

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>27</b>
<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>33</b>
1.1 Motivación .....	33
1.2 Objetivos .....	35
1.3 Sistemática adoptada .....	36
1.4 Estructura de la tesis.....	37
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>39</b>
2.1 Desarrollo histórico y realidad actual de los motores de inducción .....	40
2.1.1 Construcción de los motores de inducción.....	42
2.1.2 Motores invertidos y de rotor reconfigurable.....	46
2.2 Defectos de los motores de inducción .....	48
2.2.1 Asimetría rotórica .....	49
2.2.2 Excentricidades.....	55
2.2.3 Defectos en el estátor .....	60
2.2.4 Defectos en los rodamientos .....	63
2.3 Técnicas de análisis de la señal para el diagnóstico de motores de inducción .....	66
2.3.1 Introducción al análisis de la señal .....	67
2.3.2 Análisis en el dominio del tiempo.....	68
2.3.3 Análisis Espectral Clásico.....	70
2.3.4 Desventajas del análisis espectral clásico .....	72
2.3.5 Densidades de energía en tiempo y en frecuencia.....	74
2.3.6 Definición de la señal analítica .....	76
2.3.7 Densidades y funciones características .....	79
2.3.8 El principio de incertidumbre .....	80
2.3.9 Fundamentos de las distribuciones en tiempo y frecuencia .....	81
2.3.10 La transformada Corta de Fourier - STFT.....	82
2.3.11 La distribución de Wigner-Ville .....	85
2.3.12 Propiedades de la distribución de Wigner-Ville.....	88
2.3.13 Otras distribuciones en tiempo y frecuencia .....	93
2.3.14 Análisis mediante Wavelets .....	98
2.3.15 Transformada de Hilbert .....	101
2.3.16 Transformada de Hilbert-Huang .....	102
2.3.17 El operador de Teager-Kaiser .....	105
2.3.18 Fundamentos de filtros digitales .....	109

2.3.19	Implementación de filtros IIR .....	113
2.3.20	Fundamentos de filtros FIR.....	115
2.3.21	Últimos avances en filtros FIR de rechazo de frecuencia .....	118
2.4	Técnicas de diagnóstico de motores de inducción en operación estacionaria .....	121
2.4.1	Diagnóstico por análisis de corrientes.....	121
2.4.2	Diagnóstico por análisis de vibraciones.....	127
2.4.3	Otras técnicas de diagnóstico en estado estacionario.....	129
2.5	Técnicas de diagnóstico de motores de inducción en estado transitorio.....	131
2.5.1	Transformada corta de Fourier.....	135
2.5.2	Transformada Wavelet discreta .....	137
2.5.3	Transformada de Hilbert y de Hilbert-Huang .....	140
2.5.4	Transformada Wavelet continua .....	141
2.5.5	Distribuciones en tiempo-frecuencia.....	141
2.5.6	Otros métodos de diagnóstico de motores en estado transitorio .....	147
2.6	Recapitulación .....	147
<b>CAPÍTULO 3. ENSAYO DE ROTURA DE BARRA POR FATIGA. PRIMEROS RESULTADOS .....</b>		<b>149</b>
3.1	Introducción .....	149
3.2	Descripción del ensayo.....	150
3.2.1	Ciclo de funcionamiento .....	151
3.2.2	Indicadores calculados .....	152
3.3	Primeros resultados .....	155
3.4	Conclusiones del capítulo.....	162
<b>CAPÍTULO 4. TÉCNICA DE DIAGNOSIS PROPUESTA.....</b>		<b>163</b>
4.1	Selección de la herramienta de descomposición en tiempo-frecuencia .....	164
4.1.1	Computación de la distribución de Wigner-Ville .....	165
4.2	Aplicación de la Distribución de Wigner-Ville al estudio de las bajas frecuencias ..	167
4.3	Aplicación de la Distribución de Wigner-Ville al estudio de las altas frecuencias ...	174
4.3.1	Uso de la WPT.....	175
4.3.2	Aplicación de filtros para suprimir la componente fundamental de la corriente .....	176
4.3.3	Modificación de la etapa de filtrado mediante filtros en “V” o notch.....	177
4.4	Método de análisis propuesto .....	178
4.4.1	Ejemplo de aplicación del método propuesto .....	179
4.5	Diseño de los filtros IIR utilizados en el método propuesto .....	188
4.6	Inconvenientes de la aplicación de filtros IIR .....	196
4.7	Mejora del método propuesto mediante la utilización de filtros FIR .....	198
4.8	Método de cuantificación propuesto.....	207
4.9	Recapitulación y conclusiones .....	210

<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN.....</b>	<b>213</b>
5.1	Modelización de defectos mediante modelos analíticos.....	214
5.1.1	Modelo 0.....	215
5.1.2	Modelo 1-2.....	215
5.1.3	Modelo 3.....	221
5.2	Modelización por elementos finitos.....	225
5.2.1	Modelo HUT.....	225
5.2.2	Resultados frente a fallos combinados (modelo HUT).....	237
5.2.3	Evaluación del método propuesto sobre el motor ABB.....	244
5.3	Conclusiones del capítulo.....	246
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>VALIDACIÓN MEDIANTE ENSAYOS .....</b>	<b>249</b>
6.1	Detección de la asimetría rotórica.....	249
6.1.1	Caracterización de los armónicos de rotura de barra.....	250
6.1.2	Ensayos preliminares. Identificación de los PSH.....	251
6.1.3	Aplicación del método propuesto a la detección de asimetría rotórica durante el arranque.....	253
6.1.4	Aplicación del método propuesto a la detección de asimetría rotórica durante el frenado por permutación de fases.....	255
6.1.5	Aplicación del método propuesto a la detección de asimetría rotórica sobre el motor de un par de polos y 1,5 kW.....	257
6.1.6	Aplicación del método propuesto a la detección de barras rotas en condiciones industriales.....	259
6.2	Detección experimental de la excentricidad mixta.....	261
6.3	Detección experimental de cortocircuitos en el estátor.....	264
6.4	Detección de defectos cíclicos en los rodamientos.....	266
6.5	Análisis crítico del método propuesto.....	268
<b>CAPÍTULO 7.</b>	<b>RESULTADOS DEL ENSAYO DE ROTURA DE BARRA POR FATIGA .....</b>	<b>271</b>
7.1	Resultados iniciales.....	272
7.2	Resultados a mitad del experimento.....	273
7.3	Resultados tras las dos primeras épocas.....	277
7.3.1	Análisis de los indicadores de falta basados en la FFT.....	278
7.3.2	Análisis de los indicadores de falta basados en el estudio del estado estacionario de la envolvente de la señal obtenida mediante la transformada de Hilbert.....	285
7.3.3	Análisis de los indicadores de falta basados en el estudio del transitorio mediante Wavelets.....	289
7.4	Resultados finales del ensayo de rotura de barra por fatiga.....	293
7.4.1	Serie M.....	293
7.4.2	Serie N.....	295
7.4.3	Serie O.....	296
7.4.4	Serie P.....	296

7.4.5	Serie Q: rotura espontánea de la barra .....	297
7.4.6	Aplicación del método de cuantificación basado en Wigner-Ville .....	301
7.4.7	Análisis del evento de rotura natural.....	308
7.4.8	Serie R .....	312
7.4.9	Serie U .....	313
7.4.10	Serie V .....	313
7.5	Conclusiones del capítulo.....	325
<b>CAPÍTULO 8. RESULTADOS DEL ENSAYO SOBRE LA MÁQUINA INVERTIDA .....</b>		<b>327</b>
8.1	Planteamiento del ensayo .....	327
8.2	Resultados .....	329
8.3	Conclusiones del capítulo.....	335
<b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y ACCIONES FUTURAS .....</b>		<b>337</b>
9.1	Aportaciones y conclusiones .....	337
9.2	Acciones futuras .....	340
9.3	Lista de artículos y ponencias relacionadas con la investigación desarrollada....	344
<b>CAPÍTULO 10. REFERENCIAS .....</b>		<b>347</b>
<b>ANEXO 1. MOTORES COMERCIALES ENSAYADOS .....</b>		<b>363</b>
1.1	Motor I Siemens (de un par de polos).....	363
1.2	Motor II Siemens (de dos pares de polos).....	365
1.3	Motor HUT .....	365
1.4	Motor ABB .....	366
<b>ANEXO 2. MONTAJE USADO EN EL ENSAYO DE ROTURA DE BARRA POR FATIGA .....</b>		<b>367</b>
2.1	Descripción del montaje, sistema de control y sistema de adquisición de datos .....	367
2.1.1	Archivo de datos.....	368
2.1.2	Características de los equipos usados en el montaje .....	369
2.2	Funciones usadas en el procesamiento de datos.....	373
2.2.1	Gestión de datos y análisis .....	373
2.2.2	Función FWV6.....	373
2.2.3	Función PICMAX8 .....	375
2.2.4	Fotografías del montaje.....	377
<b>ANEXO 3. CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR INVERTIDO PARA EL ESTUDIO DE LA ROTURA DE BARRAS .....</b>		<b>379</b>
3.1	Descripción del motor .....	379

3.2	Diseño del sistema de adquisición de datos .....	382
3.2.1	Disposición de los sensores de temperatura .....	382
3.2.2	Selección de los sensores de corriente.....	383
3.3	Diseño de la bancada de pruebas .....	384
3.4	Construcción del prototipo de la máquina invertida .....	385
3.5	Montaje de los sensores .....	387
3.6	Construcción de la bancada de pruebas.....	388
3.7	Parámetros medidos del motor.....	390
3.8	Ensayos específicos del prototipo .....	393
3.8.1	Ensayos previos de los sensores de corriente .....	393
3.8.2	Prueba de los sensores en la jaula.....	395
3.8.3	Instalación de los sensores en la jaula .....	397
3.8.4	Conexión de los sensores.....	400
3.8.5	Calibración de los sensores en la máquina .....	401