

# Índice

## Índice general.

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ABREVIATURAS.....	XVII
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.....	1
1.2 DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 INTRODUCCIÓN.....	7
2.2 FALLOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN.....	8
2.2.1 <i>Fallos de tipo eléctrico</i> .....	11
2.2.1.1 Fallos eléctricos en el estator del motor.....	11
2.2.1.2 Fallos eléctricos en el rotor del motor.....	12
2.2.1.3 Fallos eléctricos de tipo externo.....	13
2.2.2 <i>Fallos de tipo mecánico</i> .....	13

2.2.2.1	Fallo mecánico por desequilibrio.....	13
2.2.2.2	Fallo mecánico en los cojinetes.....	14
2.2.2.3	Fallo mecánico de excentricidad entre el rotor y el estator.....	15
2.2.3	<i>Frecuencias características producidas por los fallos.....</i>	16
2.2.3.1	Fallos eléctricos.....	19
2.2.3.2	Fallos mecánicos.....	20
<b>2.3</b>	<b>TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLOS POR MEDIO DE LA CORRIENTE DE FASE.....</b>	<b>25</b>
2.3.1	<i>Técnicas de detección de fallos en régimen estacionario.....</i>	26
2.3.1.1	Análisis de la corriente estatórica mediante transformada FFT.....	26
2.3.1.2	Vector de Park (PVA).....	29
2.3.1.3	Vector de Park Extendido (EPVA).....	34
2.3.1.4	Cepstrum.....	36
2.3.1.5	Componente alterna del módulo de la señal analítica.....	39
2.3.1.6	Análisis del Orden Armónico para régimen estacionario (HOTA estacionario).....	44
2.3.1.7	Otras técnicas de detección de fallos en régimen estacionario.....	52
2.3.2	<i>Técnicas de detección de fallos para un régimen de trabajo transitorio.....</i>	52
2.3.2.1	Transformada de Fourier corta en el tiempo (STFT).....	52
2.3.2.1.1	Búsqueda del espacio de mínima entropía.....	58
2.3.2.2	Transformada Wavelet Discreta.....	60
2.3.2.3	Transformada Continua Wavelet y Transformada Continua Compleja Wavelet.....	65
2.3.2.4	Transformada Hilbert Huang.....	67
2.3.2.5	Distribución de Wigner-Ville.....	69
2.3.2.6	Análisis del Orden Armónico para régimen transitorio (HOTA transitorio).....	72
2.3.2.7	Otras técnicas de detección de fallos en régimen transitorio.....	77
2.3.3	<i>Filtros de la señal.....</i>	78
2.3.3.1	Filtro de ventana de Hann.....	78
2.3.3.2	Periodograma de Welch.....	81
<b>2.4</b>	<b>SISTEMAS EXPERTOS EN LA DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PATRONES.....</b>	<b>83</b>
2.4.1	<i>Sistemas expertos basados en deducción lógica.....</i>	84
2.4.1.1	Lenguajes de programación lógica.....	85
2.4.1.2	Arboles de decisión.....	86
2.4.2	<i>Sistemas expertos basados en espacios de características.....</i>	87
2.4.2.1	K-vecinos más cercanos (kNN).....	88
2.4.2.2	Máquina de vectores de soporte (SVM).....	89
2.4.3	<i>Sistemas expertos basados en emulación biológica (Redes Neuronales Artificiales).....</i>	92
<b>CAPITULO 3. SISTEMAS EXPERTOS ORIENTADOS A LA CLASIFICACIÓN.....</b>		<b>95</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>95</b>
<b>3.2</b>	<b>MÁQUINA DE VECTORES DE SOPORTE (SVM).....</b>	<b>96</b>
3.2.1	<i>Método de clasificación del clasificador SVM.....</i>	100
3.2.2	<i>Entrenamiento de un clasificador SVM.....</i>	102
3.2.3	<i>Kernels del clasificador SVM.....</i>	107
3.2.4	<i>Coefficientes de ajuste del clasificador SVM.....</i>	112

3.2.5	<i>Ventajas y desventajas del clasificador SVM.</i>	115
<b>3.3</b>	<b>REDES NEURONALES ARTIFICIALES.</b>	<b>116</b>
3.3.1	<i>Unidad básica de una red neuronal.</i>	118
3.3.2	<i>Topología de red neuronal supervisada.</i>	122
3.3.2.1	Datos sin relación secuencial.	122
3.3.2.2	Datos relacionados secuencialmente.	125
3.3.3	<i>Entrenamiento de la red.</i>	126
3.3.3.1	Algoritmos de entrenamiento.	127
3.3.3.1.1	Algoritmos de retropropagación del gradiente descendiente.	127
3.3.3.1.2	Algoritmos de retropropagación del gradiente conjugado.	128
3.3.3.1.3	Algoritmos casi Newtonianos.	129
3.3.3.2	Funciones de coste.	130
3.3.4	<i>Mejora en la generalización del aprendizaje.</i>	135
3.3.4.1	Estructura de la red ajustada al problema.	135
3.3.4.2	Entrenamiento con detención temprana.	138
3.3.4.3	Reentrenamiento de la red neuronal artificial.	139
3.3.5	<i>Ventajas y desventajas de las redes neuronales artificiales.</i>	140
<b>3.4</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>141</b>
<b>CAPITULO 4. BANCO DE ENSAYOS DE LOS MOTORES</b>		<b>143</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>143</b>
<b>4.2</b>	<b>EL BANCO DE ENSAYOS.</b>	<b>143</b>
<b>4.3</b>	<b>ELEMENTOS QUE FORMAN EL BANCO DE ENSAYOS.</b>	<b>146</b>
4.3.1	<i>Sistema de potencia.</i>	147
4.3.1.1	Motores de inducción.	147
4.3.1.2	Auto-transformador.	150
4.3.1.3	Variadores de frecuencia.	151
4.3.1.4	Variador de frecuencia marca ABB modelo ACSM1 (Driver del servomotor).	158
4.3.1.5	Motor de imanes permanentes de tipo síncrono.	160
4.3.2	<i>Sistema de control automatizado.</i>	161
4.3.2.1	El autómata programable.	162
4.3.2.2	Ordenador personal.	164
4.3.3	<i>Subsistema de medida y adquisición de datos.</i>	165
4.3.3.1	El Osciloscopio.	166
4.3.3.2	Sondas de Tensión.	169
4.3.3.3	Pinzas Amperimétricas.	169
<b>4.4</b>	<b>BASE DE DATOS DE MUESTRAS DE ENSAYOS.</b>	<b>170</b>
4.4.1	<i>Ensayos para la generación de sistemas de diagnóstico estacionario.</i>	171
4.4.2	<i>Ensayos para la generación de sistemas de diagnóstico transitorio.</i>	174
<b>4.5</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>183</b>
<b>CAPITULO 5. GENERADOR DE DETECTORES DE FALLO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO ....</b>		<b>185</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>185</b>
<b>5.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS RELEVANTES EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.</b>	<b>186</b>

5.2.1	Técnica de Análisis de la corriente estatórica mediante FFT. ....	187
5.2.2	Componente alterna del módulo de la señal analítica .....	190
5.2.3	Análisis del Orden Armónico. (HOTA estacionario). ....	194
5.2.4	Cepstrum. ....	197
5.2.5	Vector de Park Extendido (EPVA). ....	199
<b>5.3</b>	<b>MODIFICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS. ....</b>	<b>202</b>
<b>5.4</b>	<b>GESTIÓN DE FALLOS MEDIANTE MÁQUINA DE VECTORES DE SOPORTE. ....</b>	<b>203</b>
5.4.1	Estudio de los coeficientes del sistema. ....	204
5.4.2	Algoritmo de generación del sistema de diagnóstico. ....	205
5.4.2.1	Algoritmo de ajuste de coeficientes por búsqueda en malla. ....	206
5.4.2.2	Entrenamiento y validación del clasificador SVM. ....	212
5.4.2.3	Sobreentrenamiento por falta de significancia de fallo en las muestras. ....	216
<b>5.5</b>	<b>GESTIÓN DE FALLOS MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES. ....</b>	<b>217</b>
5.5.1	Estudio de los parámetros del sistema. ....	218
5.5.1.1	Parámetros topológicos de la red. ....	219
5.5.1.2	Función de entrenamiento. ....	223
5.5.1.2.1	Algoritmo de entrenamiento por retropropagación del gradiente escalado. ....	225
5.5.2	Algoritmo de generación del sistema de diagnóstico. ....	227
5.5.2.1	Algoritmo de búsqueda de la red neuronal óptima. ....	229
5.5.2.1.1	Búsqueda de la red neuronal óptima de una capa oculta. ....	230
5.5.2.1.2	Búsqueda de la red neuronal óptima con dos capas ocultas. ....	233
5.5.2.2	Entrenamiento y validación de la red neuronal para una red estructural. ....	235
5.5.2.2.1	Validación cruzada de entrenamiento / validación / prueba. ....	235
5.5.2.2.2	Algoritmo de particionado de entrenamiento, prueba y validación. ....	239
<b>5.6</b>	<b>ENTORNO DE DESARROLLO DEL SISTEMA GENERADOR DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS. ....</b>	<b>242</b>
<b>5.7</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA AUTÓNOMO PARA RÉGIMEN ESTACIONARIO. ....</b>	<b>244</b>
5.7.1	Resultados obtenidos con sistemas expertos SVM. ....	250
5.7.1.1	Comparación de tiempos entre kernel polinomial y kernel RBF. ....	250
5.7.1.2	Comparación de resultados entre kernel polinomial y kernel RBF. ....	255
5.7.2	Resultados obtenidos con sistemas expertos ANN. ....	261
5.7.2.1	Comparación de tiempos entre ANN de 1 y de 2 capas ocultas. ....	261
5.7.2.2	Comparación de resultados entre ANN de 1 y 2 capas ocultas. ....	265
<b>5.8</b>	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....</b>	<b>270</b>
<b>CAPITULO 6. GENERADOR DE DETECTORES DE FALLO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....</b>		<b>273</b>
<b>6.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>273</b>
<b>6.2</b>	<b>OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS RELEVANTES EN RÉGIMEN TRANSITORIO. ....</b>	<b>276</b>
6.2.1	Análisis del Orden Armónico. (HOTA transitorio). ....	276
6.2.1.1	Etapas de filtrado paso banda. ....	283
6.2.1.2	Implementación de la función Prolate como nueva ventana de filtro (PSWF). ....	284
6.2.1.3	Limitación del recorrido de la ventana para minimizar el efecto de borde. ....	289
6.2.1.4	Método de ajuste de la proporción de la función de ventana. ....	292
6.2.1.5	Transformada de Fourier corta en frecuencia (SFFT) con bandas adaptativas. ....	297
6.2.2	Resumen de variantes optimizadas de HOTA transitorio. ....	301

---

<b>6.3</b>	<b>GESTIÓN DE FALLOS MEDIANTE SISTEMAS EXPERTOS.....</b>	<b>302</b>
<b>6.4</b>	<b>VALIDACIÓN PRÁCTICA.....</b>	<b>303</b>
<b>6.5</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA AUTÓNOMO PARA RÉGIMEN TRANSITORIO. ....</b>	<b>303</b>
6.5.1	<i>Resultados obtenidos con sistemas expertos SVM.....</i>	<i>306</i>
6.5.1.1	Comparación de tiempos entre kernel polinomial y kernel RBF.....	306
6.5.1.2	Comparación de resultados entre kernel polinomial y kernel RBF.....	310
6.5.2	<i>Resultados obtenidos con sistemas expertos ANN.....</i>	<i>314</i>
6.5.2.1	Comparación de tiempos entre ANN de 1 y de 2 capas ocultas.....	314
6.5.2.2	Comparación de resultados entre ANN de 1 y 2 capas ocultas.....	317
<b>6.6</b>	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</b>	<b>320</b>
<b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>		<b>323</b>
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....</b>	<b>323</b>
<b>7.2</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>327</b>
<b>CAPITULO 8. REFERENCIAS.....</b>		<b>329</b>
<b>CAPITULO 9. ANEXOS.....</b>		<b>343</b>
Anexo 1.	Clúster de redes neuronales.....	343
Anexo 2.	Algoritmo de entrenamiento por retropropagación del gradiente.....	346
Anexo 3.	Aceleración computacional mediante hardware CUDA.....	350