

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS GENERALES

1.1 ESTADO DEL ARTE

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, con un rendimiento aceptable en régimen permanente y con una buena respuesta en periodos transitorios, eran algunos de los objetivos de partida que intentábamos alcanzar con esta investigación.

Sabíamos lo que buscábamos pero no donde encontrarlo. El motor de jaula no podía darnos estos resultados (creemos que sería difícil obtener con este motor alguna de las prestaciones), y el motor que más se acercaba a estos requisitos, el motor con rotor macizo, daba unos resultados muy alejados a los esperados y aparte sufría grandes calentamientos en según que regímenes debido al gran valor resistivo de su rotor.

Existía la posibilidad de mejorar el motor con rotor macizo, aquí si fueros útiles los trabajos realizados por otros investigadores, pero al final decidimos que lo mejor sería intentar diseñar un motor especial pensado desde el principio en las prestaciones que queríamos conseguir y paso a paso adaptarlo a nuestras necesidades.

Se realizaron consultas en busca de información previa sobre motores similares al motor propuesto, pero los resultados fueron siempre negativos. Nunca puede garantizarse que no existen un precedente 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.

Cabía pues, documentarnos en otros motores y aprovechar cualquier similitud y respuesta que nos pudiera servir de referencia, pero el trabajo de diseño del nuevo motor era evidente que correría a nuestro cargo. En los siguientes párrafos, se indican algunas referencias de las cuales se sacaron ideas o simplemente sirvieron para ver en que estado se encontraba la investigación de los nuevos modelos de motores trifásicos de inducción.

Uno de los puntos de partida importantes fue el trabajo de Samuel Tous, en su artículo, “*Utilaje para conformar chapas alabeadas para un motor experimental de 5 CV y 1000 rpm, tipo k248d6*”, publicado en el Annual Report Oerlikon-Bronsw Boveri, Sabadell del año 1994. Este artículo nos hizo pensar en la posibilidad de la construcción de un motor con las características sustancialmente distintas al motor convencional con rotor de jaula o macizo, pero que podía tener buenas prestaciones si se elegían correctamente materiales, número de chapas, curvatura de las mismas... etc.

Para los motores con rotor macizo se encontraron varias referencias útiles para nuestros propósitos. Concretamente en la publicada en IEEE Transactions on Magnetics, Vol, 35. No del 3 de Mayo de 1999. En la cual M.E. Zaïm, nos indicaba, “*Un modelo no lineal para el diseño del rotor macizo en una máquina de inducción*”. En este estudio y mediante los métodos de elementos finitos usados para el cálculo en régimen permanente de las características electromagnéticas de un motor con rotor macizo en función del deslizamiento, se intentaba superar el problema de la saturación que sufren este tipo de rotores en según que regímenes y se daba un método alternativo que permitía obtener el par y rendimiento máximo en función del deslizamiento incluso con altas velocidades de rotación. Los resultados estaban contrastados con valores experimentales.

Otro artículo interesante referido al motor con rotor sólido lo encontramos en IEEE Transactions on Electrical Machines, Vol 32, No del 6 de Julio de 2000. En el M. Z. Wellintong. Este artículo hacía referencia a la “*Investigación experimental de un motor de inducción de alta velocidad con rotor sólido y material composit*”. El estudio de los materiales es obvio que representaba un punto

importante de nuestro estudio e incluso después de la conclusión de esta tesis, aún figura en la sección de trabajos futuros. Concretamente Wellintong, proponía unos materiales para la construcción del rotor macizo formado por chapas de cobre, $\text{Cu}+(\text{Fe}-\text{Co})$ y $\text{Cu}+(\text{Fe}-\text{Ni})$ con un espesor de unas micras, evaluándose mediante un circuito equivalente cuyos parámetros se determinaron mediante pruebas con rotor bloqueado y sin carga con una maquina de 400 Hz de frecuencia nominal. Una característica que buscábamos en nuestro motor y que encontramos en este artículo, consistía en que era posible conseguir un motor que absorbiera más intensidad en funcionamiento normal que con el rotor bloqueado, aparte, en este motor, el parámetro X_e , dependía del deslizamiento.

Con el título “*Cálculo del campo electromagnético en un motor de inducción con rotor sólido*”, de J. Huppunen y J. Pyrhönen, publicado en las actas del ICEM 2000, Vol. I, pág. 472, nos pareció un artículo interesante ya que los autores describían un método rápido y preciso para el cálculo de campos electromagnéticos en los motores de inducción con rotor macizo. Los autores remarcaban la sencillez en la construcción de estos rotores pero incidían en la dificultad que entrañan sus cálculos electromagnéticos debido al comportamiento no lineal de los materiales del rotor y al hecho de que una buena resolución del problema pasa por un análisis en tres dimensiones.

Como nuestro estudio también contemplaba la comparación de otros motores con rotores especiales, resulto interesante un artículo publicado en las actas del ICEM 1998, Vo. I, pág. 482, con título “*Disminución del par electromagnético debido a la excentricidad del rotor en un motor con rotor hueco de material diamagnético*”, en el cual se proponía un método analítico para motores lineales basado en las variaciones de la densidad de flujo magnético salvando los problemas que conlleva el cálculo de un motor con dos entrehierros donde son frecuentes las excentricidades de estos espacios ocupados por aire y por tanto las disimetrías en las distribuciones del flujo.

También el artículo “*Determinación de los parámetros del circuito equivalente de un motor asíncrono con rotor resistivo*”, de N. Galan y R. Vives, publicado en las actas del ICEM 1998, pág. 297, nos proporciono información de como obtener los parámetros del circuito equivalente mediante la utilización de las ecuaciones de la tensión combinadas de forma correcta, lo que representaba una forma cómoda, o como mínimo complementaria, para la comprobación de resultados.

En el artículo “*Análisis de un motor de inducción con rotor macizo mediante elementos finitos complejos*”, R. Ibtouen y R. Kechroud, IEEE, actas del IEMDC-01, Vo. III, pág. 1606, se analizaba un método de predicción en régimen permanente basado en dos tiempos de arranque; w , para el estator y w_s para el rotor. La interacción entre el rotor y el estator estaba realizada por dos multiplicadores de Lagrange, uno para designar el entrehierro y otros espacios ocupados por aire, y otro para el resto del rotor.

En la misma línea se expresaba el artículo “*Una nueva aproximación para el cálculo del circuito equivalente del motor con rotor macizo*” de C. Liu y R. Yao, IEEE, actas del IEMDC-01, Vo. III, pág. 1612. Aparte de recordarnos la dificultad de la obtención de los parámetros del circuito equivalente en motores con saturación y su variabilidad con el deslizamiento, los autores proponían un método basado en la interacción del campo magnético con el circuito eléctrico de la máquina considerándose conjuntamente la acción de la saturación y las condiciones de operación (deslizamiento).

Asimismo, con el título “*Optimización y diseño de máquinas eléctricas*”, de S. Bolognani y M. Bianchi, publicado en IEEE Transactions on Electrical Machines, Vol 25, No. del 8 de Octubre de 2001, se presentaba un programa de cálculo que permite el diseño de máquinas eléctricas a velocidad variable a partir de algoritmos de cálculo utilizando los elementos finitos como soporte en las respuestas magnéticas. Este método, podía sernos de gran utilidad ya que nuestro motor debería funcionar en regímenes variables en bastantes ocasiones.

Por su parte, J.T. Boys, y M.J. Miles, en IEE Proc-Electr Power Appl, Vol. 141, No. 6, Noviembre de 1994 con “*Modelo térmico empírico para motores de inducción*”, describen un modelo térmico empírico que proporciona la estimación de las temperaturas de los conductores tanto del estator como

de rotor en régimen permanente o en régimen transitorio. Asimismo este método puede funcionar con flujo magnético constante o variable. El modelo propuesto se basa en encontrar un único valor para la resistencia térmica y para la constante de tiempo del proceso de calentamiento de cada bobinado, siendo posible validar el método en tiempo real, comprobándose la variación de la resistencia de los bobinados debido al cambio de la temperatura. Este método es útil en motores de hasta unos 7.5 kW de potencia. Para nosotros este método sirvió como comprobación y validación de los resultados obtenidos mediante el método empírico utilizado en los cálculos térmicos de los diversos motores.

También resulto útil el artículo “*Obtención del modelo para motores de inducción con rotor con ranuras inclinadas*”, de A. Tenhunen, A. Arkkio. Units Electromechanics Publications, abs. June 2001. Describen un modelo que permite la simulación de motores de inducción con rotores con ranuras oblicuas. Para ello, se utilizan elementos finitos en dos dimensiones para el análisis del campo magnético. Las ranuras oblicuas del rotor son consideradas como intersecciones entre discos cortados con planos perpendiculares al eje. La solución de la ecuación no lineal dependiente del tiempo es obtenida usando integración paso a paso.

Por su parte, A. Tenhunen con “*Cálculo mediante elementos finitos del balance magnético de las corrientes circulantes entre bobinados paralelos en un motor de inducción con rotor excéntrico*”, detalla que un motor de inducción con rotor excéntrico, experimenta una aproximación hacia la zona donde el entrehierro es más pequeño. La distribución asimétrica del flujo debida a la excentricidad del rotor produce unas corrientes en remolino en el rotor y corrientes paralelas a los bobinados del estator. Estas corrientes disminuyen el par obtenido desequilibrando la distribución del flujo magnético. En este artículo se detalla un modelo de cálculo mediante elementos finitos que permite cuantificar los efectos de esta distorsión del campo magnético a diferentes deslizamientos. Este modelo sirve además, para motores con rotor situado en paralelo o en diagonal con respecto al estator

J. P. Ducreux, y A Diop en su artículo “*Cálculo de la pérdidas electromagnéticas en motores con altas velocidades*”, publicado en Electrimacs’96. Saint-Nazaire, pp. 1017-1022 en septiembre de 1996, hacen alusión a un método sencillo que permite obtener, al menos de forma aproximada, las pérdidas en motores funcionando a altas frecuencias. En nuestro caso, presumiblemente el motor de chapas debería aumentar de forma significativa sus prestaciones con aumentos de velocidad, por lo que este artículo podía resultar de interés en el cálculo de estas pérdidas.

Los efectos de la saturación magnética y de las ranuras con diseños especiales podían ser compartidos por nuestro motor, por lo que el artículo de S. Salon, D. Burow, M. De Bortoli y C. Salvia, “*Efectos de las ranuras cerradas y saturación magnética en motores de inducción*” publicado en IEEE, Trans. Magn, Vol 30, págs. 3697-3700, del mes de septiembre de 1994, nos puso en antecedentes sobre problemas de saturación que no se hicieron esperar en los ensayos de nuestros motores de chapas.

En la misma conferencia de Electrimacs’96 celebrada en Saint-Nazaire en septiembre de 1996, C.H. Conte y G. Grellet estudiaban la influencia de los armónicos en los motores con rotor macizo saturado, en un artículo que llevaba por título: “*Influencia de los armónicos en los motores asíncronos con rotor macizo saturado*”.

Se reviso un artículo, que no por antiguo carecía de valor. Concretamente fue publicado en octubre de 1954, por W. Mac. Lean en Journal of Appl. Phys, en su volumen 25. El artículo con título “*Teoría de las ondas electromagnéticas en motores con rotores macizos*”, era un estudio realizado desde una perspectiva física, pero del cual se podían extraer algunas conclusiones interesantes para el estudio de estas máquinas eléctricas.

Finalmente la tesis doctoral de M.E. Zaïm, “*contribuciones a la concepción de máquinas asíncronas con rotor macizo*”, publicada en noviembre de 1990 por Es-Sciences, resultaba un compendio de lo investigado hasta el momento para estos rotores macizos, que aunque no resultan comparables a los rotores de jaula, no dejan de ser analizados por numerosos investigadores por la sencillez que presenta su construcción.

1.2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

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 contenidas, que respondiera bien en sistemas en los que los arranques y paradas fueran frecuentes como las máquinas lavadoras electrodomésticas, además, la respuesta térmica debería permitir su funcionamiento a lo largo de toda la curva de carga. Aparte, este motor debería ser de fácil construcción para ser rentable, y mecánicamente resistente a las frecuentes paradas y arrancadas a los que debería estar sometido.

La verdad que al principio no teníamos muy claro por donde empezar, ya que 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 tiempo y dinero, pero a la hora de simular un motor que nunca había sido probado era muy difícil dar por buenos los resultados sin un referente experimental que lo corroborase, máxime si tenemos presente que del motor propuesto no existían simulaciones ni pruebas precedentes.

Parecía pues lógico y obligado construir físicamente estos motores, pero aún así, una vez construidos para poder compararlos fielmente con los motores existentes en el mercado harían falta referentes de motores de jaula o macizos de tamaño y características similares, y esto era realmente difícil, 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 resulta 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 serviría como patrón y podía ser adquirido con la compra de un motor de jaula 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 probarlos como mínimo con los regímenes estándar de 1000, 1500, y 3000 rpm.

Las ideas empezaban a tomar forma, pero aún surgió una última duda, ¿si adquiríamos tres motores con velocidades diferentes también la carcasa y construcción de los motores sería diferente con lo cual la comparación no sería del todo precisa. Se optó por tanto, por adquirir todos los motores a igual velocidad, concretamente a 1500 rpm, y después serían rebobinados los estatores a 1000 rpm y 3000 rpm. Incluso el motor original de 1500 rpm también se volvió a rebobinar ya que una vez realizadas las pruebas con el mismo, se apreció que en algunas de las condiciones extremas a las que se hacían funcionar los motores durante los ensayos, 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 diez modelos de chapas, más el macizo, 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, de forma que los defectos y virtudes hallados con sus ensayos sirvieran de referente en los modelos posteriores, así de forma paulatina, se irían mejorando los modelos hasta alcanzar los objetivos propuestos.

La verdad es que la realidad fue distinta, ya que el operario que nos ayudo en la construcción de los rotores y la maquinaria utilizada para ello, estaba disponible en contadas ocasiones, (máxime si tenemos en cuenta el tiempo de 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 y del propio operario permitían esta labor. La construcción de estos rotores en una empresa dedicada al sector eléctrico resulto del todo imposible debido tanto a aspectos económicos como prácticos, simplemente por ser un motor no convencional.

Cabía entonces preguntarnos: ¿los rotores se construyeron por que sí, sin saber mucho lo que estábamos haciendo? La respuesta es un rotundo no, ya que aún sin probar los motores, ya se tenía una idea de lo que como mínimo sería importante analizar. Así se construyeron rotores con y sin aros, con aros 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 estriadas o simplemente soldadas, con equilibrado con adición o sustracción de masa... etc. Por tanto, podíamos construir muchos rotores aún sin ser probarlos, los cuales seguro que nos servirían para responder a las hipótesis que nos planteamos.

Se probaron regularmente los primeros modelos (*Z*, *D* y *B*), comprobando que la idea de las chapas colocadas sobre el eje del rotor en forma de espiral tenía sentido y los motores funcionaban dando unas respuestas eléctricas razonables con lo esperado. A partir de estos modelos, las pruebas fueron distanciándose, y no todos los modelos se probaron cuando se terminaron de construir.

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, 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 del Campus de Terrassa los cuales están durante los periodos docentes saturados, debiéndose buscar para las pruebas las primeras horas de la mañana o las últimas del día e incluso en ocasiones durante la noche. Los únicos ensayos que resultaron rápidos fueron las pruebas mecánicas, las cuales se realizaron con el analizador disponible en las mismas dependencias de Departamento Eléctrico del Campus de Terrassa que simplifico enormemente el trabajo.

1º Fase. En esta fase se rebobinaron los estatores para diversos regímenes.

Estator a 1000 rpm → Estator a 1500 rpm-A → Estator a 1500 rpm → Estator a 3000 rpm

2º Fase. Construcción de los rotores convencionales.

Rotor de jaula → Rotor macizo sin aros → Rotor macizo con aros → Rotor hueco

3º Fase. Construcción de los rotores de chapas.

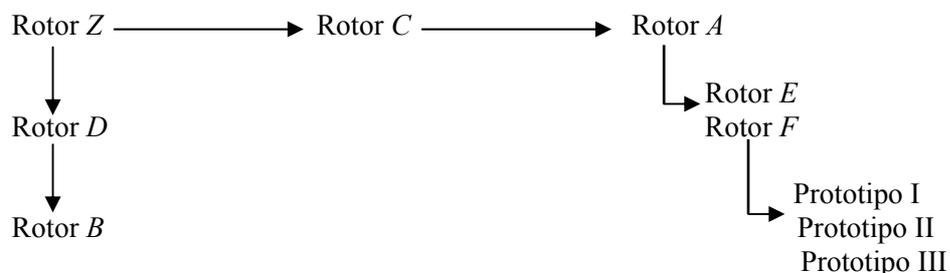


Figura 1.1 Relación en el tiempo de la construcción de los motores utilizados en la tesis.

Si las pruebas eléctricas, térmicas y mecánicas se realizaron en los laboratorios, las simulaciones eléctricas y magnéticas eran más flexibles ya que sólo era necesario el concurso de los programas Matlab-Simulink y FEMM, aparte del ordenador correspondiente. Concretamente, para las pruebas

magnéticas en las que se utilizó el programa de simulación en 2D de elementos finitos FEMM, de libre difusión, nos encontramos con el problema de no estar preparado este programa para el análisis de motores como el propuesto en esta tesis, por lo que nos tuvimos que poner en contacto con su fundador (Sr. Mekeer) el cual atentamente nos asesoro para adaptarlo 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 considerados convencionales (con un pentium IV de 1.75 GHz y 500MB de RAM ni tan siquiera se iniciaba la simulación de algunos modelos), por lo que se debió de adquirir un ordenador potente (pentium IV a 3.2 GHz con 1.1 GB 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. El tiempo empleado para el rotor macizo (al cual se le incorporaron unos círculos concéntricos que aumentan su mallado y por tanto su precisión) es de aproximadamente de dos minutos por motor y simulación. Finalmente para el rotor de chapas con un espesor de las mismas de 0.25 mm (el más lento), la simulación de un modelo requiere de unos 30 minutos. En total entre los modelos del Matlab-Simulink y del FEMM, necesitamos otro año para completar todas las simulaciones.

En cuanto a la secuenciación en la construcción de los rotores se ha seguido una norma sencilla. En primer lugar se rebobinaron los estatores para conseguir los cuatro regímenes de velocidad. En una segunda fase, se construyeron los rotores de los cuales no existían problemas de diseño como fueron los rotores macizos con y sin aros (recordar que el rotor de jaula ya estaba construido) y el rotor hueco de material amagnético. Finalmente, en una tercera fase se paso a la construcción de los rotores de chapas, de los cuales se realizaron once variantes.

El rebobinado de los estatores y la construcción de los rotores convencionales no necesitan ninguna justificación, pero en cambio la construcción de los de chapas si que merece un comentario aparte.

En primer lugar, indicar que las letras con las que se denominaron los motores con rotores de chapas no responden a criterios de construcción ni a secuencia alfabética alguna, sino a razones internas (incluso los nombres de las empresas donde se había adquirido la chapa podían representar un motor), no debiéndose dar por tanto más importancia a esta relación que la de una simple denominación.

Aclarado este aspecto, nos formulamos la siguiente pregunta: ¿qué intentábamos averiguar con la construcción de estos rotores de chapas? De la respuesta a esta pregunta surgirían los modelos a construir. A priori quisimos dar respuesta a las siguientes cuestiones todas referentes a cuestiones eléctricas, térmicas, mecánicas y magnéticas de los motores en estudio:

- ¿Cómo afectaría si la superficie del rotor no se mecanizaba dejando las aristas de las chapas y por tanto el entrehierro variable?
- ¿Cómo afectaría un aumento o disminución en el entrehierro?
- ¿Cómo afectaría la inclusión de aros laterales en el rotor?
- ¿Afectaría a los resultados si estos aros laterales eran de cobre o aluminio?
- ¿Tendría influencia la forma de las aletas de ventilación con los que se equiparía a los aros laterales del rotor?
- Si además de los aros laterales se incorporara un aro central en el rotor, ¿cómo se verían afectados los resultados?
- El espesor de las chapas y por tanto el número de ellas que conformarán un rotor ¿qué representaría?
- Y la curvatura de las chapas, ¿haría variar las respuestas de los motores? (y en qué forma?)
- Si se variaba la conductividad de las chapas ¿cuál sería el resultado?
- ¿Y si lo que se variaba era la permeabilidad de las chapas?
- Si se utilizan chapas magnéticas, o bien con grano orientado, o simplemente chapa de hierro ¿cómo se comportaría el motor?

- Si se utilizan chapas sin aislar, o bien aislada por una cara, o bien aisladas por las dos caras ¿cómo respondería el motor?

Las hipótesis planteadas eran bastante más extensas pero las más importantes podían resumirse en estas que hemos señalado, comenzándose a partir de aquí, con la construcción de los rotores.

El primer rotor de chapas que se construyó fue el modelo denominado *Z*. En este caso se optó por un tipo de chapa sin aislar de escasa calidad y reducido espesor (0.35mm, con 215 chapas), asimismo, no se mecanizó su superficie.

El propio modelo *Z*, sirvió para la construcción del segundo rotor, el modelo *D*. De hecho este rotor es simplemente el modelo *Z*, al que se le practicó un mecanizado superficial mínimo que prácticamente no modificó la distancia del entrehierro pero permitió que éste fuera constante.

Finalmente, y tomando como base el modelo *D*, se construyó el modelo *B*, que es simplemente el modelo *D*, al que se le ha practicado un segundo mecanizado.

Con estos tres modelos, aparte de ver la respuesta de un tipo de chapa con una curvatura y espesor determinado, permitió el estudio de los efectos de las aristas de las chapas antes y después de ser mecanizado, y comprobar como influía la variación del entrehierro.

El siguiente modelo construido fue el modelo *C*. En este caso el modelo presentaba un tipo de chapa con grano orientado sin aislar pero manteniendo el espesor de los modelos *Z*, *D*, y *B*, anteriores (0.35 mm), su superficie estaba mecanizada, y la unión de las chapas al eje se realizó por soldadura. Asimismo en sus extremos se incorporó unos aros de cobre sin aletas de ventilación.

Se pretendía responder algunas hipótesis con la construcción de este rotor: ¿Influiría utilizar chapa magnética de grano orientado? ¿Los anillos de cobre con poca sección y sin aletas, cambiarían significativamente los resultados térmicos obtenidos con anillos de aluminio y aletas para la ventilación? La unión del eje con el núcleo del rotor se realizó por soldadura autógena, sin realizar estriado en el eje, ¿variarían los resultados por este concepto?, etc.

Posteriormente, se construyeron los modelos *A*, *E* y *F*. Estos tres modelos ya contaban con chapa magnética de 0.5 mm de espesor sin aislar, aros laterales de aluminio con aletas de ventilación, y, aunque con estructura similar presentaban algunas modificaciones.

Concretamente entre los rotores *A* y *F*, la única diferencia reside en la inclusión de un tercer anillo central. En principio la rigidez mecánica resulta mejorada y su respuesta térmica prácticamente no varía, pero ¿cómo influye este aro central en sus respuestas eléctricas y magnéticas?

Por su parte, las diferencias más notorias entre los modelos anteriores (modelos *A*, y *F*) y el modelo *E*, reside en que este modelo es exactamente igual al modelo *A*, pero con un cambio importante, el radio de curvatura de sus chapas es distinta del resto de rotores (más abierta), y aparte, se mecanizó su superficie exterior pero no la lateral.

Ya era posible por tanto la comparación entre diversos modelos con espesores de la chapas o radios de curvaturas distintos. También podíamos comparar los resultados obtenidos con rotores mecanizados o sin mecanizar tanto lateralmente como superficialmente. Asimismo, con estos últimos modelos era posible comprobar el efecto de la incorporación de un anillo central,... etc.

Cabe indicar finalmente, que se construyeron tres prototipos más, los cuales se sacrificarían en las pruebas a las que se sometieron dejándolos inservibles por lo que no se les asignó ningún nombre en especial.

Rotor	N° chapas	Espesor chapas	Aislamiento o Chapas	Pérdidas Eléctricas	Acabado superficial chapas	Unión eje	Eje rotor	Anillos chapas	Entre-hierro	Equilibra do rotor
Tipo A	150	0.5 mm	Chapa magnética sin aislar	2.2 W/kg a 1T 4.6 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos Duraluminio 2030 $\phi=90$ mm Con aletas ventilaci.	0.30 mm	Sustracción de masa
Tipo B	215	0.35 mm	Chapa magnética sin aislar	2.8 W/kg a 1T 5.8 W/kg a 1.5T	Con dos mecanizados	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos cobre DN $\phi=90$ mm Con aletas de ventil.	0.37 mm	Añadiendo masa
Tipo C	200	0.35 mm	Chapa grano orientado sin aislar	0.45 W/kg a 1T 0.94 W/kg - 1.5T	Con un mecanizado	Soldadura autógena	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos cobre DN $\phi=90$ mm sin aletas de ventila.	0.30 mm	Sustracción de masa
Tipo D	215	0.35 mm	Chapa magnética sin aislar	2.8 W/kg a 1T 5.8 W/kg a 1.5T	Con un mecanizado	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos cobre DN $\phi=90$ mm Con aletas de ventil.	0.32 mm	Añadiendo masa
Tipo E	140	0.5 mm	Chapa magnética sin aislar	2.2 W/kg a 1T 4.6 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos Duraluminio 2030 $\phi=90$ mm Con aletas ventilaci.	0.30 mm	Sustracción de masa
Tipo F	150	0.5 mm	Chapa magnética sin aislar	2.2 W/kg a 1T 4.6 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Tres anillos Duraluminio 2030 $\phi=90$ mm Con aletas ventilaci.	0.30 mm	Sustracción de masa
Tipo Z	215	0.35 mm	Chapa magnética sin aislar	2.8 W/kg a 1T 5.8 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos cobre DN $\phi=90$ mm Con aletas de ventil.	0.28 mm	Añadiendo masa
Prototipo I	160	0.5 mm	Chapa magnética aislada por las dos caras	1.35 W/kg a 1T 2.8 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar y con un mecanizado	Estriado eje y producto adhesivo	Redondo acero F-114 $\phi=35$ mm	Dos anillos Duraluminio 2030 $\phi=90$ mm	0.30 mm	Sustracción de masa
Prototipo II	160	0.5 mm	Chapa magnética aislada por las dos caras	1.55 W/kg a 1T 3.1 W/kg a 1.5T	Sin mecanizar y con un mecanizado	Soldadura autógena	Redondo acero F-522 $\phi=35$ mm	Dos anillos Duraluminio 2030 $\phi=90$ mm	0.30 mm	Sustracción de masa

Tabla I.I Características principales de los rotores de chapas construidos.

Así se construyeron los prototipos I, y II, estos rotores que disponían de chapas magnética de 0.5 mm de espesor, aisladas por las dos caras y con materiales distintos, nunca llegaron a funcionar. Las diferencias entre ellos fueron varias: el radio de curvatura de las chapas, el mecanizado superficial, la forma de unión de las chapas el eje del rotor (en el modelo I, fue por estriado del eje, mientras que en el modelo II, la unión se realizó simplemente por soldadura), pero la diferencia esencial reside en que el eje del rotor del prototipo II es de redondo de acero F-522 con $\phi = 35$ mm, mucho más rígido que el del resto de ejes en los cuales se utilizó el redondo de acero F-114, con igual diámetro.

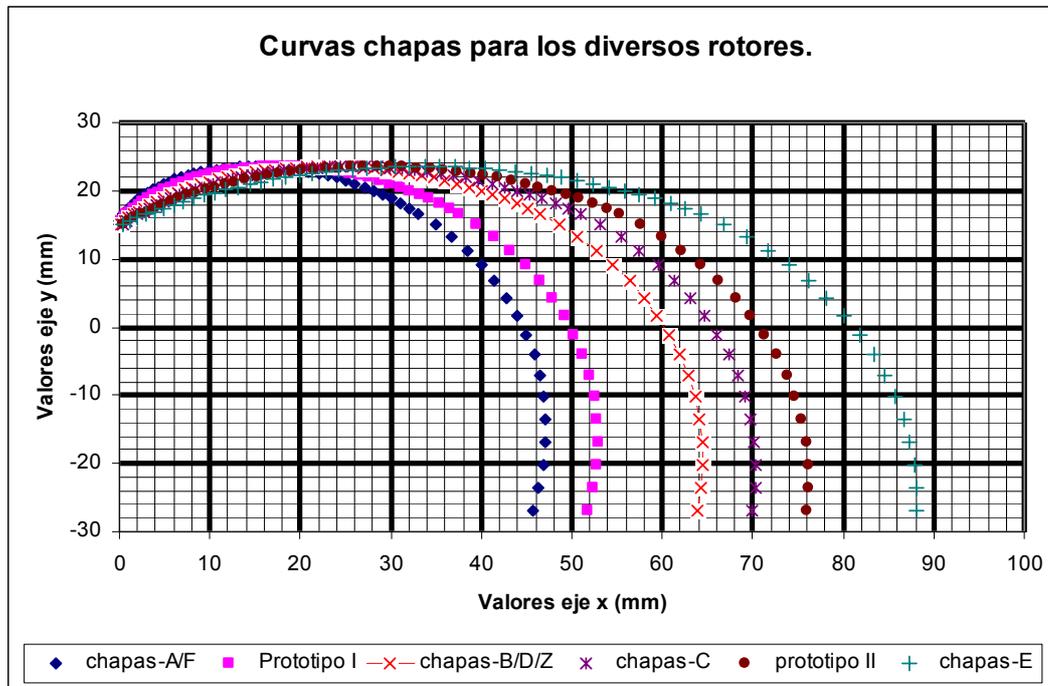


Figura 1.2. Curvaturas de las chapas en los diversos rotores de chapas construidos.

Con estos dos rotores se pretendía comprobar porqué cuando la chapa estaba aislada por sus dos caras los motores no llegaban a funcionar correctamente. Este fue el motivo de construir dos prototipos con características diferentes para comprobar si podía deberse a una causa puntual, o por el contrario el motivo principal era simplemente el aislamiento de las chapas. Incluso en el prototipo II, el eje se construyó de material mucho más resistente para descartar la posibilidad de una flexión por parte del eje, la cual quedó definitivamente descartada.

Finalmente, se construyó el prototipo III, con las mismas características que el modelo A. Con este modelo se realizaron varias pruebas para comprobar como se comportaban estos motores con la variación del entrehierro o con la colocación de los aros laterales, o simplemente corroborar el efecto de las aristas de las chapas antes de ser mecanizadas. Este fue uno de los modelos en los que los ensayos fueron destructivos comprobándose en primer lugar el efecto de las aristas y al mismo tiempo de los aros laterales (con diversas formas y tamaños), para procederse después a su mecanizado con sucesivas pasadas en el torno que permitió comprobar su respuesta al variar el entrehierro.

Puede corroborarse por tanto, que con la construcción de cada nuevo rotor no sólo se perseguía un fin único sino que se ha intentado obtener de cada modelo el máximo de resultados posibles. Esto significa que es difícil indicar que se obtuvo con cada modelo en concreto, así para comparar materiales debemos remitirnos al conjunto de los modelos B, C, A y prototipos I y II. Pero para ver la variación del entrehierro debemos remitirnos a los modelos B, y prototipo III, o para comprobar el efecto arista a los modelos A, D y C, ... etc.

Lo que se ha intentado en definitiva, es que con un reducido número de rotores puedan comprobarse el mayor número posible de efectos. Siempre que ha sido posible estas comprobaciones se han realizado

en más de un motor y con características distintas, pero para tener una serie fiable de datos habría sido necesaria la construcción de muchos más rotores. Esto se ha evitado con las simulaciones del programa FEMM, ya que gracias a los resultados experimentales, (no muchos ciertamente pero si los necesarios) hemos podido comprobar si el programa funcionaba de forma correcta con los rotores de chapas. Una vez tuvimos confianza en el programa (y esto se ha realizado para cada efecto), se pasaba a simular series más amplias que permitían extraer conclusiones, o gráficas con el rigor exigido en esta investigación.

1.3 METODOLOGÍA EMPLEADA

Este es un trabajo eminentemente práctico y general, en el cual la construcción de prototipos y los ensayos correspondientes han tenido un papel primordial, lo que no excluye que los análisis teóricos ni las simulaciones realizadas hayan sido numerosos y realizados con rigor. Pero no debe olvidarse que el objetivo principal de partida ha sido un análisis general del motor de chapas del cual desconocíamos toda respuesta, dejándose para trabajos futuros los análisis en profundidad aplicables a algunas de las secciones tratadas.

También cabe indicar que se ha realizado una división entre la parte de desarrollo (la tesis propiamente dicha), de los anexos, en los cuales se encuentran profusión de datos, tablas o gráficas, que son reflejo de los ensayos y simulaciones realizados.

De la tesis propiamente dicha podemos destacar en primer lugar que se realizó un estudio teórico de la viabilidad del proyecto, así se dedujeron ecuaciones empíricas de la inducción, intensidad y par, caminos para las intensidades y flujos magnéticos tanto en el interior de las chapas como en el resto del motor, forma del campo magnético creado por el estator, inducido por el rotor y total, profundidad alcanzada por las líneas de campo en las chapas, etc.

Una vez construidos los prototipos y realizados los ensayos y simulaciones pertinentes, se comprobó que algunas de las suposiciones teóricas planteadas a priori de la investigación se ajustaban a la realidad, pero que en cambio otras discrepaban de lo preestablecido. Esto no es de extrañar si tenemos presente que estábamos probando un motor completamente nuevo del cual no disponíamos de ninguna información previa ni tan siquiera para su comparación con otros modelos. Por lo que una vez realizadas estas pruebas y simulaciones se replanteó el estudio teórico inicial, aprovechando la experiencia adquirida con el transcurso de la realización del trabajo. Este es el motivo por el cual el capítulo del principio de funcionamiento del motor se incluye después de haber realizado las pruebas y simulaciones y no al principio del trabajo como podría parecer más lógico.

Teniendo presente esta salvedad, la estructura de la tesis pasa (aparte de este primer capítulo de introducción), por un capítulo de principios básicos teóricos donde se presentan de forma breve y concisa los aspectos más relevantes de los diversos motores de inducción actuales, los cuales nos servirán como referencia y punto de partida de nuestros objetivos, y a posteriori, para la comparación con nuestro nuevo motor. Aparte, se realiza una primera y breve introducción del principio de funcionamiento del motor de chapas.

El siguiente capítulo era obligado que tratará de la construcción de todos los prototipos (tanto de los estatores como de los rotores). En este capítulo no se entra en la comparación ni en el análisis de los resultados, sino simplemente, se explica una parte de la tesis que ha acaparado una buena parte del tiempo y presupuesto total, como es la adquisición del material, la creación de útiles para la construcción de los motores, y el proceso a seguir para la fabricación de los mismos.

Una vez teníamos los principios básicos teóricos y los motores (estatores y rotores) construidos, era el momento de realizar los ensayos prácticos (eléctricos, térmicos y mecánicos) y las simulaciones pertinentes (eléctricas y magnéticas). Por tanto creímos conveniente la inclusión de un capítulo que explicará todos estos ensayos y simulaciones, dándose una breve explicación teórica para entender su

origen, pero ampliando ésta cuando lo consideramos necesario por tener que adaptar programas o fórmulas para nuestro motor. Aparte de esta teoría, se exponen en este capítulo unos ejemplos de los datos obtenidos, fórmulas aplicadas y confección de las tablas o gráficas para cada tipo de ensayo o simulación realizada.

Los capítulos V, VI, VII y VIII, forman parte de un segundo bloque en el cual se estudiaron los motores desde diversos puntos de vista. Concretamente, en el capítulo quinto se realizó un análisis del funcionamiento del motor de chapas, del cual se deducen las ecuaciones que rigen su comportamiento, así como otros aspectos como el recorrido que la intensidad realiza por el interior de las chapas, donde ésta cambia de sentido, o como se genera la forma real del campo magnético total en el rotor. Otros aspectos también fueron considerados en este capítulo como la influencia de los materiales, el mantenimiento de la corriente absorbida al variar la carga, el estudio de la fuerza electromotriz en una chapa, el funcionamiento térmico y mecánico de los motores, etc.

El capítulo VI, se basa fundamentalmente en el análisis constructivo del motor de chapas visto desde diversas vertientes. Aquí se indican los materiales, parámetros geométricos y eléctricos característicos tanto del rotor como del estator, bobinados, optimización de materiales, etc. El capítulo finaliza con el cálculo del factor de calidad para algunos de los modelos analizados. Es por tanto un capítulo cuya misión específica pasa por concretar todo lo referente a la construcción de los modelos, pero no en cuanto al proceso, sino en referido a materiales, geometría y optimización de materiales.

En el capítulo VII, se realiza un estudio electromagnético del motor de chapas, que nos permite obtener, inducciones, tensiones inducidas y densidades de corriente en cualquier parte del motor a partir de unas ecuaciones empíricas deducidas e implementadas mediante en el programa Maple. Con este capítulo se pretende, sin tener que ensayar los motores, obtener series de valores con sólo introducir unos datos teóricos previos, comprobándose la respuesta del motor en estos regímenes. La inclusión de este capítulo hacia el final de la tesis es debido a que para validarlo era necesario obtener previamente valores experimentales y de simulación.

Un capítulo dedicado al control directo del par (capítulo VIII) aplicado a nuestros motores de chapas y a los restantes en general creímos que resultaría interesante. No se pretendió realizar un estudio en profundidad, sino más bien, comprobar la respuesta de diversas magnitudes eléctricas delante de unas consignas de velocidad de entrada determinadas. Se anexa en este capítulo una breve reseña teórica del principio de funcionamiento del DTC aplicado a los motores de chapas.

Finalmente, se completa el primer volumen con dos capítulos que podríamos englobar en un bloque de análisis y conclusiones del trabajo realizado. Así el capítulo IX, está dedicado al análisis de resultados tanto entre motores de chapas, como entre los mejores motores de chapas y sus homólogos convencionales (jaula, macizo, etc.). Este es un capítulo muy extenso, debido al gran volumen de datos manejado y en él se realiza un estudio no sólo de los datos obtenidos experimentalmente, sino que con la ayuda de los programas de simulación, se comprueba el funcionamiento del motor de chapas cuando cambiamos sus formas constructivas, los materiales, las cargas, o los regímenes de funcionamiento. Este capítulo consideramos que es uno de los más importantes ya que intenta dar respuesta a bastantes de las hipótesis que nos planteamos al inicio de esta investigación. Estos análisis están apoyados con gran cantidad de material gráfico y fórmulas.

El último capítulo (X), dedicado a las conclusiones, es un capítulo mucho más concreto, ya que a diferencia del anterior, aquí no se analiza al motor, ni se demuestran ni explican las ecuaciones deducidas, ni se pretende dar respuesta a las hipótesis, sino que simplemente se extraen las conclusiones a las que se ha llegado al final de la tesis, sean buenas o malas, indicándo su procedencia (capítulo en las que se han obtenido). El capítulo termina con un resumen de las aportaciones conseguidas con la realización de este trabajo y con un apartado dedicado a los trabajos futuros a los que se dirigirán las investigaciones a partir de ahora.

Este trabajo se completa con unos anexos que debido a la gran cantidad de pruebas efectuadas, tanto experimentales como mediante simulación, resultaba imposible incluirlas en la memoria técnica, por lo que se optó por adjuntar unos anexos que recogieran la mayor parte de los datos obtenidos a lo largo de la realización de esta investigación.

Otra solución pasaba por la inclusión en este trabajo de sólo los datos más significativos, los que habían permitido obtener conclusiones importantes, o simplemente los que a nuestro juicio eran más ilustrativos o relevantes. Así de los siete rotores de chapas, mas los tres prototipos, quizás solamente nos habríamos quedado con dos o tres modelos, dejando el resto en el olvido.

No sé si ha resultado acertada nuestra decisión, pero ya que habíamos construidos los prototipos, realizadas las pruebas y comparados los resultados, consideramos que dejar muchos valores y conclusiones en el olvido por razones de espacio nos pareció absurdo. Así se decidió presentar todos los resultados fueran buenos o discretos. Esta decisión además estaba sustentada por otras razones ya que al analizar diferentes aptitudes de los motores (eléctricas, mecánicas, térmicas, o magnéticas) algunos modelos considerados discretos, ofrecían buenas aptitudes en algunos de estos análisis y de los cuales se tomo nota para otras posibles aplicaciones.

Lo que si se ha realizado es una condensación de datos, ya que todas las pruebas experimentales, por ejemplo, se realizaron al menos en dos ocasiones, y en los casos donde no coincidían las lecturas fue necesario una tercera prueba. Disponer de todas y cada una de estas pruebas ya no resulta útil, por lo que las tablas y gráficas que se exponen en estos anexos son las medias de estas pruebas, anulándose las que divergían o no estaban en concordancia con el resto.

Finalmente, y como información general, mediante llaves {i} se encontrara el origen de la información (artículos en revistas o congresos, direcciones web, libros, u otras fuentes). No se darán nombres de autores, ni los títulos o encabezados, simplemente entre llaves figurara un número, encontrándose toda la información de esta referencia en la bibliografía, la cual también ha estado clasificada numéricamente.