

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DIAGNÓSTICO DE FALLOS ELECTROMECAÑICOS
EN MOTORES ELÉCTRICOS MEDIANTE EL
ANÁLISIS AVANZADO DEL FLUJO MAGNÉTICO Y
SU IMPLEMENTACIÓN EN HARDWARE**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. ISRAEL ZAMUDIO RAMÍREZ

DIRIGIDA POR:

DR. D. JOSÉ ALFONSO ANTONINO DAVIU

DR. D. ROQUE ALFREDO OSORNIO RÍOS

Valencia, Julio de 2023

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	31
1.1 Antecedentes.....	32
1.2 Objetivos de la tesis.....	40
1.2.1 Objetivo general.....	40
1.2.2 Objetivos particulares:.....	40
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	42
2.1 Introducción.....	42
2.2 Clasificación de averías en motores eléctricos de inducción.....	44
2.2.1 Fallos en rodamientos.....	44
2.2.2 Barras de rotor rotas.....	48
2.2.3 Desalineamientos.....	53
2.2.4 Fallos en engranajes.....	55
2.2.5 Fallos en el aislamiento.....	57
2.2.6 Resumen de componentes frecuenciales amplificadas debido a fallos en señales de corriente.	60
3. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE SEÑALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	62
3.1 Análisis en régimen permanente.....	63
3.1.1 Transformada de Fourier y algoritmo transformada rápida de Fourier (FFT).....	63
3.1.2 Indicadores estadísticos y no estadísticos.....	65
3.1.3 Indicador de fallo basado en la energía DWT ().....	69
3.1.4 Fractales.....	72
3.1.5 Entropía wavelet.....	74
3.2 Análisis en estado transitorio.....	76
3.2.1 Short Time Fourier Transform (STFT).....	77
3.2.2 Algoritmo de clasificación de señales para la estimación del contenido frecuencial de una señal en el tiempo (algoritmo MUSIC).....	79

3.2.3 Transformada wavelet.....	82
3.2.4 Transformada wavelet discreta (DWT).....	83
3.2.5 Principio de incertidumbre en la transformada wavelet.....	85
3.2.6 Familias wavelet madre.....	86
3.2.7 Transformada wavelet discreta inversa (IDWT).....	88
3.3 Análisis discriminante lineal.....	89
3.4 Clasificación de datos mediante redes neuronales artificiales (RNA).....	90
3.5 Detección automática del arranque del motor y del régimen permanente.....	92
4. ANÁLISIS DEL FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA CONDICIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.....	94
4.1 Componentes frecuenciales amplificadas en señales de flujo magnético de dispersión debido a fallos en motores de inducción.....	96
4.1.1 Componentes frecuenciales relacionadas a barras de rotor rotas.....	96
4.1.2 Componentes frecuenciales relacionadas a cortocircuitos entre espiras.....	98
4.1.3 Componentes frecuenciales relacionadas a fallas mecánicas.....	98
4.1.4 . Resumen de componentes frecuenciales amplificadas debido a fallos en señales de flujo magnético.....	101
4.1.5 Evolución de componentes de falla durante el transitorio de arranque.....	103
4.2 Sensores típicos empleados para la adquisición de señales de flujo magnético.....	106
4.2.1 Sensores de bobina para capturar flujo magnético.....	106
4.2.2 Sensor fluxgate.....	108
4.2.3 Sensores de efecto Hall.....	109
4.3 Sensor triaxial propuesto.....	110
4.4 Diseño digital de sistemas de procesado y adquisición.....	112
4.4.1 Tarjeta de adquisición.....	113
4.4.2 Tarjeta de procesado.....	115
5. METODOLOGÍA.....	118
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	126

6.1 Aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico automático de asimetrías rotóricas en motores de inducción de rotor bobinado.....	127
6.1.1 Motivación del caso de estudio.....	127
6.1.2 Desarrollo de los ensayos.....	128
6.1.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	129
6.1.4 Conclusiones caso de estudio.....	137
6.2 Aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico automático de fallo de barras rotas y desalineamiento durante el arranque del motor.....	139
6.2.1 Motivación del caso de estudio.....	139
6.2.2 Desarrollo de los experimentos.....	140
6.2.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	143
6.2.4 Conclusiones caso de estudio.....	152
6.3 Aplicación de la metodología propuesta al diagnóstico automático de fallo gradual en la pista exterior de rodamientos.....	154
6.3.1 Motivación del caso de estudio.....	154
6.3.2 Desarrollo de los experimentos.....	155
6.3.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	158
6.3.4 Conclusiones caso de estudio.....	170
6.4 Aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico de fallo de barras rotas en motores de arranque de corta duración.....	172
6.4.1 Motivación del caso de estudio.....	172
6.4.2 Puesta en marcha de experimentos.....	173
6.4.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	175
6.4.4 Conclusiones caso de estudio.....	181
6.5 Aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico de desgaste gradual en cajas de engranes.....	182
6.5.1 Motivación del caso de estudio.....	182
6.5.2 Puesta en marcha de experimentos.....	183
6.5.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	185
6.5.4 Conclusiones caso de estudio.....	192

6.6 Aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico de desgaste de herramientas de corte en máquinas CNC.....	194
6.6.1 Motivación del caso de estudio.....	194
6.6.2 Puesta en marcha de experimentos.....	195
6.6.3 Resultados y discusión del caso de estudio.....	198
6.6.4 Conclusiones caso de estudio.....	203
7. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....	205