

CAPÍTULO X. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

10.1 CONCLUSIONES

El objeto de este trabajo era obtener un motor con un alto par de arranque pero con intensidades limitadas, con variaciones de la intensidad en función de la carga prácticamente inapreciables aunque con pérdidas en vacío contenidas, con un rendimiento aceptable en régimen permanente y con una buena respuesta en periodos transitorios.

Se consulto bibliografía en busca de información previa sobre motores similares al motor propuesto, pero los resultados fueron siempre negativos. Nunca puede garantizarse que no existen precedentes sobre un tema concreto, pero si podemos asegurar que con las consultas realizadas no se han encontrado referencias, ni siquiera con alguna similitud, sobre un motor con las características demandadas en esta investigación.

Por tanto, para alcanzar estos objetivos, en primer lugar se construyó un rotor formado por un conjunto de chapas magnéticas dispuestas radialmente con las testas aplicadas directamente sobre el eje. Estas chapas cubrirían completamente la superficie cilíndrica exterior del eje, y para eliminar los espacios libres que resultarían de aumentar la distancia radial, dado que el espesor de las chapas era constante, se inclinaron las chapas arrollándose unas sobre las otras, resultando el rotor como si estuviera formado por un conjunto de chapas en espiral.

Con esta configuración se pretendió que los campos magnéticos creados en el estátor quedaran más confinados en la periferia del rotor, induciéndose unas f.e.m. periféricas y corrientes a lo largo de las propias chapas, activas únicamente en su periferia. Estas corrientes periféricas disponen de más sección para circular, si las comparamos con las corrientes de un motor con rotor de jaula normal, creando unos pares antagonistas que permiten el giro del rotor.

En concreto cuatro tipos de estatores (1000 rpm, 1500 rpm tipo A, 1500 rpm y 3000 rpm) con características mecánicas y constructivas iguales han sido rebobinados y probados con los siguientes rotores construidos para tal fin: jaula de ardilla, macizo, macizo con aros y rotor hueco. Estos resultados han sido comparados con once variantes de rotores de chapas en espiral que combinan materiales y formas constructivas de sus elementos, demostrándose que es posible disminuir de forma considerable las corrientes de arranque sin perjudicar el valor del par, alargando la vida útil de los motores.

Aparte de las pruebas experimentales realizadas (eléctricas, térmicas y mecánicas), se modelizarón los modelos para comprobar su comportamiento a diversos regímenes (Matlab-Simulink), comprobándose asimismo, su respuesta magnética delante de cambios en el número de chapas, forma, curvatura o material que las forman, mediante el programa de elementos finitos FEMM.

Estas características hacen que estos motores sean presumiblemente adecuados para accionamientos en los que se requiera disponer de un elevado número de arranques y paradas por hora (regímenes fuertemente transitorios), siendo su principal inconveniente el elevado coste del utillaje empleado en la configuración de las chapas del rotor, por lo que su construcción debería pasar por grandes series de fabricación. Actualmente existen innumerables accionamientos de las características mencionadas siendo por tanto muy amplio su mercado.

A modo de resumen, y como comparación entre los motores más significativos analizados en el presente trabajo (jaula de ardilla, chapas tipo A y macizo con aros), se presenta la siguiente tabla, en la cual se detallan algunas de las magnitudes principales que rigen el funcionamiento y comportamiento de estos motores.

Magnitudes eléctricas	Motor jaula	Motor de chapas-A	Motor macizo con aros
Par máximo (N·m)	7.59 (2100 rpm)	5.72 (0 rpm)	4.68 (0 rpm)
Potencia máxima (W)	5051 (0 rpm)	1790 (0 rpm)	2826 (0 rpm)
Intensidad máxima (A)	9.643 (0 rpm)	3.128 (0 rpm)	4.87 (0 rpm)
Rendimiento máximo (%)	77.8 (2900 rpm)	70.1 (2400 rpm)	47.4 (2700 rpm)
Potencia útil máxima (W)	1766 (2400 rpm)	788 (1930 rpm)	615.4 (2100 rpm)
Par/intensidad (N·m/A)	1.55 (2800 rpm)	1.84 (1170 rpm)	0.97 (1600 rpm)
Par/potencia (N·m/W)	0.00264 (2800 rpm)	0.0032 (2000 rpm)	0.0018 (2300 rpm)
Factor de potencia	0.90 (2300 rpm)	0.75 (2000 rpm)	0.87 (2800 rpm)
Intensidad nominal (A) (a 2800 rpm)	2.703	1.408	1.445
Intensidad de vacío (A) (380V y 2800rpm)	1.412	1.346	1.023
Intens. de cortocircuito (A) (380V-2800rpm)	5.150	3.630	3.700
Par nominal (N·m) (2800 rpm)	3.80	0.94	0.88
Potencia nominal (W) (2800 rpm)	1440	425	630
Rendimiento nominal (%) (2800 rpm)	77.3	57.6	46.3
Magnitudes magnéticas			
B _{máxima entrehierro} (T) (2800 rpm)	0.710	0.790	0.964
F _{magnética} (N) (2800 rpm)	0.015	0.457	0.326
Potencial vector flujo (Wb) (2800 rpm)	$7.2 \cdot 10^{-4}$	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$4.32 \cdot 10^{-3}$
Dispersión cabezas de bobina (Wb/Av/m)	1157852	1157852	1157852
Dispersión en Zig-Zag (Wb/Av/m)	1870070	20053	982782
Dispersiones de flujo en ranuras (Wb/Av/m)	803732	2427113	1935324
Dispersiones totales (Wb/Av/m)	3831655	3604859	4075958
Magnitudes térmicas			
Temperatura estator (°C) (s = 2.5; 10; 25%)	34.0 65.0 ND *	38.6, 42, 47.9	36.3 54.1 72.9
Temperatura rotor (°C) (s = 2.5; 10; 25%)	51.9 115 ND *	63.9 69.2 76.7	63.7 86.0 111.8
Temperatura estator-ambiente (°C) (s=2.5%)	11.5	15.6	13.8
Temperatura rotor-ambiente (°C) (s=2.5%)	29.4	40.9	41.2
Resistencia térmica estator (°C/W)	0.0635	0.0851	0.0784
Capacidad térmica estator (W·s/°C)	420	1080	870
Constante de tiempo estator (s)	6619	12686	13269
Resistencia térmica rotor (°C/W)	0.1622	0.2232	0.2341
Capacidad térmica rotor (W·s/°C)	780	1140	1560
Constante de tiempo rotor (s)	4808	5107	6665
Resistencia térmica rotor-estator (°C/W)	0.0988	0.1381	0.1537
Magnitudes mecánicas			
Pérdidas cojinetes (W a 1000rpm)	10	23	24
Pérdidas cojinetes (W a 1500rpm)	15	55	32
Pérdidas cojinetes (W a 3000rpm)	32	112	60
Aceleración rotor (rad/s ²)	157.6	158.4	153.8
Par total (N·m)	0.834	1.032	0.984
Par pérdidas (N·m)	0.387	0.601	0.468
Par neto (N·m)	0.445	0.429	0.514
Momento de inercia (kg/m ²)	$2.829 \cdot 10^{-3}$	$2.714 \cdot 10^{-3}$	$3.343 \cdot 10^{-3}$

* ND: no disponible

Tabla X.I. Comparación entre los motores de jaula, chapas-A, y macizo con aros.

10.2 APORTACIONES DE LA TESIS

Las aportaciones más importantes que presenta este trabajo son las siguientes:

- Se ha realizado el diseño teórico de los rotores hueco, macizos y de las once variantes de rotores de chapas. Posteriormente se han creado los útiles que permiten su construcción y se ha realizado la misma, rebobinándose finalmente, los tres estatores adquiridos, para convertirlos junto al original en los cuatro motores finales (1000, 1500-A, 1500, y 3000 rpm).
- Se ha demostrado que los motores con rotor de chapas construidos con chapas aisladas no llegan a funcionar correctamente debido a las grandes fuerzas magnéticas que se generan en las chapas, obligando a las mismas a doblarse hasta alcanzar el estator. Este efecto se da incluso con las chapas mecanizadas, aumentando con la tensión.

- Se demostró que los motores con rotor de chapas, cuando éstas no estaban aisladas, si podían funcionar correctamente consiguiéndose unos valores aceptables de sus respuestas electromagnéticas, térmicas y mecánicas. Pudiéndose destacar las siguientes particularidades.
 - Se ha deducido el principio de funcionamiento de estos motores de chapas, determinándose las expresiones analíticas para la intensidad, par y f.e.m, que rigen sus comportamientos. Se han dado, asimismo, las distribuciones de estas magnitudes en el interior del rotor, y en concreto, de las propias chapas, determinándose la intensidad que circulará por los anillos laterales y como influirán éstos en las nuevas distribuciones de las magnitudes anteriores.
 - Se ha comprobado sus respuestas eléctricas en vacío, cortocircuito y en carga, hallándose sus circuitos equivalentes en régimen permanente y transitorio. Asimismo, se ha comprobado la respuesta de estos motores al variar la frecuencia para las magnitudes eléctricas más importantes.
 - Se ha constatado el mejor régimen de funcionamiento para estos motores de chapas, así como la poca variación que sufre la corriente al variar la carga, dándose el razonamiento de esta última consecuencia.
 - Se ha comprobado que las secciones entre las chapas del rotor que contienen aire resultan decisivas en la creación de la reluctancia característica del motor. Fenómeno que facilita una rápida respuesta en los transitorios lo que resulta de sumo interés. Por su parte, la alta reluctancia viene acompañada por una baja inercia que supone una constante eléctrica y mecánica de bajo valor.
 - Se han obtenido las expresiones empíricas que rigen las respuestas de los motores (par e inducción) al variar el número de chapas que forman el rotor, determinándose asimismo su número óptimo y las principales causas de esta variación.
 - Se ha determinado la ecuación diferencial [2.87] más idónea para el radio de curvatura de las chapas. Cualquier otra curva hace disminuir las prestaciones de los motores. Esta disminución es más perceptible con curvas más abiertas que con radios más cerrados.
 - Se ha determinado y cuantificado analíticamente el efecto de los anillos laterales y centrales en los rotores de chapas, así como el efecto del mecanizado superficial de los mismos.
 - Se han desarrollado las expresiones que permiten cuantificar la variación del par y la inducción en función del espesor del entrehierro.
 - Se ha demostrado que la elección de un material para las chapas con una buena relación permeabilidad-conductividad (valor óptimo) es más importante que la búsqueda de un material de mejor calidad. Se han desarrollado en este sentido, las ecuaciones que permiten obtener estos valores óptimos así como sus consecuencias sobre la inducción y el par. Asimismo, se han cuantificado como influyen las curvaturas, número o configuración de las chapas en la variación de estos valores óptimos.
 - Se ha analizado la forma del campo magnético en función del material, curvatura, espesor y otras características de las chapas. Determinándose analíticamente su influencia en la profundidad que alcanzan las líneas de campo o en la desviación que experimenta el mismo.
 - Se ha determinado el comportamiento térmico de los motores de chapas, en forma gráfica y analítica, con las variaciones de la velocidad o el deslizamiento, comparándose sus

respuestas con la de los motores macizo y jaula. Se ha comprobado que los motores de chapas pueden funcionar con grandes variaciones de carga de forma permanente sin problemas de calentamientos importantes. Finalmente se han determinado sus capacidades, resistencias y constantes de tiempo térmicas.

- Se han hallado las pérdidas mecánicas en los cojinetes y por el efecto ventilador en diversos regímenes, obteniéndose asimismo, las inercias y las respuestas de estos rotores en largos periodos de funcionamiento, siendo todos estos valores perfectamente asumibles y sin presentar las superficies de los rotores signos de roce o pérdidas de rigidez mecánica.
- Se han obtenido las respuestas eléctricas, magnéticas, térmicas y mecánicas de los motores con rotor de jaula, hueco y macizo, comparando estos valores con los hallados para el motor de chapas. Demostrándose que en todos los aspectos el motor de chapas es superior al macizo, sin desentonar con respecto al de jaula en bastantes prestaciones, e incluso superándolo en algunas.
- Se han obtenido los valores del factor de calidad de los diferentes motores de chapas, comparándose con los de los restantes motores analizados, y confirmándose que los valores se acercan en algunos modelos de chapas a los obtenidos con los motores de jaula de ardilla.
- Se ha creado un algoritmo de cálculo implementado con MAPLE, que permite hallar las densidades de corriente, flujo magnético y fuerzas electromotrices en cualquier punto del motor de chapas. Este programa es aplicable a cualquier rotor de chapas ya que permite la elección del material y tipo de curva.
- Se ha analizado y comparado las respuestas de los motores de chapas con control directo de par con sus homólogos macizo y jaula de ardilla. Observándose que el algoritmo del DTC es válido para este tipo de motores, ofreciendo un rango óptimo de velocidad y par. Asimismo según las simulaciones, se ha comprobado que estos motores responden dinámicamente con calidad tanto para el par como para la velocidad y el flujo estatorico, abriendo una gama de aplicaciones en accionamientos eléctricos. Finalmente, el rizado esta controlado y limitado entre los controladores de histeresis para el par, el flujo o la intensidad.

10.3 TRABAJOS FUTUROS

Al no conocerse el comportamiento del motor analizado, el estudio de este trabajo ha sido generalista, lo que ha supuesto un inconveniente tanto de tiempo como de extensión. Pero una vez concluido, precisamente este volumen de datos guardados en forma gráfica, de tablas o ecuaciones, abre unas buenas perspectivas ante trabajos futuros, siendo varios los puntos a analizar o simplemente ampliar.

A continuación se exponen algunos de los temas que se proponen para futuras investigaciones, pudiéndose dividir en tres categorías:

- Análisis de algunos aspectos surgidos durante el desarrollo del presente trabajo y que no ha sido posible tratar debido a su extensión o por desviarse del cometido principal del mismo:
 - Estudio de la circulación de las corrientes por el interior de las chapas.
 - Un buen método para ello, consistiría en la realización de una termografía del rotor después de un periodo dilatado de funcionamiento, lo cual nos permitiría definir con exactitud el recorrido de estas corrientes.
 - Estudio de componentes constructivos del rotor tan importantes como los anillos laterales o centrales.

- La simulación en 3D permitiría entrar elementos difíciles de analizar mediante el programa en 2D FEMM, sirviendo además de referencia para la comprobación de los resultados obtenidos mediante termografías u otros métodos.
- Análisis en profundidad de aspectos constructivos del rotor, remarcando su influencia en las respuestas finales obtenidas.
 - Existen varios aspectos constructivos dignos de un análisis en profundidad. Entre ellos cabría destacar el efecto del radio de curvatura y el espesor de las chapas que forman el rotor, aspectos por otra parte, decisivos en el comportamiento del motor de chapas.
- También se debería reforzar el análisis de las ecuaciones que definen el comportamiento global del motor de chapas.
 - Intensidades, campos magnéticos, fuerzas electromotrices, o diferentes tipos de distribución sería interesante analizarlos de forma más precisa, comprobando y validando los diferentes resultados obtenidos mediante ensayos o simulaciones.
- Un trabajo aparte de investigación se correspondería con la construcción de nuevas variantes de rotores de chapas, pero en esta ocasión con unas características bien definidas, realizándose sus simulaciones eléctricas térmicas y magnéticas. Entre ellas se aconsejaría la construcción de los siguientes modelos.
 - Construcción de un rotor con chapas sin aislar pero con un material que ofreciera unos valores de permeabilidad-conductividad óptimos.
 - Hallar un material con unas características exactas es difícil, pero si es posible encontrar materiales con valores aproximados para estas magnitudes, lo que nos permitiría mejorar las respuestas (en particular las eléctricas y magnéticas).
 - Construcción de un rotor con chapas especiales que contengan dos secciones o capas de material.
 - Si se fabricasen los rotores con unas chapas especiales formadas en su parte superior (cerca del radio exterior del rotor) por una delgada capa de material conductor y permeable, y en cambio, en su parte inferior (radios cercanos al del eje) con material más aislante, se conseguiría que las corrientes no penetrarían tanto hacia el interior con lo que su aportación sobre el par neto final sería más considerable.
 - Construcción de un motor de chapas con pequeñas potencias (menor de 200 W).
 - Estos motores de baja potencia estarían destinados a aparatos con frecuentes paradas y arranques, en los cuales se valora positivamente un elevado par de arranque. Entre estos dispositivos podría encontrarse la maquinaria textil.
- Finalmente, sería conveniente realizar una investigación sobre el comportamiento electromagnético transitorio de los motores. Este análisis debería centrarse en los motores con mejores resultados y contener los siguientes puntos:
 - Se debería realizar un estudio en régimen transitorio completo con la obtención de las magnitudes que permitan afinar en que aplicaciones sería recomendable la utilización de estos motores.
 - Aunque se ha analizado el régimen transitorio del motor de chapas tipo *A*, resultaría de interés un estudio más profundo, no sólo de este modelo, sino del resto de motores de chapas, que permitieran obtener nuevas perspectivas de aplicación de los mismos.
 - Se debería realizar la implementación práctica del control vectorial en el laboratorio para los motores de chapas analizados.
 - Teóricamente la respuesta que han dado estos motores con control vectorial a sido satisfactoria, respondiendo bien a las consignas establecidas y con la precisión y

rapidez adecuadas. Pero estos resultados deberían ser contrastados con ensayos experimentales que validasen el procedimiento.