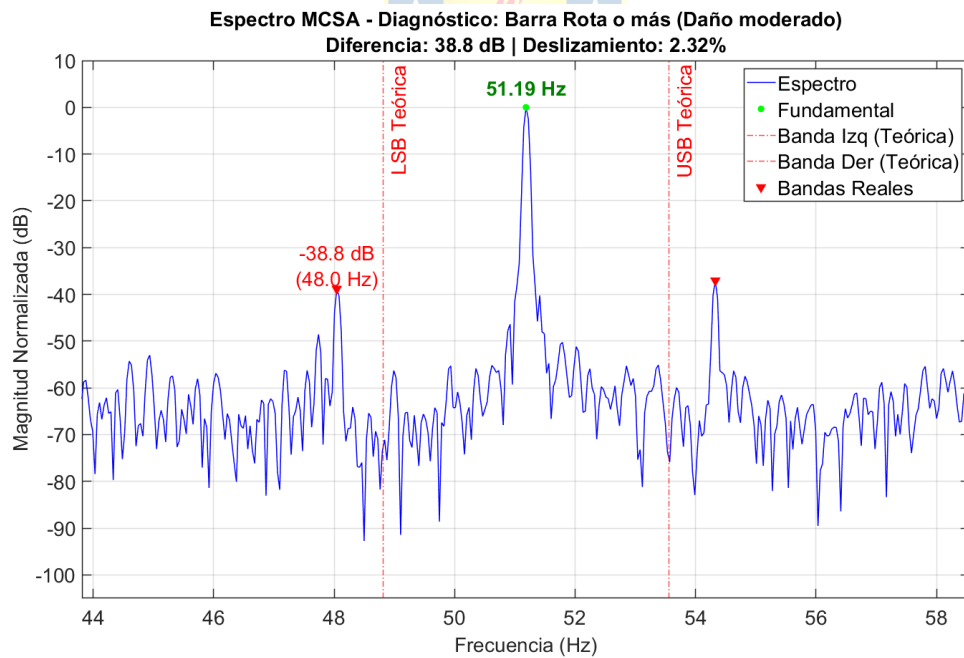


Fig. 5.5 Lazo cerrado en motor 1BRB con 75% de carga, 5,5 kHz de conmutación

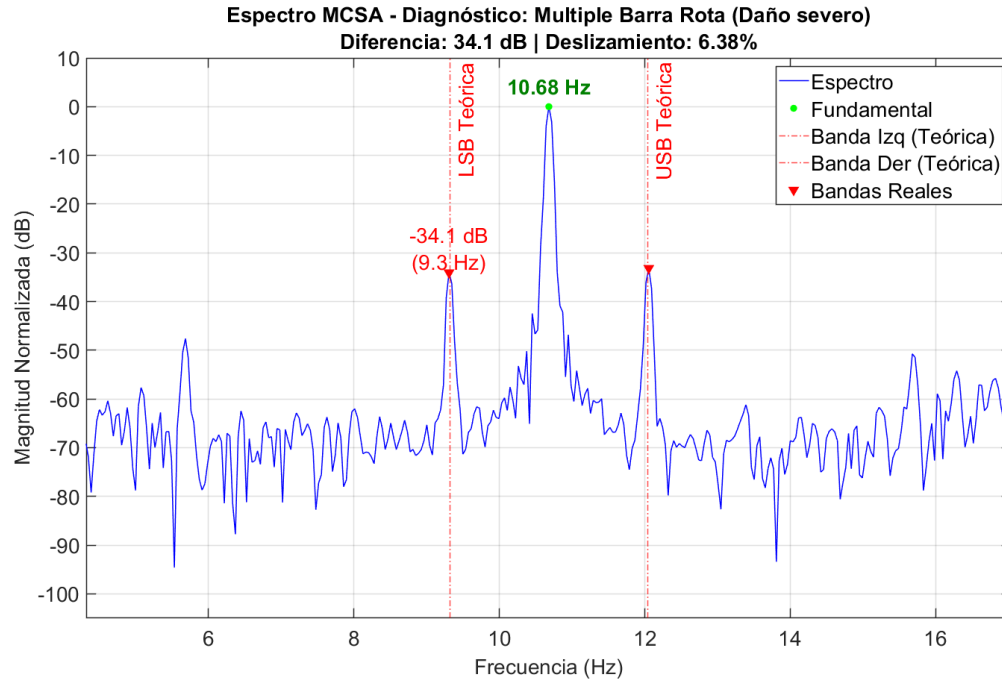


Fig. 5.6 Lazo cerrado en motor 3 BRB con 50% de carga, 1 kHz de conmutación

La Tabla 5.11 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 1 kHz de conmutación, la Tabla B.13 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.14 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. El motor que concentra mayor número de falsos diagnósticos es el motor sano. Todos los falsos positivos/negativos se dan con un deslizamiento menor a 1%, concentrándose casi en su totalidad en pruebas en vacío.

La Tabla 5.12 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 2,5 kHz de conmutación, la Tabla B.15 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.16 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Hay 11 diagnósticos erróneos, la mayoría con un deslizamiento menor a 1%. En el caso de 1500 RPM de referencia y 75% de carga, falso positivo del motor sano, se detectan de adecuadamente las bandas laterales, pero la magnitud de esta indica la presencia de barra rota según el estimador de Thomson, siendo 0,4 dB menor en magnitud para detectar el estado sano del motor correctamente, caso similar para el motor sano, 600 RPM de referencia y 50%, de carga se detectan las bandas laterales, pero nuevamente la magnitud es 0,5 dB menor a la de un motor sano, por lo que el algoritmo lo clasifica como motor con una barra rota.

Tabla 5.11 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 1 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	3	1	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	3	2	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	1	0
	3 BRB	4	0	2
600 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	1	0
	3 BRB	4	0	1
300 RPM	Sano	5	0	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
Total		58	6	5

La Tabla 5.13 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 4 kHz de conmutación, la Tabla B.17 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.18 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Al igual que el caso anterior, la mayoría de los diagnósticos erróneos son con un deslizamiento menor a 1%, solo hay un caso erróneo con un deslizamiento mayor, a 600 RPM de referencia, tres barras rotas y un deslizamiento de 8,17%. El algoritmo detecta las bandas laterales pero su magnitud es tal que el algoritmo detecta la presencia de una sola barra rota, subestimando la severidad de la falla.

La Tabla 5.14 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 5,5 kHz de conmutación, la Tabla B.19 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.20 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. A diferencia de los casos anteriores en lazo cerrado, existen falsos positivos con un deslizamiento mayor al 1% en todas las velocidades de referencia excepto en 1200 RPM. Se detectan las bandas laterales, pero estas poseen una magnitud no apropiada. Los 10 falsos positivos se dan en el motor sano, mientras que el motor con una barra rota y tres barras rotas poseen 3 y 2 falsos negativos respectivamente, todos con un deslizamiento menor a 1%.

Tabla 5.12 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 2,5 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	2	2	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	5	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	3	2	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
300 RPM	Sano	5	0	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
Total		58	6	5

La Tabla 5.15 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 7 kHz de conmutación, la Tabla B.21 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.22 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Se repiten lo visto en la frecuencia de conmutación anterior, 5 kHz, con presencia de falsos positivos a un deslizamiento mayor al 1% y otra vez son todos en el motor sano. La magnitud de las bandas laterales posee una diferencia muy baja para tratarse de un motor sano. El motor con una barra rota solo posee un falso positivo. Esta es la frecuencia de conmutación con peor detección en lazo cerrado, con 76,5% de diagnósticos correctos.

La Tabla 5.16 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 8,5 kHz de conmutación, la Tabla B.22 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.23 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Todos los diagnósticos erróneos se dan con un deslizamiento menor al 1%. El motor que posee mayor número de diagnósticos erróneos es el motor sano, mientras que los motores con barra rota poseen solo 2 falsos negativos cada uno.

Tabla 5.13 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 4 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	3	1	0
	1 BRB	3	1	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	5	2	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	3	0	2
300 RPM	Sano	5	0	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	1
Total		59	4	6

Tabla 5.14 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 5,5 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	2	2	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	3	2	0
	1 BRB	4	0	1
	3BRB	3	0	1
900 RPM	Sano	2	3	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
300 RPM	Sano	3	2	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	5	0	0
Total		54	10	5

La Tabla 5.17 muestra los diagnósticos clasificados por motor a 10 kHz de conmutación, la Tabla B.24 muestra en detalle la diferencia de magnitud de la banda lateral de falla con la fundamental, del cual se obtiene el diagnóstico. La Tabla B.25 muestra los parámetros adicionales como deslizamiento, velocidad promedio medida, deslizamiento y fundamental. Todos los diagnósticos erróneos se obtienen con un deslizamiento menor al 1%, siendo el motor sano el que posee mayor número de falsos positivos, 4. El motor con una barra rota no posee diagnósticos erróneos, es decir,

todas las pruebas realizadas poseen un diagnóstico correcto, mientras que el motor de tres barras rotas presenta 2 falsos negativos. En esta frecuencia de conmutación se logra la mejor tasa de efectividad de todas las pruebas realizadas, considerando tanto lazo abierto como lazo cerrado. Al igual que en el caso de lazo abierto, a 10 kHz se obtiene la mejor tasa de detección con un 91,2% de los diagnósticos correctos.

Tabla 5.15 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 7 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	3	1	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	3	2	0
	1 BRB	5	0	0
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	0	5	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	1	4	0
	1 BRB	4	1	0
	3 BRB	3	0	1
300 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
Total		52	14	2

Tabla 5.16 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 8,5 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	3	1	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	5	0	0
	1 BRB	4	0	1
	3 BRB	3	0	1
300 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	1
	3 BRB	4	0	1
Total		60	4	4

Tabla 5.17 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - 10 kHz

Velocidad de referencia	Motor	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1500 RPM	Sano	3	1	0
	1 BRB	4	0	0
	3 BRB	3	0	0
1200 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3BRB	4	0	0
900 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	0
600 RPM	Sano	5	0	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
300 RPM	Sano	4	1	0
	1 BRB	5	0	0
	3 BRB	4	0	1
Total		62	4	2

En comparación a lazo abierto, se logra una mejor tasa de diagnósticos correctos, además, no hay una relación directa entre la velocidad de referencia utiliza y la robustez del diagnóstico, como si había en lazo abierto, con 50 Hz de referencia para un mejor diagnóstico y 20 - 10 Hz para un diagnóstico posiblemente erróneo, en lazo cerrado se logra una buena detección desde los 1500 RPM hasta los 300 RPM. Al igual que el caso anterior el motor que presenta mayor número de diagnósticos erróneos es el motor sano, mientras el que posee mejor es el motor con tres barras rotas.

Con lectura de velocidad precisa, las bandas laterales reales se encuentran muy próximas a las bandas laterales teóricas, siendo esta una representación más fiel de la velocidad real en comparación a la medición a través de un tacómetro. Este caso se repite para la mayoría de los casos estudiados, pero no todos, existen algunos donde las bandas laterales reales están a una mayor distancia de las teóricas, pero aun así los rangos establecidos de búsqueda logran detectar las bandas laterales de falla, una separación de las bandas laterales teóricas con las reales. En el caso de lazo cerrado esto se debe a la constante variación de la frecuencia de la alimentación, mientras que el algoritmo considera una frecuencia fija como fundamental y, en consecuencia, se calculan las bandas laterales teóricas en función a esa frecuencia fija.

5.6. Ruido, sensibilidad y deslizamiento

Independientemente del control utilizado (lazo abierto/cerrado), los resultados experimentales muestran que el ruido de alta frecuencia proveniente de la conmutación de IGBTs del VDF no afecta

significativamente la detectabilidad de bandas laterales asociadas a barras rotas de rotor. En ambas estrategias es posible identificar bandas de falla y aplicar correctamente el estimador de severidad tales como el de Thomson [3], siendo suficiente la aplicación de ventana Hanning sin requerir filtros adicionales.

Para las dos estrategias se posee una baja detección correcta para las pruebas de vacío y algunas con 25% de carga. En general, la tasa de diagnósticos correctos aumenta al utilizar un deslizamiento mayor a 1%. Si bien es posible la detección de fallas con un deslizamiento menor a 1%, donde se obtiene un 52,67% de efectividad en lazo cerrado y 33% para el caso de lazo abierto, por lo que se recomienda operar con un nivel de deslizamiento suficiente. Esto se puede lograr aumentando el nivel de carga o, en caso de operación en vacío, reduciendo el voltaje de alimentación, de tal forma de aumentar el deslizamiento.

Si se comparan las mismas pruebas para los tres motores evaluados, se observa que el deslizamiento del motor de tres barras rotas es mayor, observándose una clara pérdida de eficiencia y capacidad de torque, mientras que para el motor de barra rota no hay una diferencia notable con el motor sano. Además, el motor de tres barras rotas pierde capacidad de torque, no logrando llegar a la referencia en algunos casos. En lazo abierto, ninguno de los tres motores es capaz de operar a 10 Hz con carga nominal.

Si bien las frecuencias de conmutación evaluadas poseen distintos porcentajes de detectabilidad, no hay una relación clara entre el aumento o disminución de la frecuencia de conmutación para mejorar el diagnóstico de barras rotas. En lazo cerrado la frecuencia de conmutación que posee mayor detectabilidad es la de 10 kHz, mientras que la que posee menor es 7 kHz, donde esta última se ve afectada principalmente por falsos positivos provenientes del motor sano. Para el caso de lazo abierto el primer puesto en detectabilidad se comparte con 10 kHz y 1 kHz, mientras que el peor caso se da en 8,5 kHz. Si bien es posible que la frecuencia de conmutación afecte, se requiere de mediciones sostenidas en el tiempo evaluando condiciones idénticas, de tal forma de obtener una tendencia de resultados que marquen una respuesta clara. El tiempo muerto es otro parámetro que puede afectar el diagnóstico. En las pruebas realizadas no hay una tendencia clara sobre el efecto del tiempo muerto en el diagnóstico, pero si se realizan mediciones de voltaje línea a línea se observa una caída de este, siendo este efecto incremental a medida que se aumenta la frecuencia de conmutación.

Los armónicos de conmutación si bien no son visibles en el rango estudiado, están presentes en las mediciones realizadas. Si se analiza el espectro en altas frecuencias se pueden visualizar utilizando la siguiente ecuación [34]:

$$f_{\text{armonico}_{\text{conmutación}}} = m \cdot f_{\text{sw}} + n \cdot f_e \quad (5.1)$$

donde m es el índice de frecuencia de conmutación, n el índice de frecuencia fundamental, siendo la suma de estos índices un número impar, f la frecuencia de alimentación y f_{sw} la frecuencia de conmutación. Con una frecuencia de alimentación de 50 Hz y frecuencia de conmutación de 1 kHz y 2,5 kHz se pueden observar estos armónicos:

Como se observa en la Fig 5.7 y 5.8, estos armónicos poseen una magnitud considerable, si se analiza la diferencia de magnitud con la fundamental del primer grupo de armónicos de bandas laterales de conmutación se obtienen los resultados de la Tabla 5.18, se ve una tendencia a aumentar su diferencia a medida que se aumenta la frecuencia de conmutación.

Tabla 5.18 Diferencia de magnitud con la fundamental de armónicos de conmutación

f_{sw}	$n = 2$	$n = 4$	$n = 6$
1 kHz	34,05 dB	40 dB	62,7 dB
2,5 kHz	50,3 dB	58,5 dB	51 dB
4 kHz	82 dB	86,8 dB	76,2 dB

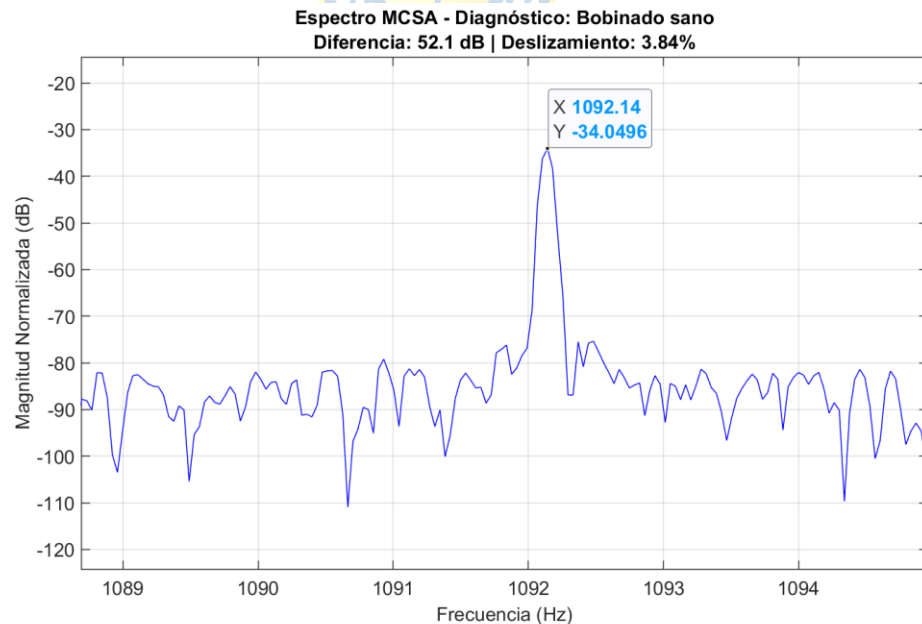


Fig. 5.7 Primer armónico de banda lateral de conmutación - 1khz

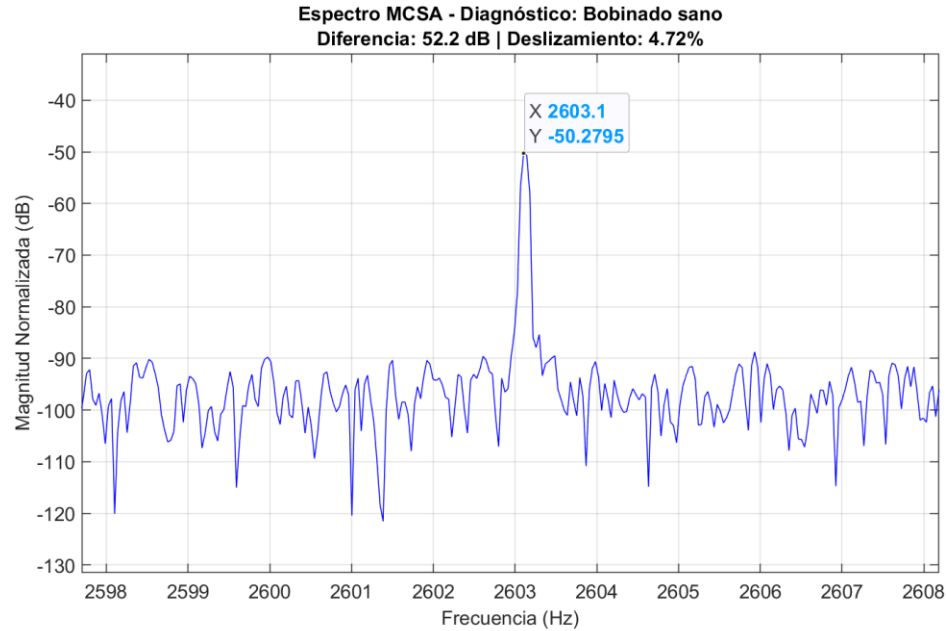


Fig. 5.8 Primer armónico de banda lateral de conmutación - 2,5khz

5.6.1 Lazo abierto

La Tabla 5.19 muestra los resultados de diagnóstico clasificados por frecuencia de conmutación. La mayor tasa de detección se da a los 10 kHz (69,44%), mientras que la segunda a 1 kHz (69,4%), indicando que no hay una relación directa entre la variación de la frecuencia de conmutación y la precisión del diagnóstico utilizando FFT. La Tabla 5.20 muestra los resultados clasificados por motor, donde el motor que posee mayor tasa de detección es el de tres barras rotas y el que posee menor por diferencia es el motor sano.

Tabla 5.19 Diagnósticos clasificados por frecuencia de conmutación - lazo abierto

Frecuencia conmutación	Correcto	Falsos positivos	Falsos negativos
1 kHz	69,4%	9,72%	20,83%
2,5 kHz	68,05%	8,33%	23,61%
4 kHz	66,67%	8,33%	25%
5,5 kHz	68%	16,67%	15,28%
7 kHz	63,89%	23,61%	12,5%
8,5 kHz	61,11%	15,28%	23,61%
10 kHz	69,44%	13,89%	16,67%
Promedio	66,65%	12,5%	19,64%

El algoritmo logra detectar adecuadamente las bandas laterales cuando estas poseen un deslizamiento adecuado para su visualización. Pese a esto, este fenómeno no se repite para todas las mediciones, lo que se traduce en diagnósticos erróneos a pesar de un alto deslizamiento. Si bien estos

son casos aislados y representan un bajo porcentaje de todas las pruebas realizadas, ocurren. En el caso de la Fig. 5.9, se tiene un motor con una barra rota, deslizamiento del 3,52% y unas bandas laterales si bien visibles, no del todo diferenciables en comparación al resto del espectro la corriente. El diagnóstico es erróneo al sobredimensionar la falla, provocando un falso positivo.

Tabla 5.20 Diagnósticos clasificados por motor - lazo abierto

Diagnóstico	Sano	Motor 1 BRB	3 BRB	Total
Correcto	107	111	117	335
Falso positivo	61	9	0	70
Falso negativo	0	48	51	99
Total	168	168	168	504

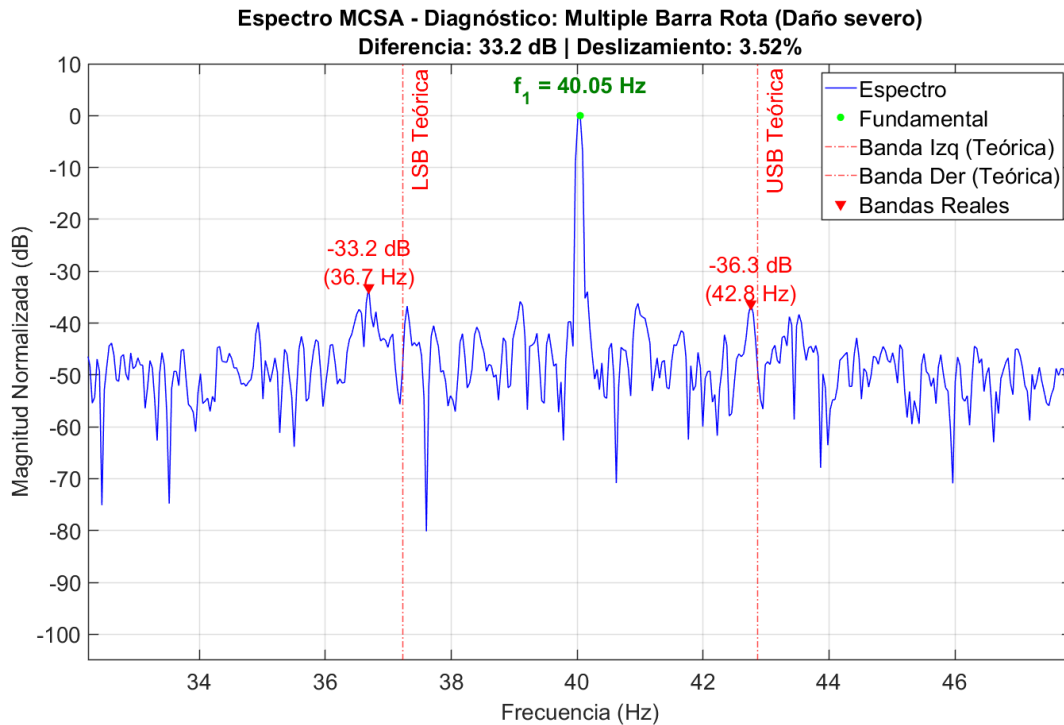


Fig. 5.9 Falso positivo - Motor 1BRB - Lazo abierto

Los falsos positivos son más comunes que los falsos negativos, pudiendo encontrarse en cualquier nivel de deslizamiento a diferencia de los falsos negativos, que se concentran generalmente en mediciones con un deslizamiento menor al 1%, es decir, en pruebas sin carga y en algunas con un 25% de cargas. Las bandas laterales no son diferenciables a simple vista ni poseen una magnitud adecuada para diagnosticar el motor. La Fig. 5.10 muestra una medición con un 0,38% de deslizamiento en un motor de barra rota. El algoritmo detecta el pico de magnitud cerca de un rango

acotado de búsqueda dentro de las bandas laterales teóricas $f(1-2s)$. Si bien detecta de adecuadamente el pico de magnitud, no hay banda lateral visible y la banda real posee una diferencia con la fundamental de 47,7 dB, por lo que el motor se considera sano. Se observan bandas laterales asociadas a oscilaciones mecánicas en 38 – 39 Hz.

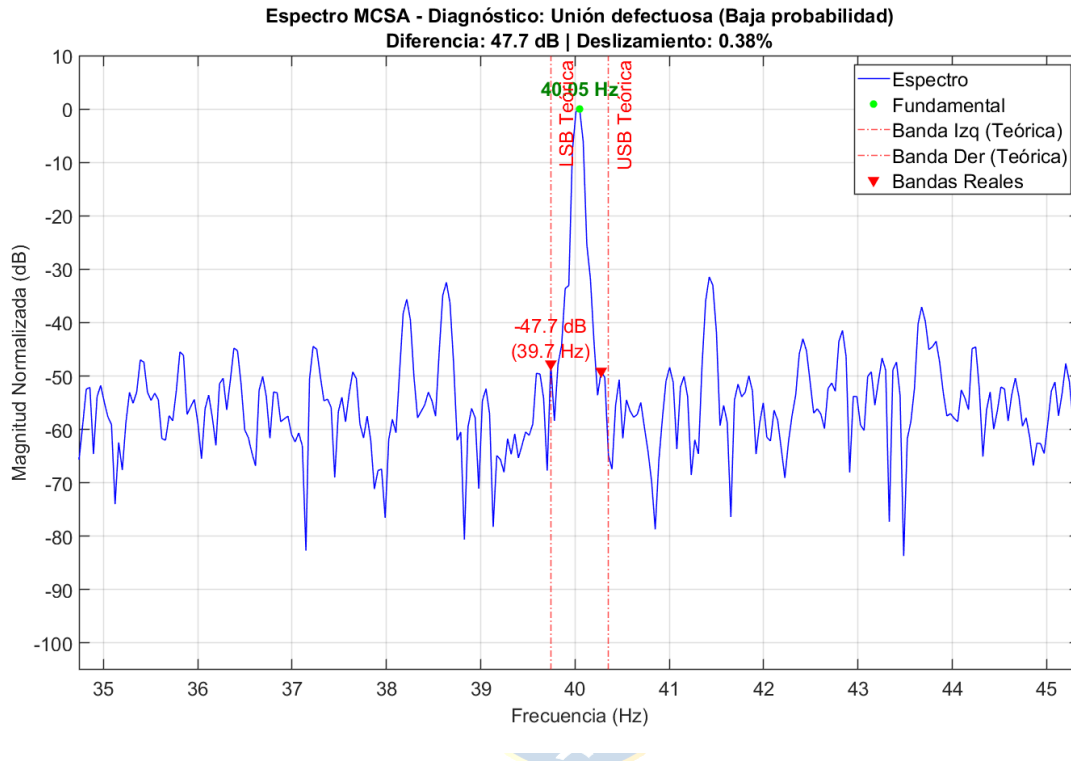


Fig. 5.10 Falso negativo - Motor 1BRB - Lazo abierto

En caso de lazo abierto se observa una gran presencia de falsos positivos en el motor sano desde pruebas sin carga hasta carga nominal, esto se puede atribuir a la presencia de carga proveniente de los motores de una barra rota y tres barras rotas, los cuales si presentan las bandas laterales de falla y al estar acoplados al motor sano, la variación de deslizamiento producida se traduce en una pequeña variación de velocidad vista por los dos motores, por lo que la corriente del motor sano igual se ve afectada. Este fenómeno se conoce como falsos positivos por cargas cíclicas, donde cargas que poseen una variación de velocidad crean bandas laterales que se ubican a distancias similares a las bandas laterales de falla. En este caso estas bandas extra si son bandas laterales de falla, por lo que la ubicación en la que se encuentran es muy parecida o idéntica.

A la vez que el deslizamiento es importante, también es relevante la frecuencia de referencia que se utiliza. Se observa que a medida que se disminuye la frecuencia de referencia es necesario un deslizamiento mayor para obtener un diagnóstico correcto. Entre 50 y 40 Hz es suficiente con un

deslizamiento de 1%, mientras que en 30 Hz a 20 Hz se observa que con un 3% de deslizamiento se obtiene casi totalidad de diagnósticos correctos, mientras que a 10 Hz se requiere casi un 7%.

Los falsos negativos se concentran mayoritariamente en pruebas de 40 Hz a 10 Hz en los motores con una y tres barras rotas, siendo las pruebas a 10 Hz el caso más crítico. En 50 Hz de referencia se obtienen 8 diagnósticos erróneos, mientras que a 10 Hz se tienen 32. Estos resultados concuerdan con lo estudiado por Khelfi & Hamdani, los cuales mencionan dificultades para diagnosticar motores energizados mediante VDF a bajas frecuencia de alimentación en lazo abierto [20].

Este fenómeno se puede asociar con a dos fenómenos. El primero considera que el motor sano posee como carga un motor con falla, la presencia de falla de los motores con una y tres barras rotas inducen oscilaciones de velocidad, las cuales provocan una variación en el deslizamiento que se amplifica proporcionalmente a medida que se baja la frecuencia de alimentación. Esto provoca una estimación de deslizamiento con mayor error que a 50 Hz, donde la oscilación de velocidad y deslizamiento es mínima en comparación a los otros casos estudiados. Además, la oscilación de deslizamiento crea una mayor dispersión espectral de las bandas laterales $f(1 \pm 2s)$, por lo que la magnitud de las bandas laterales se distribuye en un rango de frecuencias y no solo en una, disminuyendo la amplitud máxima de la banda lateral. Como resultado, la banda lateral posee una magnitud atenuada, subestimando la severidad de la falla y derivando en falsos negativos.

El segundo fenómeno que puede influir en los resultados a baja frecuencia es la distribución de corriente magnetizante y corriente activa. La Tabla 5.21 muestra la corriente RMS a 10 Hz en lazo abierto con 1 kHz de conmutación, con boost fijo. Se muestra que la corriente disminuye a medida que se aumenta el nivel de carga. Eso muestra que la corriente magnetizante disminuye a medida que se aumenta la corriente activa. Esto se explica analizando el circuito equivalente del motor de inducción, mostrado en la Fig 5.11. En vacío, el deslizamiento es muy pequeño y la velocidad es cercana a la síncrona, la resistencia $R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$ es muy grande, por lo que la mayoría de la corriente se va por la rama de magnetización. A medida que se aumenta el nivel de deslizamiento o de carga, esta resistencia se va haciendo más pequeña, redistribuyendo la corriente y aumentando la corriente activa, redistribuyendo las ramas magnetizantes y serie.

Tabla 5.21 Corriente a 10 Hz - lazo abierto - 1 kHz de conmutación

Nivel de carga	Corriente RMS aproximada
0%	3 A
25%	2.52 A
50%	2.26 A
75%	2.25 A

Dado que las bandas laterales de falla se visualizan a partir de la corriente de rotor, la cual es proporcional a la corriente activa y no a la magnetizante, las bandas laterales de falla se presentan de forma débil, con una amplitud que subestima la falla debido a esto. Para verificar el efecto de esto se requiere de un análisis fasorial de la corriente, de forma de cuantificar la proporción de corriente activa y magnetizante.

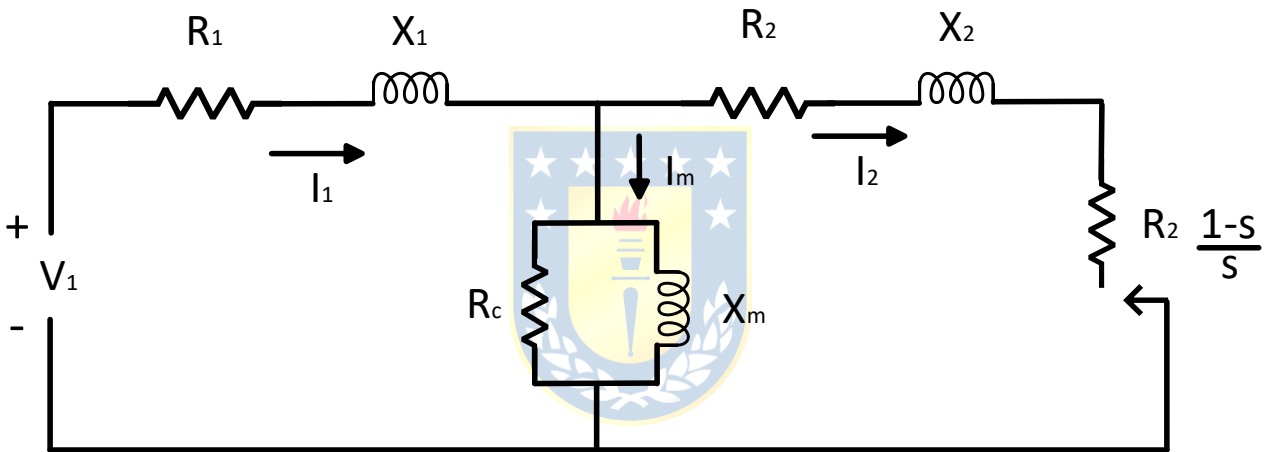


Fig. 5.11 Circuito equivalente MI

5.6.2 Lazo cerrado

Para el caso en lazo cerrado se presenta una mejora en la tasa de detección, superando el 80% el promedio. Según lo mostrado en la Tabla 5.22, la mayor tasa de detección se logra en los 10 kHz (91,18%), logrando una detección total en pruebas con carga, mientras que la peor detección se logra en los 7 kHz (76,47%). Al igual que en el caso abierto, un aumento de la frecuencia de conmutación no implica una mejor tasa de diagnósticos correctos. A diferencia del caso anterior, el motor que posee mejor desempeño es el motor con una barra rota, mientras que el que posee menor tasa de diagnóstico sigue siendo el motor sano según lo mostrado en la Tabla 5.23.

Tabla 5.22 Diagnósticos clasificados por frecuencia de conmutación - lazo cerrado

Frecuencia conmutación	Correcto	Falso positivo	Falso negativo
1 kHz	84,06%	8,7%	7,25%
2,5 kHz	84,05%	8,7%	7,25%
4 kHz	85,5%	5,78%	8,7%
5,5 kHz	78,26%	14,49%	7,25%
7 kHz	76,47%	20,58%	2,94%
8,5 kHz	88,24%	5,88%	5,88%
10 kHz	91,18%	5,88%	2,94%
Promedio	83,96%	10%	6,03%

Tabla 5.23 Diagnósticos clasificados por motor - lazo cerrado - global

Diagnóstico	Motor			Total
	Sano	1 BRB	3 BRB	
Correcto	123	151	128	402
Falso positivo	45	3	0	48
Falso negativo	0	14	16	30
Total	168	168	144	480

De acuerdo con lo expuesto por en el trabajo previo de Mantione et al. [18], la detección de fallas de rotor mediante MCSA en lazos cerrados se dificulta a medida que se aumenta la velocidad de respuesta del controlador. Esto ocurre porque el controlador compensa las oscilaciones de velocidad producidas por barras rotas, atenuando las bandas laterales de falla reflejadas en la corriente de estator.

Sin embargo, en este trabajo se obtienen mejores resultados en lazo cerrado que en lazo abierto. Esto debido a una dinámica lenta del control V/f escalar utilizado, al ser un control lento, las oscilaciones inducidas por barras rotas se mantienen en el espectro de la corriente, y por ende, las bandas laterales son identificables. En frecuencias menores a 40 Hz se obtienen mejores resultados en comparación con lazo abierto. Al aumentar la frecuencia para llegar a la velocidad de referencia se obtiene un mayor deslizamiento y corriente activa. Esto amplifica las bandas laterales en comparación al caso de lazo abierto, donde hay una frecuencia fija, menor deslizamiento y corriente activa.

Esto sugiere que es posible establecer una rutina de diagnóstico en motores alimentados mediante VDF con control V/f en lazo cerrado de velocidad, siempre y cuando el lazo de control se considere lento, de tal forma de no atenuar las bandas laterales de falla los que permiten un mejor diagnóstico en comparación a los de dinámica rápida.

5.7. Variaciones de carga

En esta sección se emula una condición de carga industrial para validar el algoritmo desarrollado, específicamente basada en la industria papelera. Se evalúa una de las secciones críticas de una máquina papelera, como podría ser la prensa de extremo húmedo, la prensa de encolado, la recubridora en máquina o la bobinadora. Estos procesos experimentan cambios grandes y rápidos de carga durante su funcionamiento normal. Estas variaciones de carga son consecuencia de los ajustes de velocidad o presión en los rodillos, necesarios para evitar roturas o arrugas en la hoja del papel. Se utiliza como referencia el paper “Improved Coordinated Response and Disturbance Rejection in the Critical Sections of Paper Machines” de Anibal Valenzuela et al. [31].

Para la evaluación experimental, se aplica un cambio de carga en escalón, simulando un incremento de presión en rodillos de secado brusco desde un 35% hasta un 66,1% del torque nominal del motor evaluado, este escenario simula el “peor caso” de la aplicación, ya que normalmente este incremento se da en forma de rampa. Las pruebas se realizan a velocidad nominal del motor en lazo cerrado, 1425 RPM, y en lazo abierto se evalúa a 50 Hz. Se repite las mediciones para las tres condiciones presentes: sano, una barra rota y con tres barras rotas de rotor.

El perfil de carga se muestra en la Fig 5.12. donde la muestra dura aproximadamente 20 segundos y el cambio de carga se produce al segundo 11 aproximadamente.

La Tabla 5.26 muestra los resultados en los tres motores para variación de carga. Independientemente del método de control, se obtuvo a lo menos un diagnóstico erróneo en cada uno de los motores, mientras que se logra una detección correcta en lazo cerrado para el motor de tres barras rotas y en lazo abierto para el motor de una barra rota.

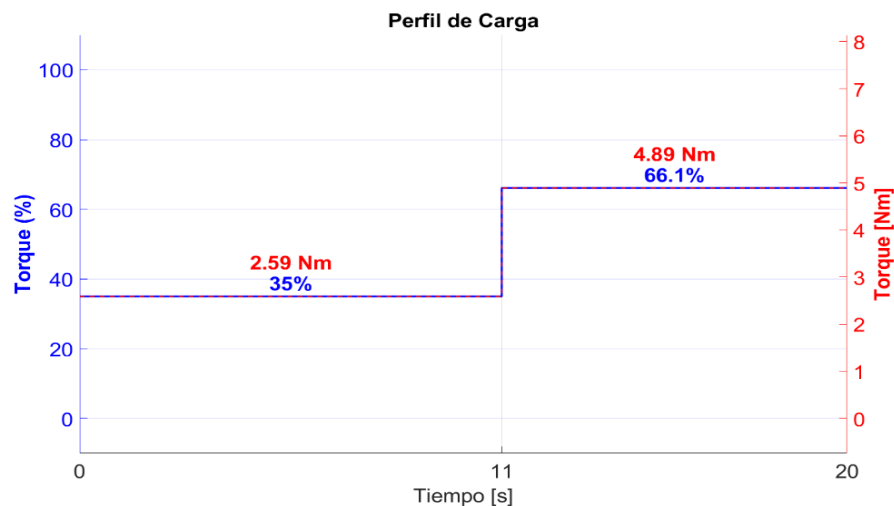


Fig. 5.12 Perfil de carga variable

Tabla 5.24 Resultados ante variación de carga

Lazo	Motor	Magnitud Banda lateral
Lazo cerrado (referencia 1425 RPM)	Sano	37,8 dB
		Falso positivo
	1 BRB	34,3 dB
		Falso positivo
	3 BRB	39,1 dB
		Detección correcta
Lazo abierto (50 Hz)	Sano	44,8 dB
		Falso positivo
	1 BRB	42,3 dB
		Detección correcta
	3 BRB	46,5 dB
		Falso negativo

La Fig 5.13 muestra el espectro de corriente para la prueba en el motor sano en lazo cerrado. Se ven dos picos predominantes en la imagen, que son la fundamental antes y después de la variación de la carga. Para este caso el algoritmo detecta como fundamental la frecuencia que posee un mayor tiempo dentro de la medición, es decir, antes del cambio de carga, en los 48,27 Hz y el segundo pico se da en los 48,96 Hz. El algoritmo calcula las bandas laterales en función de la frecuencia antes del cambio de carga, entregando un deslizamiento y diagnóstico erróneo. Esta forma de espectro se repite en todas las pruebas de lazo cerrado, solo cambiando la magnitud de la banda lateral detectada. Para el caso de una barra rota el algoritmo es capaz de detectar la falla, pero si se analiza el espectro no se aprecia realmente una banda lateral, todo el ruido se mueve en una magnitud alta, al igual que la banda lateral presente.

Por el lado de la velocidad, la Fig 5.14 muestra la velocidad antes, durante y después del impacto de carga. El impacto de carga se realiza a los 12,27 s, donde la velocidad cae durante 0,05 segundos aproximadamente hasta llegar a 1401,56 RPM, para finalmente estabilizarse a los 12,55 segundos en la velocidad de referencia, teniendo una duración de 0,28 s. Si bien el tiempo del impacto de carga es bajo en comparación a la duración de la prueba, es suficiente para alterar por completo el diagnóstico de barras rotas mediante MCSA debido al cambio de frecuencia visto anteriormente.

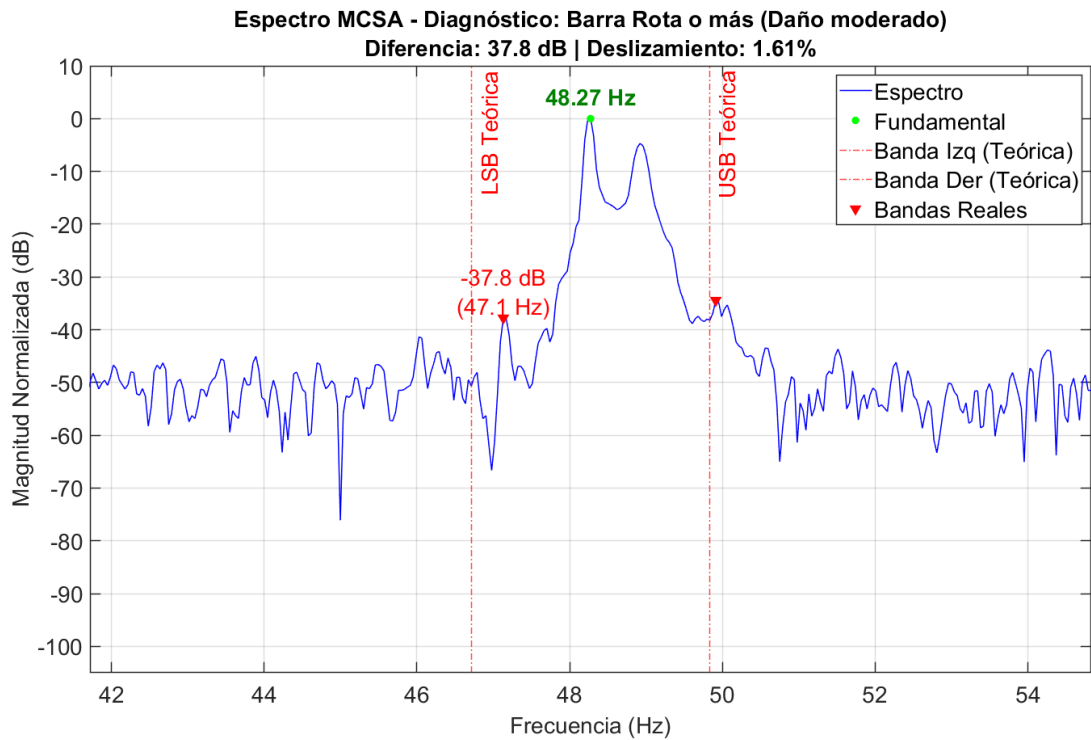


Fig. 5.13 Variación de carga - lazo cerrado motor sano

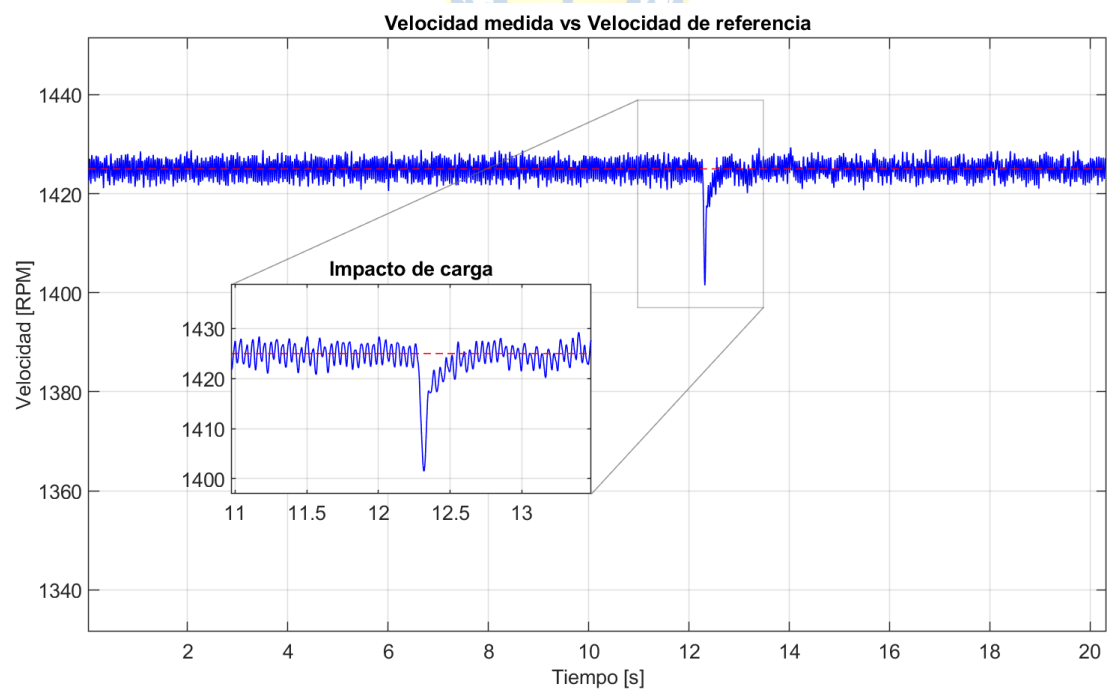


Fig. 5.14 Velocidad motor Cantoni antes, durante y después de variación de carga – lazo cerrado motor sano

Para el caso de lazo abierto, donde la fundamental no cambia, el espectro cambia visualmente, pero sigue siendo ineficaz. Al calcularse mal la posición de las bandas laterales debido a una estimación errónea del deslizamiento, no se puede asociar con certeza las bandas laterales de falla, además de encontrarse alejadas de las teóricas. La Fig. 5.15 muestra el caso para el motor de una barra rota y la Fig. 5.16 la velocidad antes, durante y después de la variación de carga.

La velocidad tiene una caída desde los 1472 RPM aproximadamente hasta 1450 RPM que comienza en 9 s, esta caída dura 0,046 segundos aproximadamente, levemente inferior al caso en lazo cerrado y se estabiliza a los 9,08 s aproximadamente. Si bien la situación desde el punto de vista del diagnóstico no es tan crítica como el caso de lazo cerrado (debido al cambio constante de frecuencia) este induce una estimación de deslizamiento errónea, alejando y no sabiendo verdaderamente si existe banda lateral de falla o se trata de una oscilación mecánica.

En lazo cerrado se ve la situación más crítica. La frecuencia de alimentación tiene cambios antes, durante y después del cambio de carga, esto se traduce en dos picos altos, uno en la fundamental detectada por la FFT (esto depende del tiempo de adquisición y el segundo en el que se hace el cambio de carga, en este caso el cambio de carga se hace aproximadamente en el segundo 12 y se adquieren 20 segundos, por lo que la “fundamental” del algoritmo es la frecuencia antes del cambio de carga). Ante esto, la estimación de deslizamiento y cálculo de bandas laterales a partir de una frecuencia de alimentación que cambia pierde el sentido, este fenómeno se agrava a medida que el cambio de carga aumenta, llevando a un mayor cambio de frecuencia.

Para lazo abierto ocurre algo similar, las “bandas laterales” no son diferenciables a primera vista a diferencia del estado estacionario visto anteriormente, donde sobresalen y son fácilmente identificables, en este caso no se diferencian del resto del espectro. El diagnóstico es inviable, ya que al poseer una estimación de deslizamiento errónea (la velocidad disminuye en el momento que se aplica una carga mayor a la presente) no se puede atribuir esta banda lateral a una banda asociada a una barra rota de rotor.

Si bien solo se estudia un caso con carga variable, se visualiza que el diagnóstico de fallas mediante MCSA y FFT no es el adecuado para transitorios. La FFT observa distintas frecuencias: antes, durante y después del cambio de carga, llevando a una estimación errónea de deslizamiento. La diferencia de dB de las bandas laterales con respecto al resto del espectro no es significativa en los casos estudiados, por lo que no se puede diagnosticar con certeza y es un escenario que induce falsos diagnósticos, siendo no confiable.

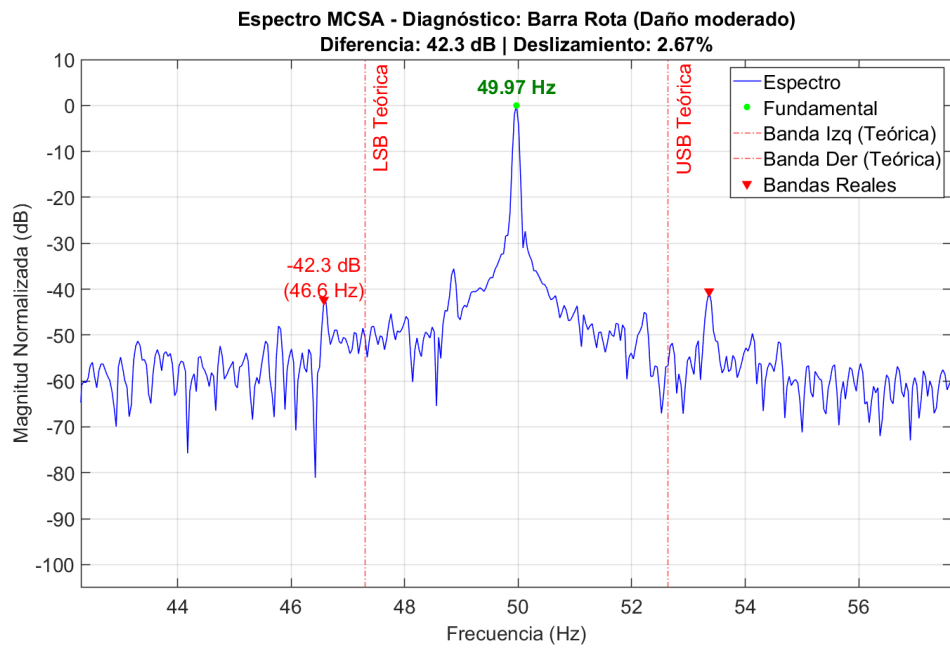


Fig. 5.15 Variación de carga - lazo abierto motor 1 BRB

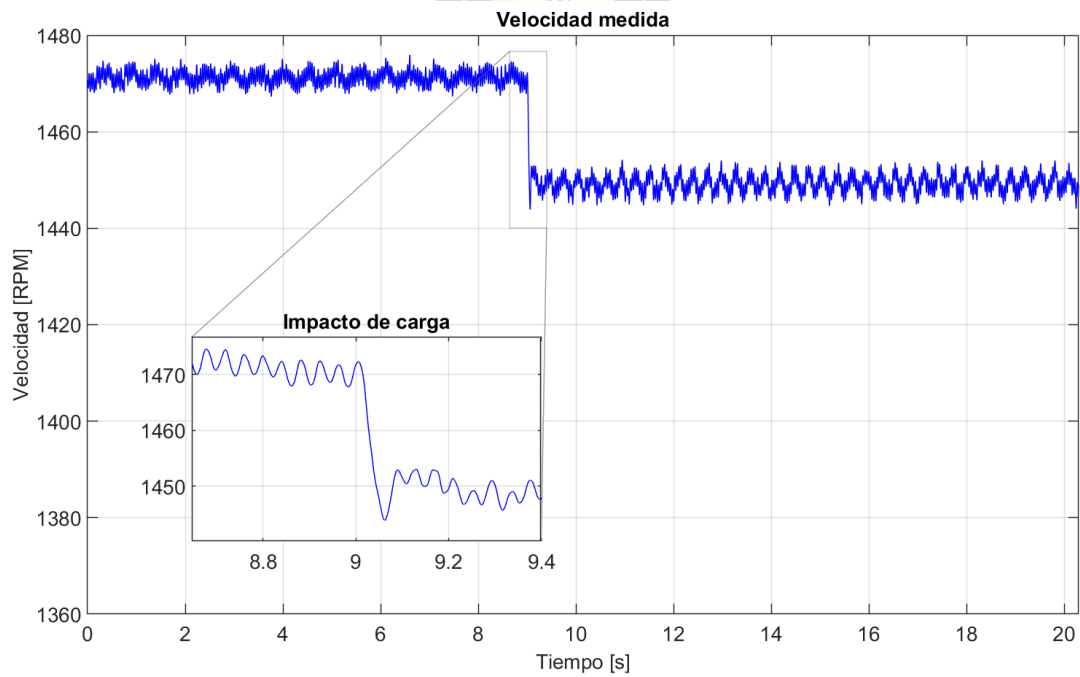


Fig. 5.16 Velocidad motor Cantoni antes, durante y después de variación de carga – lazo abierto motor 1 BRB

5.8. Limitaciones

Como se ha visto los resultados de MCSA pierden fiabilidad ante variaciones de carga usando la FFT como método de análisis del espectro de corriente, tanto en lazo abierto y en lazo cerrado. Las oscilaciones mecánicas como las vistas en la sección anterior afectan en gran medida el espectro de corriente, haciendo inviable e insegura su aplicación para un diagnóstico correcto de motores de inducción.

A pesar de tener una buena sensibilidad y tasa de positivos en estado estacionario y sin variaciones de carga, depende de un deslizamiento mayor a 2% en la gran mayoría de los casos para una buena visualización de bandas laterales, asegurando una buena visibilidad y diagnóstico correcto. Si bien el estimador de severidad es fiable en la mayoría de los casos, no siempre se cumple.

5.8.1 Limitaciones técnicas

La FFT presenta limitaciones como método de análisis de firma de corriente, posee problemas ante variaciones de carga, solo haciéndolo confiable en estado estacionario. A pesar de la alta resolución espectral, la cual está determinada por el tiempo de adquisición, el algoritmo posee dificultades para detectar bandas laterales con un deslizamiento menor al 1%, en deslizamientos bajos las bandas laterales al estar más apegadas a la fundamental se requiere de una mayor precisión, tanto de velocidad, frecuencia y adquisición de datos. Esto se traduce en una mayor precisión del encoder incremental, pinza amperimétrica y una mayor frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos.

La presencia de cargas cíclicas también puede afectar el diagnóstico. En lazo abierto y lazo cerrado se obtiene un peor rendimiento en el motor sano debido a la presencia de un motor con falla como carga. Si bien en el caso de lazo cerrado se atenúa esta situación debido a la corrección de velocidad, sigue presente.

5.8.2 Limitaciones económicas

Lo habitual encontrado en la literatura es implementarlo con un osciloscopio, sonda de corriente y computador para implementar la FFT, usando el mismo procedimiento utilizado en este trabajo, logrando un precio más reducido en comparación a la opción industrial.

La Tabla 5.27 muestra una cotización con componentes encontrados en el mercado chileno con un bajo presupuesto. Se selecciona un osciloscopio con una frecuencia de muestreo de hasta 1

GSa/s, junto a una pinza amperimétrica AC/DC con un ancho de banda de 20 kHz y 65 A, configuración suficiente para diagnosticar motores en estado estacionario de baja y media potencia.

Tabla 5.25 Cotización implementación MCSA en Chile

Componente	Modelo / Descripción	Precio (CLP)
Osciloscopio	UNI-T UPO1102	\$499 900
Pinza amperimétrica	Hantek CC-65	\$114 000
Total		\$ 613 900

Si se considera una solución disponible en la industria la inversión necesaria aumenta significativamente. Empresas como ALL-TEST Pro ofrecen analizadores de motores a través de firmas eléctricas capaces de detectar fallas de rotor, excentricidad, aislamiento, etc. Los equipos que aplican MCSA oscilan entre los \$7 700 USD en su configuración más básica y \$53 000 USD en la más completa [36]. La marca Megger ofrece el analizador dinámico de motores eléctricos Baker EXP4000, también incorporando MCSA para diagnóstico de barras rotas, mostrado en la Fig. 5.17 y con un precio aproximado de \$50 000 USD. Ninguno de los dos equipos nombrados anteriormente y mostrados en la Fig 5.18 se comercializan de forma oficial en Chile.

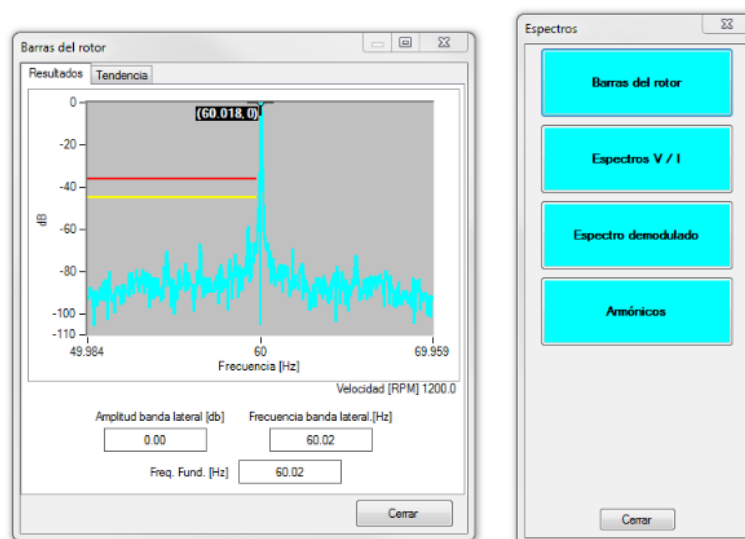
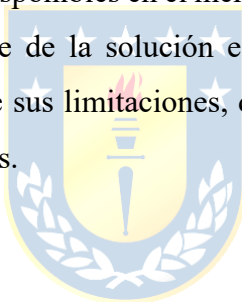


Fig. 5.17 Interfaz MCSA Megger Baker EXP4000



Fig. 5.18 Soluciones en la industria a) ALL-TEST Pro MD III b) Megger Baker EXP4000

La solución de la Tabla 5.25 permite implementar mantenimiento predictivo mediante MCSA de forma económica con componentes disponibles en el mercado nacional, sin requerir la importación de equipos de alto costo. Independiente de la solución elegida, se debe conocer las condiciones operativas del accionamiento además de sus limitaciones, de tal forma de interpretar correctamente los resultados y evitar falsos diagnósticos.



Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

A partir de lo descrito en la metodología, se revisa literatura técnica existente sobre MCSA y su aplicación en VDFs, a partir de esta revisión se selecciona el estimador de severidad de Thomson como criterio de diagnóstico para los tres motores evaluados. Se determina una frecuencia de muestreo y tiempo de adquisición de tal forma de tener una resolución espectral de 0,05 Hz, el cual permite una correcta detección de bandas laterales.

Se desarrolla un algoritmo de MCSA para motores de inducción utilizando FFT y ventana Hanning para reducir fuga espectral, el cual posee la capacidad de detectar bandas laterales de falla de rotor a distintas frecuencias fundamentales y deslizamientos, permitiendo diagnosticar a partir de la magnitud de estas. El algoritmo es capaz de recibir como entrada lecturas de corriente de osciloscopio y lecturas de corriente y velocidad de MicroLabBox, entregando como resultado el espectro de corriente, deslizamiento estimado, magnitud de la banda lateral de falla y estado del motor. Además del desarrollo del algoritmo, se crea un esquema de control y un interfaz en ControlDesk que permite cambiar parámetros de interés, de tal forma de determinar cómo estos contribuyen y alteran el diagnóstico de barras rotas.

Se valida el algoritmo de forma experimental mediante un lazo de control desarrollado, primero se diseña y simula en Simulink, asegurándose de un correcto funcionamiento antes de su vinculación a MLB, para posteriormente validarlo de forma experimental en estado estacionario, variación de carga y distintas frecuencias de alimentación, además de distintas frecuencias de conmutación. Para esto se utiliza HITL a través de dSPACE - MLB. A partir de los resultados se determina la sensibilidad del algoritmo, las detecciones correctas, falsos positivos y falsos negativos, estableciendo condiciones favorables y desfavorables para el diagnóstico.

La plataforma desarrollada de HITL junto a la habilitación de MLB queda disponible en el LEME para futuras investigaciones tanto de control, accionamientos, diagnóstico y mantenimiento predictivo.

6.2. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se ha demostrado la viabilidad y efectividad del algoritmo de detección de fallas mediante MCSA y la FFT para el diagnóstico de barras rotas de rotor en MIJA alimentados mediante VDF en rango de frecuencias de alimentación de 10 Hz a 50 Hz. En lazo cerrado

se supera el umbral definido en la metodología, alcanzando un 91,2% de precisión en el caso más favorable y casi un 84% en promedio, mientras que en lazo abierto se obtiene una precisión promedio de 66,65% y un 61,1% de detección en el caso más difícil. Se cuenta con una menor tasa de detección a medida que se baja la frecuencia de alimentación, especialmente en frecuencias inferiores a 30 Hz.

La diferencia entre lazo cerrado y abierto se debe al control V/f escalar implementado. La dinámica lenta del control conserva las bandas laterales de falla, además que la corrección de frecuencia aumenta el deslizamiento y corriente activa, aumentando la tasa de detección. En lazo abierto, el menor deslizamiento a bajas frecuencias y la mayor corriente magnetizante respecto de la activa dificultan la detección, siendo recomendable operar con un deslizamiento superior a 1% entre 40 y 50 Hz, superior a 3% entre 20 y 30 Hz y superior al deslizamiento nominal a 10 Hz.

Se comprueba que el ruido de conmutación del VDF no afecta ni altera el diagnóstico en ninguna de las frecuencias de conmutación evaluadas, siendo posible una correcta visualización del espectro de corriente en el rango de frecuencias de 1 a 10 kHz, no se observa una relación directa entre la frecuencia de conmutación y la tasa de detección.

La utilización del estimador de severidad de Thomson ha sido establecido dentro de la literatura elaborado a partir de resultados empíricos con motores alimentados directamente desde la red, sin embargo, al ser un estimador empírico obtenido en base a casos históricos, su aplicación en motores alimentados por VDF debe ser con conocimiento operativo del accionamiento.

Se evidencian limitaciones propias de MCSA mediante FFT ante variaciones de carga, lazos de control y transientes de velocidad. Al depender de la estacionariedad de la señal, las variaciones de velocidad alteran la estimación de la fundamental y el deslizamiento, desplazando y ocultando las bandas laterales de falla, dificultando un diagnóstico robusto.

El diagnóstico de barras rotas a través de MCSA en motores alimentados por VDF requiere considerar el contexto de operación, no solo el deslizamiento o el nivel de carga. En lazo cerrado al estabilizarse la velocidad, el deslizamiento calculado es más preciso, pero un control con respuesta rápida de este puede enmascarar las bandas laterales de falla. En este caso se tiene un control lento, el cual no dificulta el diagnóstico. Por el lado del lazo abierto se aprecia una dificultad de diagnosticar a bajas frecuencias. Un menor deslizamiento en comparación a lazo cerrado y una mayor variación de este, además de una alta corriente magnetizante afectan directamente el diagnóstico, un lazo abierto que compense estos parámetros puede mejorar los resultados. Además del lazo de control, el tipo de carga y su estacionariedad es fundamental, una carga variable resulta en un cálculo de fundamental

erróneo y desplaza las bandas laterales de falla. Ignorar estos factores puede llevar a falsos positivos o negativos, por lo que es necesario conocer las condiciones de operación.

6.3. Trabajo Futuro

Si bien los resultados actuales validan el algoritmo en un entorno experimental para un MIJA y VDF específico, es deseable extender el estudio para asegurar la robustez del método, se sugiere realizar pruebas en motores de distintas clase y tamaños, como puede ser motores NEMA B y C, que poseen deslizamientos nominales hasta 5%, lo que supondría mejores condiciones para diagnosticar, así como distintos modelos de VDF. Realizar pruebas en motores de distintas potencias permitiría determinar si los criterios de detección encontrados son generalizables o dependen del motor y VDF específico utilizado.

Además de probar en distintos motores o VDFs, es de interés abordar otros esquemas de control, con compensación de tiempo muerto o utilizar otros esquemas más rápidos y precisos como compensación de deslizamiento o control directo de torque, de tal forma de apreciar si estos lazos de control enmascaran las frecuencias de fallas o si, por el contrario, permiten oportunidades de diagnóstico. Además de probar en controles diseñados para investigación, se debe comprobar el funcionamiento del algoritmo en un VDF comercial con los esquemas de control que este trae integrado.

Como se vio anteriormente, MCSA junto a la FFT presenta limitaciones ante variaciones de carga y velocidad, se recomienda extender en técnicas que aumenten la tasa de detección de fallas, como puede ser técnicas de tiempo frecuencia como las vistas en estado del arte, transformada Wavelet, transformada de Fourier de tiempo corto y Análisis avanzado de transiente de corriente son algunas opciones, además de analizar si estas poseen dificultades al operar con un motor alimentado desde un VDF.

Evaluar en un entorno más “industrializado” es relevante, es decir, en condiciones más parecidas a una industria, como cargas no lineales - variables y distorsión armónica presente, estos son factores que pueden alterar las firmas de corriente y aumentar la tasa de falsos positivos y negativos.

Bibliografia

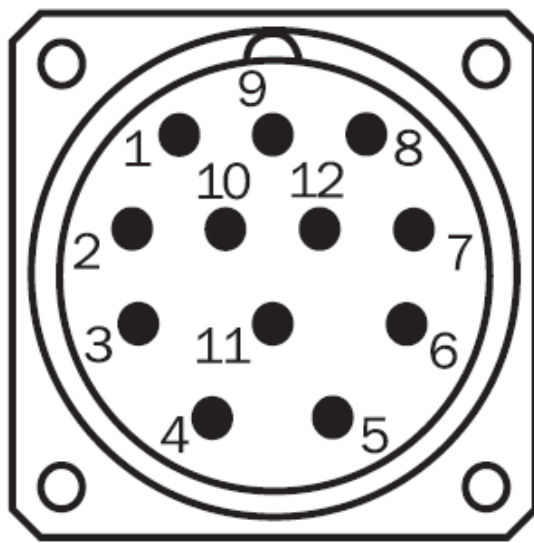
- [1] S. Gundewar and P. Kane, "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor," *J. vibrat. Eng. Technol.*, vol. 2020, pp. 643-674, Oct. 2020.
- [2] Alsofyani, I. M., & Idris, N. R. N. (2013). A review on sensorless techniques for sustainable reliability and efficient variable frequency drives of induction motors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 111–121.
- [3] Thomson, W. T., & Culbert, I. (2016). *Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors*. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Orłowska-Kowalska, T., Wolkiewicz, M., Pietrzak, P., Skowron, M., Ewert, P., Tarchala, G., Krzysztofiak, M., & Kowalski, C. T. (2022). Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives – state of the art and future challenges. *IEEE Access*, 1.
- [5] A. Sheikh, S. T. Bakhsh, M. Irfan, N. B. M. Nor, and G. Nowakowski, "A review to diagnose faults related to three-phase industrial induction motors," *J. Failure Anal. Prevention*, vol. 22, no. 4, pp. 1546–1557, Aug. 2022.
- [6] S. B. Lee et al., "Condition Monitoring of Industrial Electric Machines: State of the Art and Future Challenges," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 158-167, Dec. 2020.
- [7] M. M. Swamy, J. -K. Kang and K. Shirabe, "Power Loss, System Efficiency, and Leakage Current Comparison Between Si IGBT VFD and SiC FET VFD With Various Filtering Options," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3858-3866, Sept.-Oct. 2015.
- [8] W. Zhu, D. De Gaetano, X. Chen, G. W. Jewell and Y. Hu, "A Review of Modeling and Mitigation Techniques for Bearing Currents in Electrical Machines With Variable-Frequency Drives," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 125279-125297, 2022.
- [9] Chapman, S. J. (2006). *Maquinas Electricas*. McGraw-Hill Interamericana.
- [10] "Performance Analysis of Three-Phase Induction Motor with AC Direct and VFD," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol 331, no. 1, 2018.

- [11] R. Saidur, S. Mekhilef, M. B. Ali, A. Safari, and H. A. Mohammed, "Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 543-550, 2012.
- [12] Mordor Intelligence. "Variable Frequency Drive Market size & share analysis – Growth trends & forecasts (2025-2030). Disponible: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/variable-frequency-drive-market-industry>.
- [13] R. A. Patel, B. Bhalja and M. A. Alam, "Condition Monitoring of Three-Phase Induction Motor," 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE), Kolkata, India, pp. 16-20, 2020.
- [14] S. Sbaa, N. Bessous, R. Pusca and R. Romary, "A comparative study dedicated to rotor failure detection in induction motors using MCSA, DWT, and EMD techniques," 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-11.
- [15] Y. Yang, M. M. M Haque, D. Bai, and W. Tang, "Fault Diagnosis of electric motors using deep learning algorithms and its application: A review," *Energies*, vol 14, no. 21, pp. 1-27, Oct. 2021.
- [16] C. G. Dias, L. C. da Silva and W. A. Luz Alves, "A Histogram of Oriented Gradients Approach for Detecting Broken Bars in Squirrel-Cage Induction Motors," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 6968-6981, Sept. 2020.
- [17] L. A. García-Escudero, O. Duque-Perez, M. Fernandez-Temprano and D. Morinigo-Sotelo, "Robust Detection of Incipient Faults in VSI-Fed Induction Motors Using Quality Control Charts," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 3076-3085, May-June 2017.
- [18] Y. Yordanov and V. Gyurov, "Research into the Possibilities for Diagnosis of Asynchronous Electric Drives Powered by a Frequency Inverter in the Presence of Unbalance," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, pp. 1-5, 2020.
- [19] L. Mantione, T. Garcia-Calva, V. Fernandez-Cavero, L. Frosini and D. Morinigo-Sotelo, "Broken Rotor Bar Detection in Closed Loop Inverter Fed Induction Motors Through Time-Frequency Techniques," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 61, no. 1, pp. 209-217, Jan.-Feb. 2025.

- [20] H. Khelfi and S. Hamdani, "Mono-Dimensional Demodulation Techniques for Diagnosing Broken Rotor Bars Faults Within Inverter-Fed Induction Machine at Low Load Operation Condition," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas, TX, USA, pp. 512-517, 2021.
- [21] D. García-Pérez, M. Saeed, I. Díaz, J. M. Enguita, J. M. Guerrero and F. Briz, "Machine Learning for Inverter-Fed Motors Monitoring and Fault Detection: An Overview," in IEEE Access, vol. 12, pp. 27167-27179, 2024.
- [22] P. Gangsar and R. Tiwiri, "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review," Mech. Syst. Signal Process., vol. 144, no. 4, Oct. 2020.
- [23] B. Battulga, M. Faizan Shaikh, J. Wook Chun, S. Bong Park, S. Shim and S. B. Lee, "MEMS Accelerometer and Hall Sensor-Based Identification of Electrical and Mechanical Defects in Induction Motors and Driven Systems," in IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 19, pp. 31104-31113, 1 Oct. 1, 2024.
- [24] M. E. E.-D. Atta, D. K. Ibrahim, M. Gilany, and A. F. Zobaa, "Adaptive scheme for detecting induction motor incipient broken bar faults at various load and inertia conditions," Sensors, vol. 22, no. 1, p. 365, Jan. 2022.
- [25] N. Bhole and S. Ghodke, "Motor Current Signature Analysis for Fault Detection of Induction Machine—A Review," 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Navi Mumbai, India, pp. 1-6, 2021.
- [26] K. Kudelina, T. Vaimann, B. Asad, A. Rassõlkin, A. Kallaste, and G. Demidova, "Trends and Challenges in Intelligent Condition Monitoring of Electrical Machines Using Machine Learning," Appl. Sci, vol. 11, no. 6, p. 2761, Mar 2021.
- [27] J. A. Antonino-Daviu and E. G. Strangas, "Fault Diagnosis, Prognosis, and Reliability of Electric Motors and Drives: Open Questions, Challenges and Perspectives," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 731-737.
- [28] G. Fonseca. "Análisis de firma de corriente para la detección de fallas de rotor en motores de inducción de baja potencia". Memoria de título, Universidad de Concepción, Concepción, 2025.

- [29] Q. Li, J. Chen and D. Jiang, "Periodic variation in the effect of switching frequency on the harmonics of power electronic converters," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 35-45, Sept. 2020.
- [30] Z. Zhang, Y. Hu, X. Chen, G. W. Jewell and H. Li, "A Review on Conductive Common-Mode EMI Suppression Methods in Inverter Fed Motor Drives," in IEEE Access, vol. 9, pp. 18345-18360, 2021.
- [31] M. A. Hannan, J. A. Ali, P. J. Ker, A. Mohamed, M. S. H. Lipu and A. Hussain, "Switching Techniques and Intelligent Controllers for Induction Motor Drive: Issues and Recommendations," in IEEE Access, vol. 6, pp. 47489-47510, 2018.
- [32] J. Sabarad and G. H. Kulkarni, "Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter," 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), Bengaluru, India, 2015, pp. 232-237.
- [33] J. S. Lee and G. Choi, "Modeling and hardware-in-the-loop system realization of electric machine drives — A review," in CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 5, no. 3, pp. 194-201, Sept. 2021.
- [34] D. G. Holmes and T. A. Lipo, Pulse width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003.
- [35] P. P. Castro and M. A. Valenzuela, "Space vector modeling of a SAG mill drive and evaluation during mill shutdowns," 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Addison, TX, USA, 2015, pp. 1-12.
- [36] ALL-TEST Pro. "Motor diagnostic tool" (2025) Disponible: <https://alltestpro.com/motor-diagnostic-tools/>

Anexo A. Esquemas MicroLabBox y Encoder incremental



PIN Male connector			Color of wires cable outlet	Signal TTL/HTL	Signal SIN/COS 1.0 V _{SS}	Explanation
M12 8-pin	M23 12-pin	M12 12-pin				
1	6	7	Brown	A-	COS-	Signal line
2	5	6	White	A	COS+	Signal line
3	1	9	Black	B-	SIN-	Signal line
4	8	8	Pink	B	SIN+	Signal line
5	4	4	Yellow	Z-	Z	Signal line
6	3	11	Lila	Z	Z	Signal line
7	10	12	Blue	GND	GND	Ground connection of the encoder
8	12	5	Red	+U _S	+U _S	Supply voltage (potential free to housing)
-	9	2	-	n.c.	n.c.	Not connected
-	2	3	-	n.c.	n.c.	Not connected
-	11	1	-	n.c.	n.c.	Not connected
-	7 ¹	10	-	0-SET ¹	n.c.	Zeropulse teach ¹
Shield	Shield	Shield	Shield	Shield	Shield	Shield connected to housing on side of encoder. Connected to ground on side of control.

Fig. A.1 Mapeo y pines de conexión encoder incremental



Anexo B. Tablas de diagnóstico

B.1 Lazo abierto

Tabla B.1 Resultados en lazo abierto para 1 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	38,4 dB	53 dB	43 dB	39,1 dB	52,1 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	44,3 dB	39,6 dB	41,8 dB	39,8 dB	39,3 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	35,1 dB	38,8 dB	33,1 dB	31,2 dB	29 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	36,9 dB	56,1 dB	44,7 dB	52,1 dB	51,6 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	37,1 dB	50 dB	42,9 dB	40,8 dB	39,2 dB
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	36 dB	35,2 dB	34,9 dB	32,9 dB	30 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	50,5 dB	56,2 dB	45,8 dB	40,8 dB	53,5 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	52,1 dB	51,8 dB	42 dB	40,3 dB	39,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	63,5 dB	40,6 dB	34,9 dB	32,4 dB	29,5 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	56,4 dB	60,5 dB	46,6 dB	41 dB	46,1 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	50,8 dB	46,3 dB	43,8 dB	40,1 dB	38,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	48,8 dB	42,3 dB	36,9 dB	34 dB	31,4 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	59,7 dB	46,9 dB	55 dB	53,6 dB	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	50,1 dB	51 dB	46,4 dB	44,7 dB	*
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	
	3 BRB	49,2 dB	48,9 dB	41,3 dB	38,5 dB	*
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

Tabla B.2 Información adicional: lazo abierto - 1 kHz conmutación

Velocidad de referencia	Motor	Parámetro	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	s	0,23%	1,3%	2,09%	3,04%	3,84%
		n_{media}	1496,88 RPM	1483,26 RPM	1467,81 RPM	1452,45 RPM	1432,4 RPM
		f_e	50,011 Hz	50,091 Hz	49,971 Hz	49,931 Hz	49,7 Hz
		n_{sinc}	1500,32 RPM	1502,72 RPM	1499,12 RPM	1497,92 RPM	1490 RPM
	1 BRB	s	1,06%	0,71%	1,72%	2,86%	4,67%
		n_{media}	1496,35 RPM	1489,1 RPM	1473,9 RPM	1456,23 RPM	1435,99 RPM
		f_e	50,414 Hz	49,991 Hz	49,991 Hz	49,971 Hz	50,212 Hz
		n_{sinc}	1512,42 RPM	1499,72 RPM	1499,72 RPM	1499,12 RPM	1506,35 RPM
	3 BRB	s	0,29%	0,76%	2,49%	3,25%	4,99%
		n_{media}	1495,98 RPM	1488,86 RPM	1471,8 RPM	1450,34 RPM	1426,6 RPM
		f_e	50,011 Hz	50,011 Hz	50,313 Hz	49,971 Hz	50,051 Hz
		n_{sinc}	1500,32 RPM	1500,32 RPM	1509,38 RPM	1499,12 RPM	1501,52 RPM
40 Hz	Sano	s	0,34%	1,24%	2,4%	40 dB	4,51%
		n_{media}	1196,44 RPM	1185,62 RPM	1173,07 RPM	1157,25 RPM	1145,41 RPM
		f_e	40,032 Hz	40,016 Hz	40,064 Hz	40,225 Hz	39,984 Hz
		n_{sinc}	1200,97 RPM	1200,48 RPM	1201,93 RPM	1206,76 RPM	1199,52 RPM
	1 BRB	s	0,18%	50 dB	42,9 dB	3,23%	5,41%
		n_{media}	1196,83 RPM	1190,14 RPM	1177,09 RPM	1161,67 RPM	1134,63 RPM
		f_e	39,968 Hz	39,984 Hz	40,084 Hz	40,016 Hz	39,984 Hz
		n_{sinc}	1199,05 RPM	1199,52 RPM	1201,45 RPM	1200,48 RPM	1199,52 RPM
	3 BRB	s	0,32%	0,88%	2,06%	3,06%	5,8%
		n_{media}	1196,64 RPM	1190,34 RPM	1175,34 RPM	1156,8 RPM	1130,91 RPM
		f_e	40,016 Hz	40,032 Hz	40 Hz	39,77 Hz	40,016 Hz
		n_{sinc}	1200,49 RPM	1200,97 RPM	1200 RPM	1193,32 RPM	1200,48 RPM
30 Hz	Sano	s	0,3%	1,39%	3,02%	4,49%	5,77%
		n_{media}	897,55 RPM	886,66 RPM	874,47 RPM	859,15 RPM	848,64 RPM
		f_e	30,008 Hz	29,972 Hz	30,057 Hz	29,984 Hz	30,02 Hz
		n_{sinc}	900,23 RPM	899,15 RPM	901,67 RPM	899,51 RPM	900,6 RPM
	1 BRB	s	0,26%	0,97%	2,42%	3,99%	7,18%
		n_{media}	897,19 RPM	890,81 RPM	878,44 RPM	863,62 RPM	834,89 RPM
		f_e	29,984 Hz	29,984 Hz	30,008 Hz	29,984 Hz	29,984 Hz
		n_{sinc}	899,51 RPM	899,51 RPM	900,23 RPM	899,51 RPM	899,51 RPM
	3 BRB	s	0,26%	0,23%	2,42%	4,84%	8,06%

20 Hz		n_{media}	897,17 RPM	891,05 RPM	877,07 RPM	859,03 RPM	830,35 RPM
		f_e	29,984 Hz	29,769 Hz	29,96 Hz	30,092 Hz	30,1 Hz
		n_{sinc}	899,51 RPM	893,08 RPM	898,79 RPM	902,75 RPM	903,1 RPM
		s	0,25%	1,28%	3,1%	6,38%	7,45%
	Sano	n_{media}	598,15 RPM	588,01 RPM	577,13 RPM	561,18 RPM	550,78 RPM
		f_e	19,989 Hz	19,854 Hz	19,854 Hz	19,981 Hz	19,838 Hz
		n_{sinc}	599,67 RPM	595,62 RPM	595,62 RPM	599,43 RPM	595,15 RPM
		s	0,36%	1,23%	2,61%	5,38%	10,43%
	1 BRB	n_{media}	597,73 RPM	592 RPM	580,8 RPM	567,15 RPM	536,68 RPM
		f_e	19,997 Hz	19,981 Hz	19,878 Hz	19,981 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	599,91 RPM	599,34 RPM	596,33 RPM	599,43 RPM	599,19 RPM
		s	0,37%	1,3%	3,41%	6,04%	8,99%
	3 BRB	n_{media}	597,69 RPM	592,09 RPM	579,24 RPM	563,43 RPM	542,94 RPM
		f_e	19,997 Hz	19,997 Hz	19,989 Hz	19,989 Hz	19,886 Hz
		n_{sinc}	599,91 RPM	599,91 RPM	599,67 RPM	599,67 RPM	596,57 RPM
		s	1,08%	3,43%	6,4%	10,33%	
10 Hz	Sano	n_{media}	298,87 RPM	290,13 RPM	280,75 RPM	268,87 RPM	
		f_e	10,071 Hz	10,015 Hz	9,999 Hz	9,994 Hz	
		n_{sinc}	302,13 RPM	300,44 RPM	299,96 RPM	299,83 RPM	
		s	0,35%	2,01%	5,17%	9,29%	
	1 BRB	n_{media}	298,68 RPM	293,68 RPM	284,34 RPM	271,97 RPM	
		f_e	9,991 Hz	9,99 Hz	9,995 Hz	9,995 Hz	
		n_{sinc}	299,72 RPM	299,71 RPM	299,84 RPM	299,84 RPM	
		s	0,47%	2,32%	5,51%	9,61%	
	3 BRB	n_{media}	298,54 RPM	293,58 RPM	283,31 RPM	269,31 RPM	
		f_e	9,998 Hz	10,019 Hz	9,995 Hz	9,931 Hz	
		n_{sinc}	299,95 RPM	300,56 RPM	299,84 RPM	297,93 RPM	
		s					

Tabla B.3 Resultados en lazo abierto para 2,5 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	53,9 dB	50 dB	43,3 dB	52,5 dB	52,2 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	51,6 dB	47,6 dB	42,5 dB	40,3 dB	39,1 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	33,3 dB	39,6 dB	33,1 dB	31,1 dB	28,8 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	62,9 dB	58,9 dB	45,3 dB	39,5 dB	47,1 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	34,3 dB	49,7 dB	42 dB	40 dB	38,7 dB
		Falso positivo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	45,5 dB	36,3 dB	34,5 dB	31,9 dB	29,4 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	57,9 dB	54,2 dB	46,4 dB	40,4 dB	54,4 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	45,1 dB	51,2 dB	42,5 dB	40,5 dB	38,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	53,4 dB	40 dB	35,3 dB	32,1 dB	28,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	48,9 dB	54,3 dB	45,6 dB	42,4 dB	46,7 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	47,6 dB	48,7 dB	44,3 dB	40,9 dB	38,2 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	52,8 dB	42,7 dB	37,4 dB	33,3 dB	31,1 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	44,4 dB	54,5 dB	54,6 dB	49,9 dB	*
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	40,2 dB	51,8 dB	48,4 dB	43,7 dB	*
		Detección correcta	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	
	3 BRB	49,4 dB	47 dB	40,9 dB	37,1 dB	*
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

Tabla B.4 Información adicional: lazo abierto - 2,5 kHz conmutación

Velocidad de referencia	Motor	Parámetro	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	s	0,23%	1,21%	2,12%	3,92%	4,72%
		n_{media}	1496,93 RPM	1483,31 RPM	1467,87 RPM	1452 RPM	1431,16 RPM
		f_e	50,011 Hz	50,051 Hz	49,991 Hz	50,373 Hz	50,07 Hz
		n_{sinc}	1500,32 RPM	1501,52 RPM	1499,72 RPM	1511,2 RPM	1502,12 RPM
	1 BRB	s	0,26%	0,07%	1,87%	3,1%	4,33%
		n_{media}	1496,46 RPM	1489,17 RPM	1473,96 RPM	1456,18 RPM	1435,91 RPM
		f_e	50,01 Hz	49,673 Hz	50,071 Hz	50,091 Hz	50,031 Hz
		n_{sinc}	1500,32 RPM	1490,19 RPM	1502,12 RPM	1502,73 RPM	1500,92 RPM
	3 BRB	s	0,84%	0,83%	2,79%	3,36%	4,22%
		n_{media}	1496,07 RPM	1489,03 RPM	1471,37 RPM	1450,43 RPM	1427,3 RPM
		f_e	50,292 Hz	50,051 Hz	50,455 Hz	50,031 Hz	49,673 Hz
		n_{sinc}	1508,77 RPM	1501,52 RPM	1513,64 RPM	1500,92 RPM	1490,19 RPM
40 Hz	Sano	s	0,26%	1,17%	1,59%	3,64%	3,92%
		n_{media}	1197,33 RPM	1185,46 RPM	1172,97 RPM	1156,83 RPM	1145,16 RPM
		f_e	40,014 Hz	39,984 Hz	39,73 Hz	40,016 Hz	39,73 Hz
		n_{sinc}	1200,48 RPM	1199,53 RPM	1191,9 RPM	1200,49 RPM	1191,9 RPM
	1 BRB	s	0,42%	1,06%	1,31%	3,23%	5,46%
		n_{media}	1196,83 RPM	1190,15 RPM	1177,21 RPM	1161,26 RPM	1135,44 RPM
		f_e	40,064 Hz	40,096 Hz	39,762 Hz	40 Hz	40,032 Hz
		n_{sinc}	1201,93 RPM	1202,9 RPM	1192,85 RPM	1200 RPM	1200,96 RPM
	3 BRB	s	0,4%	0,76%	1,51%	3,56%	5,72%
		n_{media}	1196,58 RPM	1190,37 RPM	1175,3 RPM	1156,84 RPM	1130,87 RPM
		f_e	40,048 Hz	39,984 Hz	39,777 Hz	39,984 Hz	39,984 Hz
		n_{sinc}	1201,45 RPM	1199,53 RPM	1193,32 RPM	1199,53 RPM	1199,53 RPM
30 Hz	Sano	s	0,33%	1,43%	2,75%	5,33%	6,44%
		n_{media}	897,59 RPM	886,62 RPM	874,4 RPM	858,12 RPM	847,31 RPM
		f_e	30,02 Hz	29,984 Hz	29,972 Hz	30,213 Hz	30,189 Hz
		n_{sinc}	900,59 RPM	899,51 RPM	899,15 RPM	906,39 RPM	905,66 RPM
	1 BRB	s	0,25%	0,96%	2,42%	4,4%	7,18%
		n_{media}	897,22 RPM	890,9 RPM	878,43 RPM	863,02 RPM	834,54 RPM
		f_e	29,983 Hz	29,984 Hz	30 Hz	30,092 Hz	29,971 Hz
		n_{sinc}	899,5 RPM	899,51 RPM	900 RPM	902,75 RPM	899,14 RPM
	3 BRB	s	0,42%	0,97%	2,61%	4,84%	8,14%

20 Hz		n_{media}	897,19 RPM	891,09 RPM	876,76 RPM	859,03 RPM	828,65 RPM
		f_e	30,032 Hz	29,996 Hz	30,008 Hz	30,092 Hz	30,068 Hz
		n_{sinc}	900,95 RPM	899,87 RPM	900,23 RPM	902,76 RPM	902,03 RPM
		s	0,3%	1,89%	3,79%	6,66%	8,24%
	Sano	n_{media}	598,12 RPM	587,85 RPM	576,71 RPM	560,16 RPM	549,8 RPM
		f_e	19,997 Hz	19,973 Hz	19,981 Hz	20,005 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	599,91 RPM	599,19 RPM	599,43 RPM	600,15 RPM	599,2 RPM
		s	0,41%	1,19%	4%	5,68%	10,97%
	1 BRB	n_{media}	597,71 RPM	592,03 RPM	580,56 RPM	566,51 RPM	533,46 RPM
		f_e	20 Hz	19,973 Hz	20,158 Hz	20,021 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	600 RPM	599,19 RPM	604,75 RPM	600,63 RPM	599,19 RPM
		s	0,29%	1,26%	3,6%	6,15%	9,81%
	3 BRB	n_{media}	597,7 RPM	592 RPM	579,02 RPM	562,78 RPM	541,73 RPM
		f_e	19,981 Hz	19,989 Hz	20,021 Hz	19,989 Hz	20,021 Hz
		n_{sinc}	599,43 RPM	599,67 RPM	600,63 RPM	599,67 RPM	600,63 RPM
		s	0,33%	3,29%	6,67%	10,83%	
10 Hz	Sano	n_{media}	298,84 RPM	289,96 RPM	280,28 RPM	267,57 RPM	
		f_e	9,995 Hz	9,995 Hz	10,011 Hz	10 Hz	
		n_{sinc}	299,84 RPM	299,84 RPM	300,32 RPM	300 RPM	
		s	0,54%	1,41%	5,24%	9,75%	
	1 BRB	n_{media}	298,7 RPM	293,61 RPM	284 RPM	271 RPM	
		f_e	10,011 Hz	9,927 Hz	9,991 Hz	10 Hz	
		n_{sinc}	300,23 RPM	297,81 RPM	299,72 RPM	300 RPM	
		s	0,51%	2,2%	6,38%	10,51%	
	3 BRB	n_{media}	298,55 RPM	293,11 RPM	282,73 RPM	268,1 RPM	
		f_e	10,003 Hz	9,991 Hz	10,067 Hz	9,987 Hz	
		n_{sinc}	300,08 RPM	299,72 RPM	302,01 RPM	299,6 RPM	
		s					

Tabla B.5 Resultados en lazo abierto para 4 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	53 dB	51,2 dB	43,6 dB	52,5 dB	52,1 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	38,5 dB	45,7 dB	43,1 dB	40,3 dB	38,3 dB
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	44,6 dB	39,2 dB	33,1 dB	31,7 dB	28,6 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	34,2 dB	55,7 dB	44,9 dB	40 dB	56,6 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	38,5 dB	48,3 dB	42,4 dB	40,6 dB	38,5 dB
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	60,2 dB	41,4 dB	33,7 dB	31,7 dB	29,5 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	52,5 dB	54,4 dB	45,5 dB	40,5 dB	54,4 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	52,8 dB	48,7 dB	41,7 dB	40,4 dB	37,9 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	53,1 dB	40,3 dB	34,7 dB	31 dB	27,9 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	46,3 dB	59,7 dB	50,6 dB	40,8 dB	46,9 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	49,1 dB	51 dB	43,6 dB	41,5 dB	36,1 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	49,3 dB	42,7 dB	36 dB	33,2 dB	30 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	55,5 dB	54,9 dB	54,6 dB	48,5 dB	
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	45,1 dB	50,1 dB	47,3 dB	42,9 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	
	3 BRB	45,3 dB	47,3 dB	39 dB	36,7 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

20 Hz		n_{media}	897,17 RPM	891,1 RPM	876,45 RPM	858,55 RPM	826,66 RPM
		f_e	29,96 Hz	29,96 Hz	30,02 Hz	29,757 Hz	29,936 Hz
		n_{sinc}	898,79 RPM	898,8 RPM	900,6 RPM	892,72 RPM	898,07 RPM
		s	0,22%	1,95%	3,83%	6,69%	8,43%
	Sano	n_{media}	598,12 RPM	587,74 RPM	576,47 RPM	559,32 RPM	548,65 RPM
		f_e	19,981 Hz	19,981 Hz	19,981 Hz	19,981 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	599,43 RPM	599,43 RPM	599,43 RPM	599,43 RPM	599,19 RPM
		s	0,38%	1,33%	3,22%	5,75%	11,37%
	1 BRB	n_{media}	597,65 RPM	591,93 RPM	580,13 RPM	565,66 RPM	531 RPM
		f_e	19,997 Hz	19,997 Hz	19,981 Hz	20 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	599,91 RPM	599,9 RPM	599,43 RPM	600 RPM	599,19 RPM
		s	0,25%	0,6%	3,43%	6,48%	9,9%
10 Hz		n_{media}	597,71 RPM	592,06 RPM	578,67 RPM	561,7 RPM	540,23 RPM
		f_e	19,973 Hz	19,854 Hz	19,973 Hz	20,02 Hz	19,99 Hz
		n_{sinc}	599,19 RPM	595,62 RPM	599,19 RPM	600,63 RPM	599,67 RPM
		s	0,29%	3,19%	6,66%	11,09%	
	Sano	n_{media}	298,84 RPM	289,93 RPM	299,72 RPM	266,47 RPM	
		f_e	9,991 Hz	9,983 Hz	9,991 Hz	9,99 Hz	
		n_{sinc}	299,72 RPM	299,48 RPM	279,75 RPM	299,71 RPM	
		s	0,34%	2,14%	5,36%	10,09%	
	1 BRB	n_{media}	298,7 RPM	293,53 RPM	283,65 RPM	269,91 RPM	
		f_e	9,991 Hz	9,998 Hz	9,991 Hz	10,007 Hz	
		n_{sinc}	299,72 RPM	299,95 RPM	299,72 RPM	300,2 RPM	
		s	0,39%	1,42%	5,83%	11,54%	
	3 BRB	n_{media}	298,53 RPM	297,7 RPM	282,35 RPM	266,71 RPM	
		f_e	9,991 Hz	9,923 Hz	9,995 Hz	10,051 Hz	
		n_{sinc}	299,72 RPM	297,7 RPM	299,84 RPM	301,52 RPM	
		s					

Tabla B.7 Resultados en lazo abierto para 5,5 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	45,2 dB	46,9 dB	41,7 dB	49,7 dB	47,8 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	42,5 dB	47,5 dB	40,7 dB	40,3 dB	38,4 dB
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	36,5 dB	38,5 dB	39,9 dB	31,4 dB	28,5 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	36,4 dB	43 dB	45,7 dB	40,3 dB	53,1 dB
		Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	35,6 dB	42,2 dB	42,5 dB	40,6 dB	38,4 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	46,4 dB	40,6 dB	33,7 dB	31,7 dB	28,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	48,6 dB	38,8 dB	40 dB	40,5 dB	46,9 dB
		Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	39,3 dB	39,1 dB	40 dB	39,6 dB	38,2 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	56,7 dB	40,3 dB	34,7 dB	31,6 dB	27,5 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	52 dB	40 dB	40,1 dB	40,5 dB	43,8 dB
		Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo
	1 BRB	51 dB	41,5 dB	40,5 dB	40,7 dB	35,9 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	49,6 dB	37,3 dB	36,4 dB	33 dB	29,5 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	49,5 dB	50,9 dB	46 dB	44,3 dB	
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	
	1 BRB	43,9 dB	47,7 dB	41,2 dB	41,3 dB	
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	
	3 BRB	45,4 dB	47,3 dB	40,2 dB	36,1 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

20 Hz		n_{media}	897,15 RPM	891,06 RPM	876,37 RPM	857,9 RPM	824,97 RPM
		f_e	30,02 Hz	29,77 Hz	30,09 Hz	29,995 Hz	29,995 Hz
		n_{sinc}	900,6 RPM	893 RPM	902,75 RPM	899,86 RPM	899,86 RPM
		s	0,22%	1,97%	4,15%	6,91%	8,12%
	Sano	n_{media}	598,12 RPM	587,65 RPM	576,17 RPM	558,48 RPM	547,28 RPM
		f_e	19,981 Hz	19,981 Hz	20,037 Hz	19,997 Hz	19,854 Hz
		n_{sinc}	599,43 RPM	599,43 RPM	601,11 RPM	599,91 RPM	595,62 RPM
		s	0,13%	1,42%	3,29%	5,92%	11,89%
	1 BRB	n_{media}	597,69 RPM	591,86 PM	579,74 RPM	564,6 RPM	528,56 RPM
		f_e	19,949 Hz	20,013 Hz	19,981 Hz	20 Hz	19,997 Hz
		n_{sinc}	598,47 RPM	600,39 RPM	599,43 RPM	600 RPM	599,91 RPM
		s	0,37%	1,57%	4,09%	6,48%	10,03%
	3 BRB	n_{media}	597,71 RPM	591,94 RPM	578,4 RPM	561 RPM	538,66 RPM
		f_e	19,997 Hz	20,045 Hz	20,1 Hz	19,997 Hz	19,957 Hz
		n_{sinc}	599,91 RPM	601,35 RPM	603,05 RPM	599,91 RPM	598,71 RPM
		s	0,33%	3,32%	6,85%	11,91%	
10 Hz	Sano	n_{media}	298,33 RPM	289,77 RPM	279,51 RPM	264,54 RPM	
		f_e	9,994 Hz	9,99 Hz	10,002 Hz	10,01 Hz	
		n_{sinc}	299,83 RPM	299,71 RPM	300,07 RPM	300,3 RPM	
		s	0,4%	2,37%	6,08%	9,79%	
	1 BRB	n_{media}	298,63 RPM	293,42 RPM	282,97 RPM	268,44 RPM	
		f_e	9,995 Hz	10,019 Hz	10,043 Hz	9,919 Hz	
		n_{sinc}	299,84 RPM	300,56 RPM	301,28 RPM	297,57 RPM	
		s	0,48%	2,05%	6,05%	11,46%	
	3 BRB	n_{media}	298,51 RPM	293,35 RPM	282,03 RPM	265,36 RPM	
		f_e	10 Hz	9,983 Hz	10,007 Hz	9,991 Hz	
		n_{sinc}	300 RPM	299,48 RPM	300,2 RPM	299,72 RPM	
		s					

Tabla B.9 Resultados en lazo abierto para 7 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	34,9 dB	51,2 dB	42,7 dB	48,3 dB	46,8 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	39,7 dB	42,9 dB	43,1 dB	39,4 dB	37,7 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	34,8 dB	39,3 dB	32,7 dB	30,7 dB	28,2 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	60,5 dB	32,3 dB	33,5 dB	39,6 dB	51,7 dB
		Detección correcta ^{oo}	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	47,7 dB	43,8 dB	33,3 dB	39,1 dB	38,5 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	50,3 dB	39,4 dB	31,5 dB	31,3 dB	28,9 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	58 dB	33 dB	33,4 dB	38 dB	45,5 dB
		Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	45,8 dB	33 dB	33,2 dB	40,3 dB	36,6 dB
		Falso negativo	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	48,6 dB	31 dB	32,1 dB	33,2 dB	26,6 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	51,9 dB	41,8 dB	40,2 dB	38,8 dB	40,5 dB
		Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo
	1 BRB	33,5 dB	43,5 dB	39,1 dB	38,7 dB	34,5 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo
	3 BRB	59,8 dB	39,3 dB	35,6 dB	32,5 dB	28,5 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	54,9 dB	53,9 dB	47,9 dB	45,8 dB	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	46 dB	42,4 dB	46,7 dB	42,6 dB	*
		Falso negativo	Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	
	3 BRB	48,1 dB	40,6 dB	39,3 dB	34,6 dB	*
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

20 Hz		n_{media}	897,14 RPM	890,96 RPM	876,07 RPM	857,26 RPM	823,51 RPM
		f_e	29,96 Hz	30 Hz	29,972 Hz	30,02 Hz	29,88 Hz
		n_{sinc}	898,79 RPM	900 RPM	899,15 RPM	900,59 RPM	896,64 RPM
		s	0,22%	1,95%	3,1%	7,08%	9,61%
	Sano	n_{media}	598,12 RPM	587,54 RPM	575,76 RPM	557,22 RPM	545,97 RPM
		f_e	19,981 Hz	19,973 Hz	19,807 Hz	19,99 Hz	20,134 Hz
		n_{sinc}	599,43 RPM	599,19 RPM	594,2 RPM	599,67 RPM	604,02 RPM
		s	0,45%	1,95%	3,53%	6,01%	11,82%
	1 BRB	n_{media}	597,72 RPM	591,78 RPM	579,45 RPM	563,63 RPM	525,43 RPM
		f_e	20,013 Hz	20,118 Hz	20,021 Hz	19,989 Hz	19,862 Hz
		n_{sinc}	600,39 RPM	603,53 RPM	600,63 RPM	599,67 RPM	595,86 RPM
		s	1,12%	1,93%	3,57%	5,87%	9,96%
	3 BRB	n_{media}	597,71 RPM	591,87 RPM	578,04 RPM	560,19 RPM	536,09 RPM
		f_e	20,15 Hz	20,118 Hz	19,981 Hz	19,838 Hz	19,846 Hz
		n_{sinc}	604,51 RPM	603,53 RPM	599,43 RPM	595,15 RPM	595,38 RPM
		s	0,9%	3,41%	6,93%	12,92%	
10 Hz	Sano	n_{media}	298,82 RPM	289,62 RPM	278,96 RPM	262,57 RPM	
		f_e	10,051 Hz	9,995 Hz	9,991 Hz	10,05 Hz	
		n_{sinc}	301,52 RPM	299,84 RPM	299,72 RPM	301,5 RPM	
		s	0,49%	2,16%	5,68%	10,48%	
	1 BRB	n_{media}	298,59 RPM	293,36 RPM	282,82 RPM	267,32 RPM	
		f_e	10 Hz	9,994 Hz	9,995 Hz	9,995 Hz	
		n_{sinc}	300 RPM	299,83 RPM	299,84 RPM	299,84 RPM	
		s	0,31%	2,29%	6,21%	12,61%	
	3 BRB	n_{media}	298,54 RPM	293,31 RPM	281,45 RPM	263,71 RPM	
		f_e	9,983 Hz	10 Hz	10 Hz	10,06 Hz	
		n_{sinc}	299,48 RPM	300 RPM	300 RPM	301,7 RPM	
		s					

Tabla B.11 Resultados en lazo abierto para 8,5 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	56 dB	50,3 dB	42,9 dB	46,6 dB	39,2 dB
		Correcto	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo
	1 BRB	38 dB	48,9 dB	40,8 dB	38,5 dB	38 dB
		Detección correcta	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	54,2 dB	39,2 dB	32,8 dB	30,2 dB	27,4 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	35,8 dB	50,1 dB	53,3 dB	51,2 dB	39,5 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo
	1 BRB	46 dB	40,5 dB	42,5 dB	39,6 dB	38 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	50 dB	40,2 dB	34,4 dB	31,7 dB	28,5 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	43 dB	49,6 dB	44,9 dB	39,5 dB	48,8 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	48,6 dB	47,9 dB	40,6 dB	39,8 dB	36,1 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	55,1 dB	39,5 dB	34,1 dB	31,3 dB	26,1 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	44,9 dB	49,9 dB	45,5 dB	40,6 dB	35,6 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo
	1 BRB	50,3 dB	47,5 dB	47,1 dB	39,9 dB	34 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Falso positivo
	3 BRB	51 dB	41,1 dB	35,5 dB	32,2 dB	27,8 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	49,7 dB	46,1 dB	44,1 dB	48 dB	
		Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	
	1 BRB	47,9 dB	46,7 dB	40,3 dB	40,3 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	
	3 BRB	43,5 dB	46,5 dB	39,6 dB	34,5 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	

20 Hz		n_{media}	896,96 RPM	890,77 RPM	875,77 RPM	856,63 RPM	821,44 RPM
		f_e	29,96 Hz	30,02 Hz	29,983 Hz	30,128 Hz	30,032 Hz
		n_{sinc}	898,8 RPM	900,59 RPM	899,5 RPM	903,84 RPM	900,95 RPM
		s	0,27%	1,31%	4,13%	7,27%	9,25%
	Sano	n_{media}	597,81 RPM	587,35 RPM	574,93 RPM	559,18 RPM	544,41 RPM
		f_e	19,981 Hz	19,838 Hz	19,989 Hz	20,102 Hz	19,997 Hz
		n_{sinc}	599,43 RPM	595,15 RPM	599,67 RPM	603 RPM	599,91 RPM
		s	0,44%	1,99%	3,46%	6,17%	12,76%
	1 BRB	n_{media}	597,74 RPM	591,63 RPM	579,16 RPM	562,7 RPM	522,75 RPM
		f_e	20,013 Hz	20,121 Hz	19,997 Hz	19,989 Hz	19,973 Hz
		n_{sinc}	600,39 RPM	603,62 RPM	599,91 RPM	599,67 RPM	599,19 RPM
		s	0,93%	1,27%	3,68%	7,27%	10,27%
	3 BRB	n_{media}	597,71 RPM	591,81 RPM	577,61 RPM	559,18 RPM	534,03 RPM
		f_e	20,11 Hz	19,981 Hz	19,989 Hz	20,1 Hz	19,838 Hz
		n_{sinc}	603,29 RPM	599,43 RPM	599,67 RPM	603,05 RPM	595,15 RPM
		s	0,68%	2,75%	7,05%	13,05%	
10 Hz	Sano	n_{media}	298,51 RPM	289,4 RPM	278,36 RPM	260,4 RPM	
		f_e	10,019 Hz	9,919 Hz	9,983 Hz	9,983 Hz	
		n_{sinc}	300,56 RPM	297,57 RPM	299,48 RPM	299,5 RPM	
		s	0,34%	1,41%	5,83%	11,44%	
	1 BRB	n_{media}	298,58 RPM	293,27 RPM	282,37 RPM	265,44 RPM	
		f_e	9,987 Hz	9,915 Hz	9,995 Hz	9,991 Hz	
		n_{sinc}	299,6 RPM	297,46 RPM	299,84 RPM	299,72 RPM	
		s	0,44%	2,17%	6,39%	12,65%	
	3 BRB	n_{media}	298,53 RPM	293,21 RPM	280,9 RPM	262 RPM	
		f_e	9,995 Hz	9,991 Hz	10 Hz	9,998 Hz	
		n_{sinc}	299,84 RPM	299,72 RPM	300 RPM	299,95 RPM	
		s					

Tabla B.13 Resultados en lazo abierto para 10 kHz conmutación

Velocidad sincrónica	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
50 Hz	Sano	57,6 dB	48,6 dB	41,5 dB	51,5 dB	51,2 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	43,7 dB	38,9 dB	41,3 dB	39,8 dB	37,8 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	43,2 dB	38,4 dB	32,8 dB	30,8 dB	27,1 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
40 Hz	Sano	35,5 dB	53,4 dB	44,2 dB	52,2 dB	52,2 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	51,1 dB	48,7 dB	40,7 dB	33,2 dB	40 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	3 BRB	39,2 dB	36,2 dB	33,7 dB	31,4 dB	28,1 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
30 Hz	Sano	44,9 dB	49,8 dB	46,3 dB	39,8 dB	53,7 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	43,8 dB	42,2 dB	42,2 dB	41 dB	35,7 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	46,3 dB	39,7 dB	34,9 dB	31,4 dB	26,5 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
20 Hz	Sano	54,9 dB	43,2 dB	44,8 dB	39,6 dB	53,2 dB
		Detección correcta	Falso positivo	Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta
	1 BRB	47,5 dB	48 dB	42,5 dB	39,8 dB	33,5 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Falso positivo
	3 BRB	51 dB	41,8 dB	35 dB	30,8 dB	27,2 dB
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
10 Hz	Sano	52,5 dB	48,6 dB	52,5 dB	50,5 dB	
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	66,6 dB	48,4 dB	40,3 dB	41,3 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	
	3 BRB	50,6 dB	47 dB	39,6 dB	32,4 dB	
		Falso negativo	Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	

20 Hz		n_{media}	897,05 RPM	890,88 RPM	875,47 RPM	855,72 RPM	826 RPM
		f_e	29,984 Hz	29,757 Hz	29,971 Hz	29,995 Hz	29,995 Hz
		n_{sinc}	899,51 RPM	892,72 RPM	899,14 RPM	899,96 RPM	899,96 RPM
		s	0,15%	2,14%	4,2%	7,28%	9,64%
	Sano	n_{media}	598,08 RPM	587,3 RPM	574,28 RPM	555,12 RPM	542,54 RPM
		f_e	19,965 Hz	20 Hz	19,981 Hz	19,957 Hz	20,013 Hz
		n_{sinc}	598,95 RPM	600 RPM	599,43 RPM	598,71 RPM	600,39 RPM
		s	0,32%	0,67%	2,8%	5,76%	13,57%
	1 BRB	n_{media}	597,75 RPM	591,61 RPM	578,71 RPM	561,55 RPM	519,57 RPM
		f_e	19,989 Hz	19,854 Hz	19,846 Hz	19,862 Hz	20,047 Hz
		n_{sinc}	599,67 RPM	595,62 RPM	595,38 RPM	595,86 RPM	601,11 RPM
		s	0,21%	1,43%	3,81%	7,03%	10,57%
10 Hz	3 BRB	n_{media}	597,7 RPM	591,79 RPM	577,06 RPM	557,5 RPM	533,06 RPM
		f_e	19,965 Hz	20,013 Hz	19,997 Hz	19,989 Hz	19,87 Hz
		n_{sinc}	598,95 RPM	600,39 RPM	599,91 RPM	599,67 RPM	596,09 RPM
		s	0,28%	2,91%	7,38%	14,33%	
	Sano	n_{media}	597,73 RPM	289,16 RPM	277,61 RPM	257,38 RPM	
		f_e	19,981 Hz	9,927 Hz	9,991 Hz	10 Hz	
		n_{sinc}	599,43 RPM	297,81 RPM	299,72 RPM	300,4 RPM	
		s	0,54%	1,61%	5,92%	12,05%	
	1 BRB	n_{media}	298,46 RPM	293,13 RPM	281,85 RPM	263,6 RPM	
		f_e	10,002 Hz	9,931 Hz	9,987 Hz	9,991 Hz	
		n_{sinc}	300,07 RPM	297,93 RPM	299,6 RPM	299,72 RPM	
		s	0,48%	2,2%	6,4%	13,03%	
	3 BRB	n_{media}	298,51 RPM	293,11 RPM	280,43 RPM	260,34 RPM	
		f_e	10 Hz	9,991 Hz	9,987 Hz	9,98 Hz	
		n_{sinc}	300 RPM	299,72 RPM	299,6 RPM	299,37 RPM	
		s					

B.2 Lazo cerrado

Tabla B.15 Resultados en lazo cerrado para 1 kHz conmutación

Velocidad de referencia	Motor	0%	25%	Carga 50%	75%	100%
1500 RPM	Sano	37,3 dB	46,2 dB	49,8 dB	47,8 dB	*
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	1 BRB	36,9 dB	37,1 dB	37,3 dB	44,4 dB	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
	3 BRB	35 dB	29,5 dB	29,8 dB	*	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta		
1200 RPM	Sano	37,1 dB	42,3 dB	49,4 dB	56,1 dB	51,5 dB
		Falso positivo	Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	49 dB	41,9 dB	40,9 dB	39,6 dB	39,8 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	36,8 dB	32,7 dB	30,2 dB	30,7 dB	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
900 RPM	Sano	36,6 dB	48,7 dB	49,7 dB	50,8 dB	50,8 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	32,7 dB	37,9 dB	37,4 dB	39,3 dB	44,1 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	36,3 dB	32,8 dB	30,2 dB	30,2 dB	*
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	
600 RPM	Sano	33 dB	49,7 dB	48,7 dB	50 dB	49,4 dB
		Falso positivo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	51,1 dB	36,4 dB	38,7 dB	39,3 dB	38,6 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	54,4 dB	34 dB	30,8 dB	30,8 dB	33,7 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
300 RPM	Sano	58,6 dB	49,5 dB	53,1 dB	55,3 dB	49,7 dB
		Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	1 BRB	47,9 dB	35,3 dB	37,1 dB	37,6 dB	41,3 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta
	3 BRB	48,9 dB	36,5 dB	34,1 dB	32,3 dB	33,1 dB
		Falso negativo	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta	Detección correcta

*pruebas no realizadas debido a limitaciones nominales

