

Tesis Doctoral

MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO CON ROTOR DE CHAPAS EN ESPIRAL

Volumen I

Ramón M^a Mujal Rosas

**Director. Dr. Oriol Boix Aragonès
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica de Cataluña**

Marzo de 2004

Prólogo Volumen I

La idea de crear un motor asíncrono trifásico con rotor formado por chapas en espiral surgió de la necesidad de buscar un motor con un buen par de arranque, pero con intensidades limitadas, que respondiera bien en sistemas en los que los arranques y paradas fueran frecuentes y con una respuesta térmica que permitiera su funcionamiento a lo largo de toda la curva de carga. Este motor debería ser de fácil construcción para ser rentable, y mecánicamente resistente a las frecuentes paradas y arrancadas a los que estaría sometido.

El motor macizo con aros era un buen exponente del motor con elevado par de arranque y de fácil construcción así como muy resistente y equilibrado, pero tenía valores de rendimiento bajos comparados con el motor de jaula. Precisamente era el motor equipado con un rotor de jaula de ardilla con el cual queríamos competir, al menos en algunos aspectos de su funcionamiento.

Esta tesis habría podido enfocarse de forma teórica, mediante programas de simulación, lo que nos habría ahorrado mucho tiempo y dinero, pero a la hora de simular un motor que nunca había sido probado era muy difícil dar por buenos unos resultados sin que existiera un referente experimental que lo corroborase, máxime si tenemos presente que del motor propuesto no habían simulaciones ni pruebas precedentes.

Dado que los motores de chapas en espiral son muy diferentes de los motores habituales, parecía lógico y obligado su construcción física, pero aún así, una vez construidos para poder compararlos fielmente con los motores existentes harían falta referentes de motores con rotor de jaula o macizos de tamaño y características similares, lo que suponía un difícil inconveniente, ya que encontrar un motor de jaula de un tamaño y características determinadas no entraña problemas, encontrar sus homólogos pero con rotor macizo ya no es tan fácil y hallar un motor con rotor hueco y núcleo amagnético de iguales características es prácticamente imposible.

Así las cosas parecía que no tendríamos más remedio que construir, aparte de los modelos con chapas, los otros rotores, excepto el rotor de jaula el cual nos serviría como patrón y podía adquirirse con la compra de un estator convencional.

Pero aún quedaba un problema por resolver, ¿en qué régimen se obtendrían mejores resultados con los nuevos motores? Esta pregunta auguraba que no sería suficiente con probar los motores en un solo régimen de velocidad sino que sería recomendable probarlo como mínimo con los regímenes estándar de 1000, 1500, y 3000 rpm.

Las ideas empezaban a tomar forma, pero aún surgió una última duda: ya que si adquiríamos tres motores con velocidades diferentes también la carcasa de los motores sería diferente con lo que la comparación no sería del todo precisa. Se optó, por tanto, por adquirir todos los estatores a igual velocidad, concretamente a 1500 rpm, y después serían rebobinados a 1000 rpm y 3000 rpm. Incluso el motor original de 1500 rpm se volvió a rebobinar ya que, una vez realizadas las pruebas con este motor, se apreció que en algunas de las condiciones extremas a las que se funcionaban los motores, éste quedaba saturado y sus respuestas podían ser erróneas.

La construcción de los rotores resultó ser el proceso más laborioso, llevándonos prácticamente más de un año completar toda la serie, ya que no simplemente se trataba de la construcción de los rotores en sí, sino que debido a su específica configuración, se tuvieron que construir previamente los útiles que permitirían cortar, doblar o simplemente unir y apilar las chapas en el eje. En concreto se construyeron quince rotores, sin contar el de jaula que ya era de fábrica, de los cuales llegaron a funcionar nueve de chapas, más el macizo, el macizo con aros y el rotor hueco de material amagnético.

Lo ideal habría sido que cada rotor se hubiera probado una vez acabado de construir, así con los defectos y virtudes hallados con sus ensayos se habría construido el siguiente modelo mejorando el anterior.

La verdad es que la realidad fue muy distinta, ya que el operario que nos ayudo en la construcción de los rotores y la maquinaria utilizada, estaba disponible en contadas ocasiones, (máxime si tenemos presente lo laborioso de la construcción de cada rotor), por lo que se tenía que aprovechar los meses en los que la disponibilidad de los talleres del Departamento de Ingeniería Mecánica en Terrassa y del propio operario permitían esta labor. La construcción de los rotores por medio de una empresa dedicada al sector resulto del todo imposible tanto por consideraciones técnicas como económicas.

Cabía entonces preguntarnos si los rotores se construyeron por que sí, sin saber mucho lo que estábamos haciendo. La respuesta sería un rotundo no, ya que aún sin probarlos, ya se sabía lo que como mínimo sería importante analizar. Así se construyeron rotores con y sin anillos, con anillos centrales, con diferente curvatura o espesor de las chapas, con materiales de diversas características, dejando las aristas de las chapas en el entrehierro con o sin mecanizar, con diferente entrehierro, con uniones de las chapas al eje del rotor mediante estriado o simplemente por soldadura, con equilibrado con adición o sustracción de masa... etc. Por tanto, podíamos construir muchos rotores aún sin ensayarlos, los cuales seguro que nos servirían para responder a las muchas hipótesis que se planteaban.

En total resultaron once rotores útiles que por cuatro estátores, representaban un total de cuarenta y cuatro motores a probar, con lo cual para cada ensayo se necesitaba un tiempo demasiado extenso y así fue en realidad, ya que las pruebas eléctricas y térmicas nos llevaron un año y medio de trabajo, máxime si tenemos presente que estos ensayos se realizaron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Eléctrica en el Campus de Terrassa los cuales están saturados durante los periodos docentes, debiéndose buscar para las pruebas las primeras horas de la mañana o las últimas del día e incluso en ocasiones de la noche. Los únicos ensayos que resultaron rápidos fueron las pruebas mecánicas, las cuales se realizaron con un analizador disponible en las mismas dependencias del Departamento en el Campus de Terrassa lo que simplifico enormemente el trabajo.

Si las pruebas eléctricas, térmicas y mecánicas se realizaron en los laboratorios (aparte se realizaron simulaciones eléctricas para estudiar los transitorios, para las cuales se utilizó el programa Matlab-Simulik), para las pruebas magnéticas se utilizó el programa de simulación de elementos finitos FEMM, de libre difusión. Este programa funciona en 2D, y no esta preparado para motores como el analizado en esta tesis, por lo que nos tuvimos que poner en contacto con su autor (Sr. Mekeer) el cual atentamente nos asesoro para que pudiéramos adaptar el programa a nuestras necesidades.

Tampoco las simulaciones han resultado fáciles, y no debido al volumen de ellas, ciertamente grande, sino más bien a que la simulación de estos motores formados por multitud de chapas resulto imposible con ordenadores convencionales (con un pentium IV de 1.75 GHz ni tan siquiera se iniciaba la simulación), por lo que se debió de adquirir un ordenador potente (pentium IV a 3.2 GHz con 1.1GB de RAM) para poder realizar estas simulaciones. Por poner un ejemplo, este nuevo ordenador realiza la simulación de 20 modelos de jaula en 15 minutos, tardaba dos minutos por rotor y simulación para el rotor macizo (al cual se le incorporaron unos círculos para aumentar su mallado y por tanto su precisión), y para el rotor de chapas con un espesor de las mismas de 0.25 mm (el más lento), la simulación requería de 20 minutos. En total entre los modelos del Matlab-Simulink y del FEMM, se necesito un año para completar todas las simulaciones.

El resultado han sido estos dos tomos, de los cuales el segundo contiene los anexos. Seguro que demasiado extensos, pero es que en esta tesis más que un tema concreto y muy específico se ha tratado un nuevo motor del que no se conocía nada, con lo cual se han tenido que sacrificar análisis muy concretos en pro de visiones más amplias. En trabajos futuros, una vez determinados él o los motores con mejores resultados, se afinará mucho más, profundizando y analizando con detalle cada uno de los efectos que se consideren destacables.

Aparte, este estudio ha permitido la publicación de trabajos en las actas de numerosos congresos y revistas. Concretamente hasta un total de veinte aportaciones, entre nacionales e internacionales, entre los cuales figuran cuatro comunicaciones en los prestigiosos IEEE. Actualmente se han enviado resúmenes a revistas indexadas, los cuales están en periodo de revisión y a la espera de respuesta.

Por último agradecer a tantas personas su apoyo en la realización de esta tesis. Desde las empresas que nos proporcionaron las chapas a un precio prácticamente simbólico, pasando por los Departamentos de Ingeniería Mecánica y Química tanto en sus secciones de Terrassa como de Barcelona, y en especial al Sr. Cuervas sin el cual la construcción de los rotores no hubiera sido posible. También agradezco a los compañeros de la sección de Terrassa del Departamento de Ingeniería Eléctrica los cuales han demostrado una paciencia increíble delante de mis repetidos requerimientos, y como no, a mi familia, sin duda la que ha sufrido de forma más directa mis prolongadas ausencias. En definitiva, vaya para todos los que en estos cuatro años me han ayudado tanto físicamente como mediante sus observaciones, mi más sincera gratitud.

Ramón M^a Mujal Rosas

Terrassa 15 de Marzo de 2004.

ÍNDICE VOLUMEN I

Prólogo	5
Índice	9
Capítulo I. Introducción y objetivos generales	15
1.1 Estado del arte	15
1.2 Introducción y objetivos	18
1.3 Metodología empleada	24
Capítulo II. Fundamentos teóricos	27
2.1 Consideraciones generales	27
2.2 Fundamentos de electromagnetismo	27
2.2.1 Ecuaciones de Maxwell	27
2.2.1.1 Ley de Faraday	27
2.2.1.2 Ley de Gauss del campo eléctrico	28
2.2.1.3 Ley de Ampere del desplazamiento de Maxwell	28
2.2.1.4 Ley de Gauss del campo magnético	28
2.2.2 Ecuaciones de campos potenciales	29
2.2.3 Ecuaciones de Maxwell en el análisis de máquinas eléctricas	29
2.2.4 Condiciones de contorno	30
2.2.5 Ecuaciones de Maxwell para régimen magnetostático	32
2.3 Teoría de elementos finitos	33
2.3.1 Desarrollo de métodos matriciales	34
2.3.2 Unión de los elementos finitos	36
2.4 Motores asíncronos trifásicos	37
2.4.1 Motores asíncronos trifásicos con rotor de jaula de ardilla	37
2.4.1.1 Motor asíncrono de rotor bobinado	40
2.4.1.2 Propiedades de los motores asíncronos y su empleo	41
2.4.2 Motores asíncronos trifásicos con rotor macizo	43
2.4.3 Motores asíncronos trifásicos con rotor hueco amagnético	44
2.4.4 Motores asíncronos trifásicos con rotor de chapas en espiral	45
2.4.4.1 Aspectos constructivos	47
2.4.4.1.1 Cálculo longitud de las chapas en función de los radios	48
2.4.4.1.2 Cálculo del radio de curvatura de las chapas	48
Capítulo III. Descripción de los modelos construidos	51
3.1 Descripción de los motores en general	51
3.1.1 Características principales	52
3.2 Descripción de los estatores	54
3.2.1 Estator a 1000 rpm	54
3.2.2 Estator a 1500 rpm	56
3.2.3 Estator a 1500rpm tipo <i>A</i>	58
3.2.4 Estator a 3000 rpm	60
3.3 Descripción de los rotores	62
3.3.1 Características mecánicas principales	63
3.3.2 Tipos de rotores	64
3.3.2.1 Rotor de jaula de ardilla	64
3.3.2.2 Rotor macizo sin aros	65
3.3.2.3 Rotor macizo con aros	66
3.3.2.4 Rotor hueco	67
3.3.2.5 Rotores de chapas	69
3.3.2.5.1 Rotor de chapas tipo <i>A</i>	71
3.3.2.5.2 Rotor de chapas tipo <i>B</i>	74

3.3.2.5.3 Rotor de chapas tipo <i>C</i>	76
3.3.2.5.4 Rotor de chapas tipo <i>D</i>	79
3.3.2.5.5 Rotor de chapas tipo <i>E</i>	80
3.3.2.5.6 Rotor de chapas tipo <i>F</i>	82
3.3.2.5.7 Rotor de chapas tipo <i>Z</i>	84
3.3.2.5.8 Rotor de chapas tipo prototipo I	86
3.3.2.5.9 Rotor de chapas tipo prototipo II	89
3.3.2.5.10 Rotor de chapas tipo prototipo III	92
Capítulo IV. Ensayos y simulaciones realizadas	93
4.1 Introducción	93
4.2 Ensayos eléctricos experimentales	94
4.2.1 Fundamentos teóricos de las pruebas eléctricas	94
4.2.2 Fuentes y dispositivos empleados	95
4.2.3 Ensayos realizados	97
4.2.3.1 Ensayo de vacío	97
4.2.3.2 Ensayo de cortocircuito	100
4.2.3.3 Ensayo en carga	102
4.2.3.4 Ensayo de vacío con convertidor de frecuencia	106
4.2.3.5 Ensayo en carga con convertidor de frecuencia	108
4.3 Ensayos térmicos experimentales	113
4.3.1 Mecanismos de pérdida	113
4.3.2 Parámetros de diseño del modelo térmico	113
4.3.3 Realización del modelo práctico	114
4.3.3.1 Medida de las temperaturas del estator y del rotor	115
4.3.3.2 El modelo térmico del estator	116
4.3.3.3 Modelo térmico para el rotor	117
4.3.4 Proceso práctico para la determinación de los parámetros térmicos	119
4.3.4.1 Cálculo de los parámetros térmicos del estator	120
4.3.4.2 Cálculo de los parámetros térmicos del rotor	122
4.3.5 Gráficas obtenidas a partir de los parámetros térmicos	124
4.4 Ensayos mecánicos experimentales	126
4.4.1. Introducción	126
4.4.2 Pérdidas mecánicas y cálculo de momentos de inercia	126
4.4.2.1 Cálculo de la inercia del rotor conocida su geometría	127
4.4.2.2 Cálculo de la inercia del rotor por ensayo de deceleración	128
4.4.2.3 Cálculo de la inercia del rotor mediante inversor	128
4.4.3 Proceso práctico para la determinación de los parámetros mecánicos	129
4.4.3.1 Pérdidas por rozamiento de los cojinetes, ventilador y del aire	131
4.4.3.2 Determinación de las inercias de los rotores	134
4.4.3.3 Resistencia mecánica en largos periodos de funcionamiento	138
4.5 Simulaciones eléctricas mediante el programa Matlab-Simulink	141
4.5.1. Introducción	141
4.5.2 Funcionamiento de las simulaciones del Matlab-Simulink	141
4.5.2.1 Pasos a seguir para la ejecución de modelos	142
4.5.3 Ecuaciones en régimen permanente de los motores asíncronos	143
4.5.3.1 Ecuaciones para el ensayo de vacío	143
4.5.3.2 Ecuaciones para el ensayo de cortocircuito	144
4.5.3.3 Cálculo de los parámetros eléctricos para el motor de jaula	145
4.5.4 Ecuaciones en régimen transitorio para los motores asíncronos	147
4.5.4.1 Ecuaciones de los modelos en régimen estático	148
4.5.4.2 Ecuaciones de los modelos en régimen dinámico	148
4.5.4.3 Ecuaciones eléctricas de los motores analizados	150
4.5.4.3.1 Motor con rotor de jaula de ardilla	150
4.5.4.3.1.1 Motor con rotor de jaula a 1000 rpm	150

4.5.4.3.1.2 Motor con rotor de jaula a 1500-A rpm	151
4.5.4.3.1.3 Motor con rotor de jaula a 1500 rpm	151
4.5.4.3.1.4 Motor con rotor de jaula a 3000 rpm	152
4.5.4.3.2 Motor con rotor de chapas tipo <i>A</i>	152
4.5.4.3.2.1 Motor con rotor de chapas <i>A</i> , a 1000 rpm	152
4.5.4.3.2.2 Motor con rotor de chapas <i>A</i> , a 1500-A rpm	153
4.5.4.3.2.3 Motor con rotor de chapas <i>A</i> , a 1500 rpm	153
4.5.4.3.2.4 Motor con rotor de chapas <i>A</i> , a 3000 rpm	154
4.5.5 Gráficas de los motores mediante simulación con Matlab-Simulink	155
4.6 Simulaciones magnéticas mediante el programa FEMM	161
4.6.1. Introducción	161
4.6.2 Simulaciones con el programa FEMM	162
4.6.2.1 Importar dibujos desde otros programas	162
4.6.2.2 Agregar propiedades a los materiales	163
4.6.2.3 Condiciones de contorno	165
4.6.2.4 Creación del mallado de cálculo	165
4.6.3 Representación de resultados en forma de tablas	166
4.6.4 Forma de presentación gráfica de resultados	166
4.6.5 Representación de tablas con el programa FEMM	167
4.6.6 Representación del par con el programa FEMM	172
4.6.7 Representación del punto de trabajo de los motores con el FEMM	174
Capítulo V. Principio de funcionamiento del motor de chapas	177
5.1 Introducción	177
5.2 Campo magnético creado en el estator	177
5.2.1 Distribución de la inducción magnética en el estator	177
5.2.2 Dispersiones de flujo en el estator	183
5.2.2.1 Dispersiones de flujo en las cabezas de bobina	183
5.2.2.2 Dispersiones de flujo en Zig-Zag	184
5.2.2.3 Dispersiones de flujo en las ranuras	186
5.2.2.4 Dispersiones de flujo totales	188
5.3 Funcionamiento del motor con rotor de chapas sin anillos	188
5.3.1 Corrientes parásitas en las chapas	188
5.4 Funcionamiento del motor con rotor de chapas con anillos	194
5.5 Otras características relevantes del motor de chapas	198
5.5.1 Profundidad del campo estático	199
5.5.1.1 Reluctancia magnética de los elementos del rotor y estator	199
5.5.1.2 Conductividad eléctrica de las chapas del rotor	199
5.5.2 Campo estático y rotorico debido a las corrientes parásitas	201
5.5.2.1 Interacción de los campos magnéticos con el par y deslizamiento	202
5.5.3 Densidad de corriente en las chapas del rotor tipo <i>A</i> , a 3000 rpm	204
5.5.4 Mantenimiento de la corriente absorbida con variaciones de carga	205
5.5.5 Estudio de la fuerza electromotriz de una chapa	206
5.6 Funcionamiento térmico del motor a 3000 rpm con rotor chapas tipo <i>A</i>	207
5.7 Respuesta mecánica en el motor con rotor de chapas tipo <i>A</i>	208
Capítulo VI. Análisis constructivo del motor de chapas	211
6.1 Introducción	211
6.2 Análisis constructivo del motor a 3000 rpm con rotor de chapas tipo <i>A</i>	211
6.2.1 Ecuaciones constructivas del motor	211
6.2.1.1 Geometría del estator a 3000 rpm con rotor de chapas tipo <i>A</i>	211
6.2.1.2 Bobinados utilizados	221
6.2.1.2.1 Bobinado del estator a 3000 rpm	222

6.2.1.3 Ecuaciones que definen la geometría del rotor de chapas tipo <i>A</i>	223
6.2.2 Optimización de los materiales	226
6.2.2.1 Materiales constructivos del estator	226
6.2.2.1.1 Chapas núcleo estator	226
6.2.2.1.2 Revestimiento entre las chapas del estator	228
6.2.2.1.3 Chapas troqueladas estator	229
6.2.2.1.4 Manguito aislante núcleo-estator-conductores	229
6.2.2.2 Materiales constructivos de los conductores del estator	230
6.2.2.2.1 Conductores del estator	230
6.2.2.2.2 Aislamiento de los conductores del estator	230
6.2.2.3 Materiales constructivos de las chapas del rotor tipo <i>A</i>	230
6.2.2.3.1 Materiales constructivos del núcleo del rotor de chapas <i>A</i>	230
6.2.3 Factor de calidad (<i>G</i>)	232
6.2.3.1 Introducción	232
6.2.3.2 Efectos del valor del factor de calidad	234
6.2.3.3 Cálculo de los factores de calidad de algunos motores	235
Capítulo VII. Análisis electromagnético del motor	237
7.1 Introducción	237
7.2 Análisis electromagnético del motor a 3000rpm con rotor de chapas tipo <i>A</i>	237
7.2.1 Campo electromagnético creado por las ranuras del estator (β_s)	237
7.2.2 Fuerza electromotriz creada por el campo magnético del estator (E_s)	243
7.2.3 Campo electromagnético creado por el rotor (β_r)	246
Capítulo VIII. Respuesta de los motores con control directo de par (DTC)	249
8.1 Introducción	249
8.2 Principio de operación	249
8.3 Estimación del flujo y del par	252
8.4 Efecto de las fronteras de los controladores de histéresis	254
8.4.1 Efecto de la frontera del controlador del flujo	254
8.4.2 Efecto de la frontera del controlador del par	254
8.5 Ventajas e inconvenientes del control directo de par	255
8.5.1 Ventajas del control directo de par	255
8.5.2 Inconvenientes del control directo de par	255
8.6 Simulaciones y gráficas	256
8.6.1 Control directo de par motor jaula a 3000 rpm	256
8.6.2 Control directo de par motor macizo sin aros a 3000 rpm	258
8.6.3 Control directo de par motor macizo con aros a 3000 rpm	260
8.6.4 Control directo de par motor chapas tipo <i>A</i> , con 3000 rpm	262
8.6.5 Control directo de par motor chapas tipo <i>B</i> con 3000 rpm	264
8.6.6 Control directo de par motor chapas tipo <i>D</i> a 3000 rpm	266
8.7 Resultados obtenidos con el control directo de par	268
Capítulo IX. Análisis de resultados	269
9.1 Introducción	269
9.2 Análisis de resultados en los motores con rotores de chapas	269
9.2.1 Análisis eléctrico de los motores con rotor de chapas	272
9.2.1.1 Resultados eléctricos en carga motor chapas tipo <i>A</i>	279
9.2.1.2 Resultados eléctricos con inversor motor chapas tipo <i>A</i>	281
9.2.2 Análisis magnético de los motores con rotor de chapas	284
9.2.2.1 Motores con rotor de chapas en espiral tipos <i>B</i> , <i>D</i> y <i>Z</i>	284
9.2.2.1.1 Efecto de la variación del entrehierro	284
9.2.2.1.2 Efecto del mecanizado sobre los rotores de chapas	287
9.2.2.2 Motores con rotor de chapas en espiral tipos <i>A</i> , <i>E</i> y <i>F</i>	292
9.2.2.2.1 Efecto de los anillos en los rotores de chapas	292

9.2.2.2.2 Efecto de la curvatura de las chapas	294
9.2.2.3 Motor con rotor de chapas en espiral tipo <i>C</i>	306
9.2.2.3.1 Efecto del material en las magnitudes electromagnéticas	306
9.2.2.3.2 Efecto del material sobre el campo magnético	318
9.2.2.3.3 Efecto del aislante magnético de las chapas	327
9.2.2.3.4 Efecto del número de chapas que forma el rotor	331
9.2.3 Análisis térmico de los motores con rotor de chapas	342
9.2.3.1 Comparación térmica entre los motores de chapas	342
9.2.3.2 Características térmicas motor chapas <i>A</i> , con el deslizamiento	346
9.2.3.3 Características térmicas motor chapas <i>A</i> , con la velocidad	347
9.2.3.4 Resistencias y capacidades térmicas de los motores de chapas	348
9.2.4 Análisis mecánico de los motores con rotor de chapas	351
9.2.4.1 Pérdidas mecánicas de los cojinetes, ventilador y aire	351
9.2.4.2 Momento de inercia de los rotores de chapas	354
9.2.4.3 Resistencia mecánica rotores chapas con pruebas largas	355
9.3 Análisis de resultados entre diversos motores	358
9.3.1 Análisis eléctrico de los motores de jaula, macizo aros y chapas- <i>A</i>	358
9.3.1.1 Características eléctricas a diversos regímenes motores en carga	365
9.3.1.2 Características eléctricas con inversor de los motores en carga	370
9.3.2 Análisis magnético de los motores de jaula, macizo aros y chapas- <i>A</i>	375
9.3.2.1 Efecto de la variación del espesor del entrehierro	375
9.3.2.2 Efecto de los anillos en los rotores analizados	378
9.3.2.3 Efecto del material del rotor en las magnitudes electromagnéticas	380
9.3.2.4 Efecto del material del rotor sobre el campo magnético	387
9.3.3 Análisis térmico de los motores de jaula, macizo aros y chapas- <i>A</i>	394
9.3.3.1 Comparación térmica entre los diversos motores	394
9.3.3.2 Características térmicas de los motores con el deslizamiento	397
9.3.3.3 Características térmicas de los motores con la velocidad	402
9.3.3.4 Resistencias y capacidades térmicas de los motores	405
9.3.4 Análisis mecánico de los motores de jaula, macizo aros, y chapas- <i>A</i>	408
9.3.4.1 Pérdidas mecánicas de los cojinetes, ventilador y aire	408
9.3.4.2 Momento de inercia de los motores	410
9.3.4.3 Resistencia mecánica de los rotores con pruebas largas	412
Capítulo X. Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros	415
10.1 Conclusiones	415
10.2 Aportaciones	416
10.3 Trabajos futuros	418
Agradecimientos	421
Publicaciones derivadas de la tesis	423
Bibliografía	427
Libros	427
Artículos en revistas y congresos	432
Manuales, catálogos y otras publicaciones.....	438

