

# ÍNDICE

<b>PLANTEAMIENTO Y RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL .....</b>	<b>I</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>3 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES FALLOS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS .....	11
3.1.1 <i>Fallos Eléctricos</i> .....	17
3.1.1.1 Fallos en el Estator .....	17
3.1.1.2 Fallos en el Rotor .....	18
3.1.1.3 Fallos Externos .....	20
3.1.2 <i>Fallos Mecánicos</i> .....	21
3.1.2.1 Desequilibrio .....	21
3.1.2.2 Desalineación .....	22
3.1.2.3 Fallos en Cojinetes .....	23
3.1.2.4 Fallos en Engranajes.....	24
3.1.2.5 Excentricidad en el Entrehierro .....	25
3.1.3 <i>Frecuencias características de los principales fallos en las máquinas de inducción</i> .....	32
3.2 MAGNITUDES FÍSICAS UTILIZADAS PARA MONITORIZAR EL ESTADO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS .....	33
3.2.1 <i>Medida de vibraciones</i> .....	33
3.2.2 <i>Medida de Impedancia</i> .....	34
3.2.3 <i>Medida de Flujos Axiales o Concéntricos con el eje</i> .....	35
3.2.4 <i>Medida del Par</i> .....	37
3.2.4.1 Medida del Par Mecánico .....	37
3.2.4.2 Medida del Par Interno o Electromagnético .....	38
3.2.5 <i>Medida de la potencia instantánea</i> .....	39
3.2.6 <i>Medida de tensiones residuales a la desconexión</i> .....	40
3.2.7 <i>Medida de la corriente</i> .....	41
3.3 ANÁLISIS DE SEÑAL Y TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL.....	43
3.3.1 <i>Análisis de Señal</i> .....	43
3.3.1.1 Análisis en Régimen Permanente .....	44
3.3.1.2 Análisis en Régimen Transitorio .....	55
3.3.2 <i>Técnicas utilizadas para la Detección de Averías</i> .....	67
3.3.2.1 Métodos Off-Line ó Tradicionales .....	67
3.3.2.2 Valor Eficaz de la Tensión. RMS (Root Mean Square).....	70
3.3.2.3 Análisis Espectral mediante la transformada de Fourier de la Corriente Estatórica .....	71
3.3.2.4 Secuencia Indirecta ó Inversa ó Negativa de Corrientes.....	75
3.3.2.5 Potencia .....	77
3.3.2.6 Vector Complejo de Park .....	80
3.3.2.7 Espectro de Orden Superior (“HOS” Higher Order Statistics) .....	84
3.3.2.8 Flujo Axial.....	85
3.3.2.9 Ruido .....	85
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS.....	86
3.5 CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO. ÍNDICES DE DETECCIÓN.....	94
3.6 REVISIÓN CRÍTICA Y EXPERIMENTAL DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE EXCENTRICIDAD EN LA LITERATURA TÉCNICA APLICADOS A UNA MÁQUINA DE LABORATORIO .....	96
3.6.1 <i>Ensayo Experimental en Régimen Permanente a 1455 rpm</i> .....	96
3.6.1.1 Máquina sana.....	98
3.6.1.2 Máquina con tapas desplazadas.....	103
3.6.1.3 Máquina con rotor aplanado parcialmente.....	108
3.6.2 <i>Ensayo Experimental en Régimen Permanente a 1410 rpm</i> .....	115
3.6.2.1 Máquina sana.....	115
3.6.2.2 Máquina con tapas desplazadas.....	119
3.6.2.3 Máquina con rotor aplanado parcialmente.....	124
3.6.3 <i>Ensayo Experimental en Régimen Permanente a 1455 rpm y conectando una corriente inversa</i> .....	127
3.6.3.1 Máquina sana.....	128
3.6.3.2 Máquina con tapas desplazadas.....	131
3.6.3.3 Máquina con rotor aplanado parcialmente.....	133
3.6.4 <i>Ensayo Experimental en Régimen Permanente a 1410 rpm y conectando una corriente inversa</i> .....	135

3.6.4.1	Máquina sana.....	135
3.6.4.2	Máquina con tapas desplazadas.....	136
3.6.4.3	Máquina con rotor aplanado parcialmente.....	139
3.6.5	<i>Conclusiones de los ensayos experimentales</i> .....	141
3.7	CONCLUSIONES AL CAPÍTULO .....	142
<b>4</b>	<b>PROBLEMAS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN.....</b>	<b>143</b>
4.1	SOLAPAMIENTO. EFECTO “ALIASING” .....	143
4.2	RUIDOS .....	145
4.2.1	<i>Sobre muestreo (“Oversampling”)</i> .....	145
4.2.2	<i>Adición de ruido (“Dithering”)</i> .....	146
4.2.3	<i>“Superposición”</i> .....	147
4.3	EFECTO DE DISPERSIÓN (“LEAKAGE”).....	147
4.4	VENTANAS (“WINDOWS”).....	150
4.5	RESOLUCIÓN.....	151
4.6	PERDIDA DE ONDAS (“SCALLOPING – LOSS”).....	152
4.7	ADICCIÓN DE CEROS A LA SEÑAL (“ZERO- PADDING”).....	153
4.8	EJEMPLO PRÁCTICO DE UNA MEDICIÓN Y SU POSTERIOR ANÁLISIS.....	155
4.9	CONCLUSIONES AL CAPÍTULO.....	156
<b>5</b>	<b>MODELO ANALÍTICO DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA ASÍNCRONA DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA.....</b>	<b>157</b>
5.1	ECUACIONES QUE RIGEN EL COMPORTAMIENTO DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA .....	158
5.1.1	<i>Cálculo de la matriz de inductancias</i> .....	161
5.1.1.1	Máquina sana ó entrehierro uniforme:.....	161
5.1.1.2	Máquina con excentricidad estática:.....	162
5.1.1.3	Máquina con excentricidad dinámica: .....	163
5.2	DESARROLLO DEL MODELO ANALÍTICO DE LA MÁQUINA ASÍNCRONA.....	165
5.3	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	170
5.3.1	<i>Máquina eléctrica sana. Motor ABB</i> .....	170
5.3.1.1	Resultados Experimentales.....	171
5.3.1.2	Resultados Simulados con el modelo.....	174
5.3.2	<i>Máquina eléctrica con rotura de barra</i> .....	176
5.3.2.1	Ensayo en régimen permanente a 1490 r.p.m.....	177
5.3.2.2	Máquina eléctrica de inducción con una barra rota en régimen permanente a 1470 r.p.m.....	180
5.3.2.3	Máquina eléctrica de inducción con una barra rota en régimen permanente a 1450 r.p.m.....	183
5.3.2.4	Máquina eléctrica de inducción con una barra rota en régimen permanente a 1430 r.p.m.....	185
5.3.2.5	Máquina eléctrica de inducción con una barra rota en régimen permanente a 1410 r.p.m.....	187
5.3.3	<i>Máquina eléctrica con excentricidad</i> .....	190
5.3.3.1	Simulación de una máquina eléctrica de inducción sana en régimen permanente a 1455 r.p.m.....	190
5.3.3.2	Simulación de una máquina eléctrica de inducción con 30% de excentricidad estática en régimen permanente a 1455 r.p.m.....	192
5.3.3.3	Simulación de una máquina eléctrica de inducción con un 30 % de excentricidad mixta en régimen permanente a 1455 r.p.m.....	198
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	200
<b>6</b>	<b>SOLUCIONES ADOPTADAS.....</b>	<b>203</b>
6.1	SOLUCIONES EN RÉGIMEN PERMANENTE.....	206
6.1.1	<i>Mapas de colores</i> .....	207
6.1.1.1	Patrones de Fallos a modo de Mapa de colores.....	208
6.1.2	<i>Valor alterno del módulo de la señal analítica (ASMac) de la corriente. Mediante la Transformada de Hilbert</i> .....	211
6.1.2.1	ASMac de una máquina sana simulada.....	213
6.1.2.2	ASMac de una máquina con excentricidad estática simulada.....	214
6.1.2.3	ASMac de una máquina con excentricidad mixta simulada.....	216
6.1.2.4	ASMac de una máquina con excentricidad mixta y una barra rota simulada.....	218
6.1.2.5	ASMac de la máquina real sana.....	220
6.1.2.6	ASMac de la máquina real con tapas desplazadas.....	222
6.1.2.7	ASMac de la máquina real con el rotor aplanado parcialmente.....	224
6.1.2.8	ASMac de la máquina real con una barra rota.....	226
6.1.2.9	Aportaciones del valor alterno del módulo de la señal analítica (ASMac).....	228
6.2	SOLUCIONES EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....	231

6.2.1	<i>Patrones de Fallos a modo de imagen. Transformadas Wavelets.</i>	231
6.2.1.1	Transformada wavelet discreta de la máquina con barra rota.	232
6.2.1.2	Transformada wavelet continua.	233
6.2.1.3	Transformada wavelet continua compleja.	235
6.2.1.4	Transformada wavelet continua compleja aplicada a una máquina con barra rota.	236
6.2.2	<i>Frecuencia instantánea del armónico característico del fallo.</i>	240
6.2.2.1	Obtención del armónico característico del fallo.	241
6.2.2.2	Obtención de la frecuencia instantánea.	243
6.2.2.3	Obtención del deslizamiento	244
6.2.2.4	Caso Experimental de la máquina con una barra rota.	244
6.2.2.5	Caso Experimental de la máquina con excentricidad.	245
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>247</b>
7.1	RECAPITULACIÓN	247
7.2	APORTACIONES DE LA TESIS	248
<b>8</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>251</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>253</b>
<b>10</b>	<b>OTROS TRABAJOS DEL AUTOR</b>	<b>265</b>
10.1	LIBROS.	265
10.2	REVISTAS.	265
10.3	CONGRESOS.	266
10.4	CONVENIOS DE INVESTIGACIÓN.	267
<b>ANEXO A</b>		<b>269</b>