

3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ROTORES

La construcción de los rotores ha supuesto un periodo dilatado de tiempo, ya que exceptuando el rotor de jaula, en todos los demás casos ha sido necesario construirlos de forma artesanal. Así, la búsqueda y compra de material, la confección de los útiles para el conformado de las chapas, la construcción de los anillos, la unión de las chapas, su sujeción al eje del rotor, la colocación de los cojinetes, el calibrado de los rotores etc., han representado una parte importante del trabajo de la tesis.

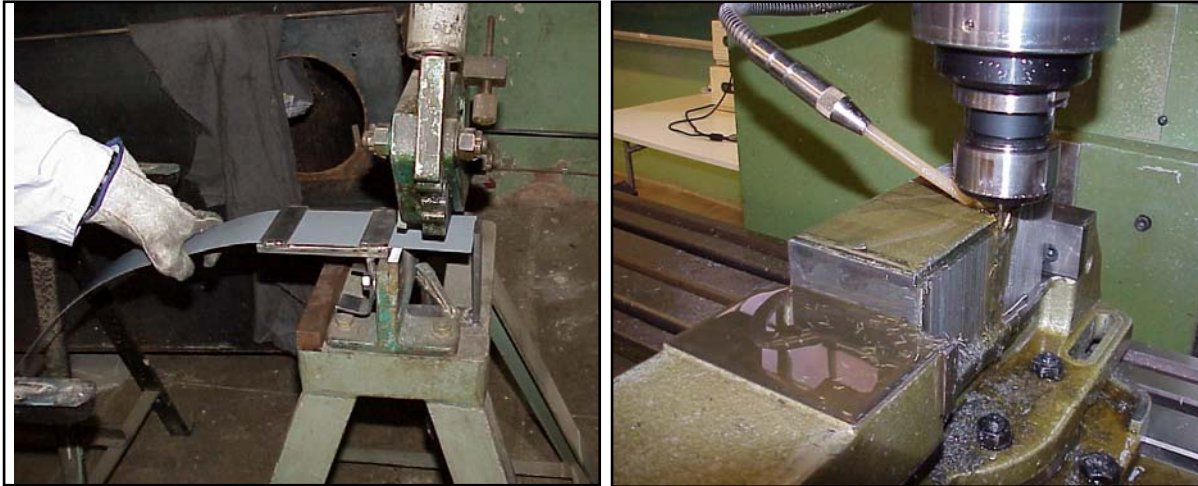


Figura 3.12. Rotor chapas. Corte de la chapa con cizalla y realización ranura aros mediante la fresa.

Los primeros rotores se iban construyendo a medida que se probaban los modelos precedentes, posteriormente las pruebas se distanciaron y algunos rotores se probaron de forma conjunta por necesidades de las maquinas y de los técnicos mecánicos necesarios para su construcción.

Como ya se ha comentado, una de nuestras primeras incógnitas era: ¿podrían circular las corrientes como era debido si las chapas se encontraban aisladas por las dos caras? La respuesta fue que no era posible, ya que ninguno de los dos prototipos construidos con chapa magnética aislada por sus dos caras giró de forma correcta cuando se le aplicó la tensión nominal. El campo magnético obligaba a curvarse las chapas del rotor lo suficiente para rozar la parte interior del estator. Se comprobó que este efecto era asimismo más notorio con motores a 1000 rpm que con motores a 3000 rpm.



Figura 3.13. Rotor de chapas. Doblado y agrupación de las chapas en el molde del rotor.

Desechada la chapa magnética aislada^{M-6}, probamos con chapas de hierro normal, chapas magnética sin aislar y chapa magnética con grano orientado. Con estos nuevos materiales los rotores empezaron a girar de forma normal.

Pero a lo largo de la investigación era necesario hallar respuesta a muchas otras hipótesis, ya que nuestro propósito pasaba por construir un motor que aunara las ventajas del rotor macizo (un alto par de arranque con intensidades moderadas y, aparte, que estas intensidades fueran prácticamente independientes del deslizamiento). Asimismo, los valores del par y rendimiento debían de ser similares a los motores equipados con rotor de jaula de ardilla. El proceso de construcción sería largo y no siempre con resultados satisfactorios ya que hasta un total de cuatro rotores tuvieron que ser desestimados al no llegar a funcionar, o bien porque sus resultados no resultaron satisfactorios.

Recordar finalmente, que estos rotores no sólo han sido construidos para obtener resultados satisfactorios eléctrica y magnéticamente, sino que en ocasiones se sacrificaron prestaciones eléctricas, a favor de un equilibrio con las correspondientes respuestas mecánicas y térmicas.

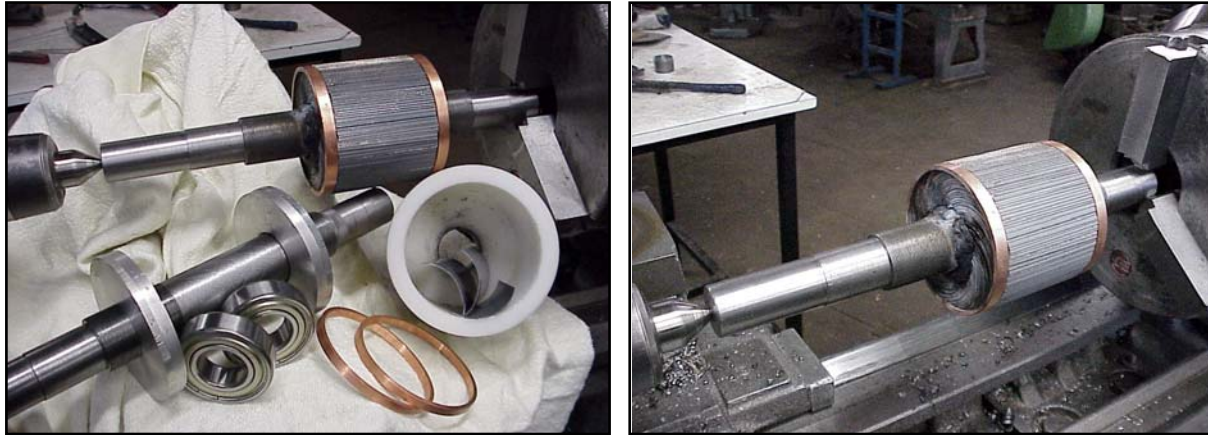


Figura 3.14. Rotor chapas. Elementos constructivos y rotor mecanizado prácticamente acabado

3.3.1 Características mecánicas principales

Medidas, masas, inercias y pérdidas mecánicas de los rotores construidos se resumen en la siguiente tabla. En el capítulo IX dedicado a resultados estos valores mecánicos serán analizados.

Tipo de rotor	Medidas (mm) (diámetro/longitud)	Masa (gr)	Inercia (kg·m ²)	Pérdidas mecánicas 1000rpm (W)	Pérdidas mecánicas 1500rpm tipo A (W)	Pérdidas mecánicas 1500rpm (W)	Pérdidas mecánicas 3000rpm (W)
Jaula de ardilla	79.4/73	3700	2.829·10 ⁻³	10	15	15	32
Rotor macizo	79.4/73	3870	3.066·10 ⁻³	18	22	22	40
Macizo con aros	79.2/73	3820	3.343·10 ⁻³	24	32	32	60
Rotor hueco	79.3/73	3830	0.419·10 ⁻³	115	175	175	460
Rotor chapas-A	79.4/73	4080	2.714·10 ⁻³	23	55	55	112
Rotor chapas-B	79.2/73	3220	2.737·10 ⁻³	16	35	35	68
Rotor chapas-C	79.2/73	3460	2.269·10 ⁻³	22	28	28	85
Rotor chapas-D	79.3/73	3350	2.834·10 ⁻³	17	36	36	70
Rotor chapas-E	79.4/73	3480	3.041·10 ⁻³	28	36	36	105
Rotor chapas-F	79.3/73	3860	2.687·10 ⁻³	28	46	46	80
Rotor chapas-Z	79.4/73	3440	2.918·10 ⁻³	18	38	38	72
Rotor Prototipo I	79.4/73	4000	2.703·10 ⁻³	25	56	56	115
Rotor prototipo II	79.4/73	4100	2.708·10 ⁻³	26	57	56	117

Tabla III.VI. Principales características mecánicas de algunos de los rotores ensayados.

3.3.2 tipos de rotores

En los próximos apartados se realiza una descripción de los rotores utilizados en los ensayos. De cada modelo se detallan sus características principales tanto de los materiales como del proceso constructivo, su plano en planta y algunas fotos tanto de los modelos acabados como en periodo de construcción.

3.3.2.1 Rotor de jaula de ardilla

Este es un rotor de jaula de ardilla simple convencional, formado por chapas magnéticas aisladas colocadas perpendicularmente al eje del rotor. Los materiales que lo forman así como el proceso constructivo se detallan a continuación.

Materiales^{M-8,M-11}: en cuanto a materiales, el eje se construyó utilizando redondo de acero F-114 con barra calibrada de $\varnothing = 35$ mm; el núcleo con 150 chapas magnéticas de 0.5 mm de espesor aisladas, con unas pérdidas eléctricas de 2 W/kg a 1 T y de 4.25 W/kg para 1.5 T; los aros son de duraluminio 2030 de $\varnothing = 90$ mm; las barras de la jaula están realizadas por inyección directa de aluminio; los dos cojinetes de los extremos del eje son del tipo $\varnothing = 52 \times 15$ -6205Z, y la chaveta es de acero de 8x45 mm.

Construcción^{L-8}: en primer lugar se mecanizo (torneo) el eje de acero en desbaste. Seguidamente se construyeron los dos aros de duraluminio mediante torneado y fresado en acabado, dejando un diámetro exterior un poco mayor con el fin que una vez los aros estuvieran colocados pudieran ser mecanizados con todo el conjunto para obtener el acabado final. Después se paso a la construcción del núcleo, uniendo las chapas (a las cuales previamente se les había practicado las ranuras para contener las barras de inyección de aluminio de la jaula de ardilla) por medio de los dos aros y un utillaje. A estas chapas se les aplico un punto de soldadura para fijarlas una vez fuera del utillaje. A continuación se situaron las chapas alrededor del eje soldándose todo el diámetro exterior con el fin sujetar las chapas al núcleo. Finalmente todo el conjunto (núcleo soldado, aros y eje) se mecanizo en el torno procediéndose al acabado tanto del eje como del núcleo y de los aros en función del diámetro exterior para el cual fue diseñado el rotor. Una vez terminado el proceso solo quedaba realizar el chavetero en el extremo del eje mediante el concurso de la fresa con unas dimensiones de 8x45 mm. Posteriormente se colocaron los cojinetes^{L-7} en los extremos del eje, en el cual se habían practicado previamente unos rebajes para fijar los mismos. El equilibrado del rotor se realizo añadiendo masa (arandelas) en el punto de unión de los aros en cortocircuito con la barras de la jaula.

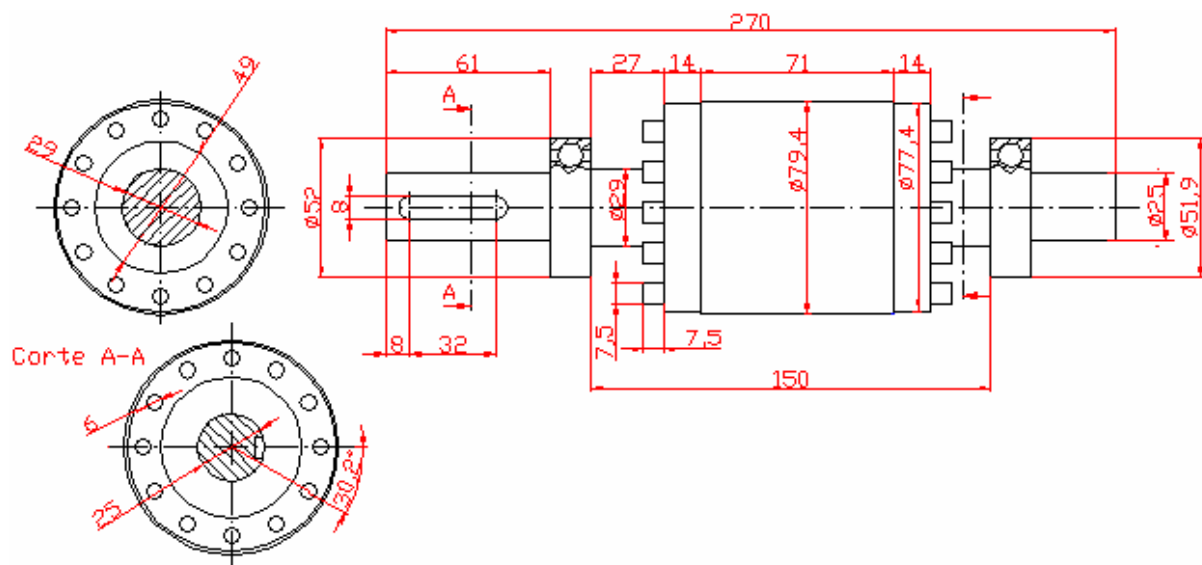


Figura 3.15. Plano del rotor de jaula de ardilla. Las cotas están dadas en mm.

Las siguientes imágenes muestran algunos aspectos constructivos de este rotor con jaula simple convencional.

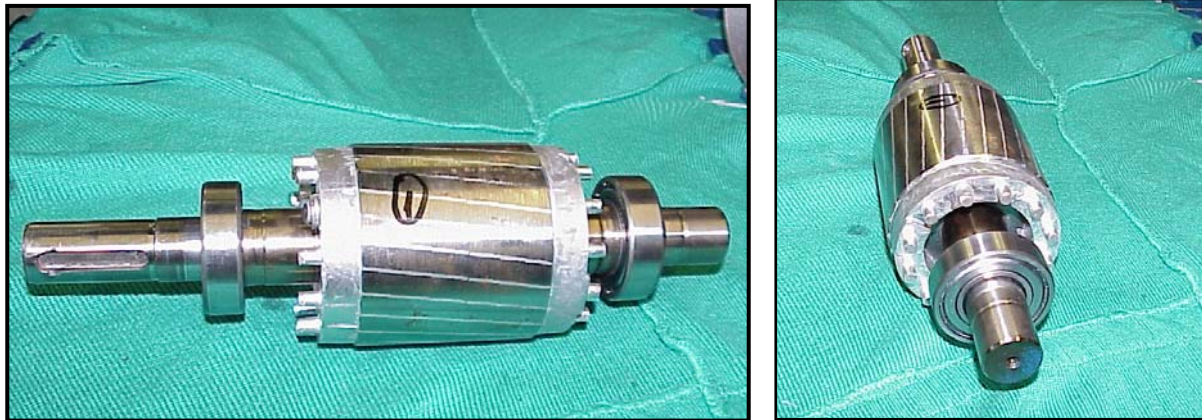


Figura 3.16. Rotor jaula. Vista frontal y lateral. Obsérvese las arandelas colocadas en los aros para el calibrado del rotor.

3.3.2.2 Rotor macizo sin aros

Este rotor ha sido de fácil construcción ya que su núcleo es simplemente un cilindro de acero unido mediante soldadura al eje propio del rotor. Pero veamos con más detalle los materiales que lo forman así como su proceso constructivo.

Materiales^{M-11,M-12}: el eje se construyó utilizando redondo de acero F-114 con barra calibrada de diámetro $\phi = 35$ mm; el núcleo también se fabrica con redondo de acero F-114 con barra calibrada pero ahora con un diámetro de $\phi = 90$ mm; los dos cojinetes de los extremos del eje son de un diámetro de $\phi = 52 \times 15-6205-Z$, y finalmente la chaveta es de acero de 8×45 mm.

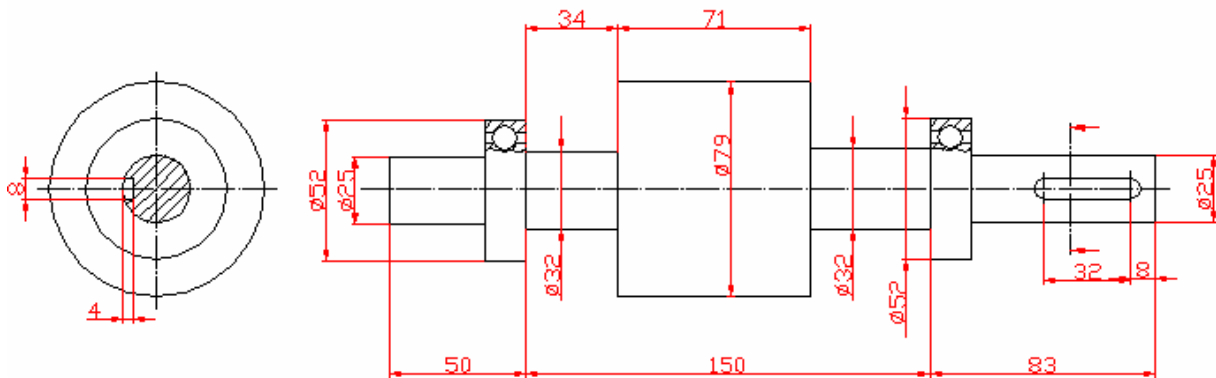


Figura 3.17. Plano del rotor macizo sin aros. Las cotas están dadas en mm.

Construcción^{L-8}: la construcción de este rotor es muy parecida el rotor macizo con aros, así en primer lugar se mecanizo (torneo) el eje en desbaste. Seguidamente se confecciono el núcleo formado con redondo de acero F-114, para ello primeramente, se taladro y mandriló el interior del redondo con un diámetro igual al del eje del rotor para posteriormente poder ser ajustado y unido al mismo mediante la aplicación de unos puntos de soldadura en los extremos. A continuación se situó el conjunto (eje más núcleo soldado) en el torno, mecanizándose hasta dejarlo acabado. Posteriormente se colocaron los cojinetes^{L-7} en los extremos del eje, en el cual se habían practicado previamente unos rebajes para fijar los mismos. Una vez terminado el proceso sólo quedaba realizar el chavetero en el extremo del eje mediante el concurso de la fresa con unas dimensiones de 8×45 mm. No fue necesario en esta ocasión equilibrar el rotor.

Las siguientes imágenes muestran algunos de los aspectos constructivos del rotor macizo sin aros, así como su forma final.

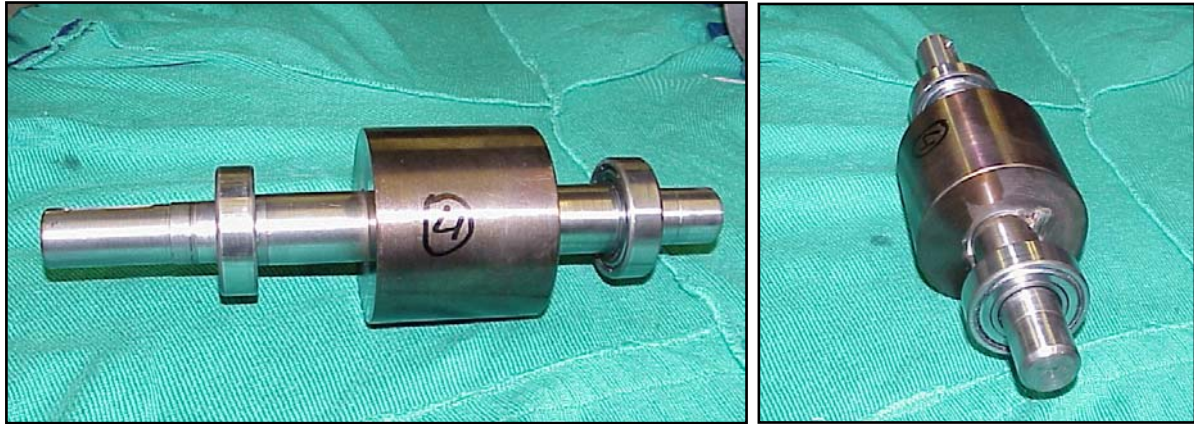


Figura 3.18. Rotor macizo sin aros. Vista frontal y lateral.

3.3.2.3 Rotor macizo con aros

Para mejorar la respuesta del motor con rotor macizo se ha construido este rotor con aros cuya fabricación es idéntica a la del rotor macizo precedente, siendo la única diferencia los aros situados en los extremos del núcleo de acero que forma el rotor. Pero veamos con más detalle los materiales que lo forman así como su proceso constructivo.

Materiales^{M-11,M-12}: el eje se construyó utilizando redondo de acero F-114 con barra calibrada de $\phi = 35$ mm; el núcleo también se fabricó con redondo de acero F-114 con barra calibrada pero ahora con un diámetro de $\phi = 90$ mm; los aros de los extremos se obtuvieron con redondo de cobre DN de $\phi = 90$ mm: finalmente, los dos cojinetes de los extremos del eje son de un diámetro de $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ y la chaveta es de acero de 8×45 mm.

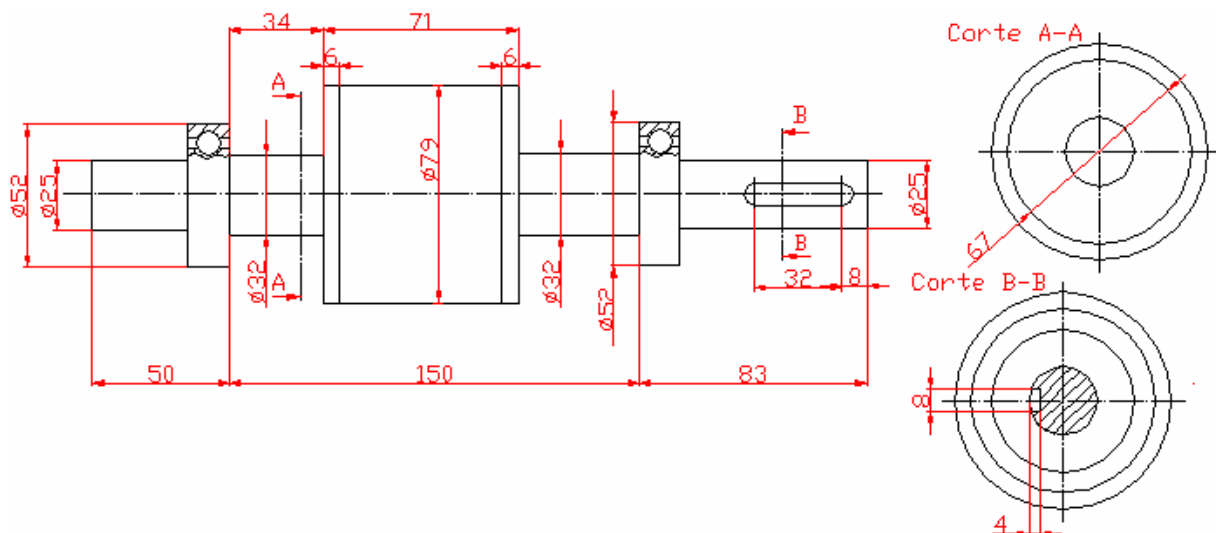


Figura 3.19. Plano del rotor macizo con aros. Las cotas están dadas en mm.

Construcción^{L-8}: la construcción de este rotor es idéntica a la expuesta para el rotor macizo sin aros excepto por la inclusión de estos anillos, los cuales se obtuvieron previamente mediante torneado y fresado en desbaste del redondo de cobre. Para su unión al núcleo del rotor, se mecanizó el mismo practicándose un rebaje en cada uno de sus extremos, uniéndose los aros de cobre mediante soldadura.

Un segundo y leve mecanizado sirvió para conseguir que estuvieran concéntricos con el núcleo y el eje. Posteriormente, también en esta ocasión, se colocaron los cojinetes^{L-7} en los extremos del eje, en el cual se habían practicado previamente unos rebajes para fijar los mismos.

Las siguientes imágenes muestran algunos de los aspectos constructivos del rotor macizo con aros, así como su forma final.

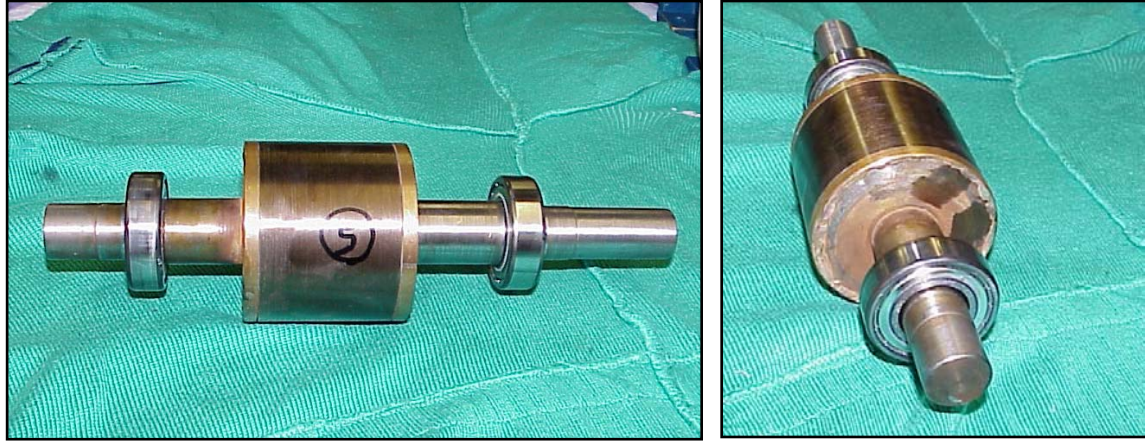


Figura 3.20. Rotor macizo sin aros. Vista frontal y lateral.

3.3.2.4 Rotor hueco

Este ha sido el rotor más difícil de construir, del cual se malograron dos prototipos hasta conseguir el modelo definitivo. La dificultad estriba en lo maleable que resulta el cobre y el escaso espesor que presentan las paredes de la parte móvil (el vaso). Basta un ligero golpe para provocar una pequeña deformación en el vaso, deformación, que no obstante es suficiente para producir el roce entre el vaso y la parte fija (eje más núcleo de chapas), inutilizando el modelo. Otro problema consistió en conseguir que durante el giro las dos partes fija y móvil, éstas no rozarán ya que existen dos entrehierros y el rotor es de dimensiones considerables, para solucionar este problema se utilizaron hasta un total de cuatro cojinetes, uno de gran tamaño, dispuestos como se indica en la figura 3.21.

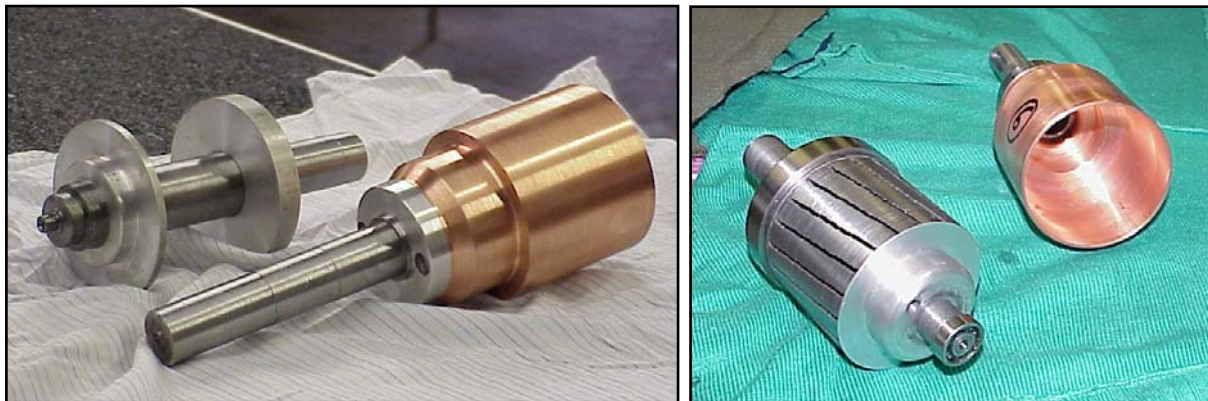


Figura 3.21. Rotor hueco. Detalles constructivos.

El proceso de construcción ha sido laborioso y diversos los materiales empleados. De forma resumida, a continuación se expone el método empleado y los materiales utilizados en el proceso de construcción. Pero antes para que resulte más comprensible este proceso se adjunta un plano con diversas vistas de este rotor hueco amagnético con las cotas dadas en mm.

DIBUJO DE CONJUNTO

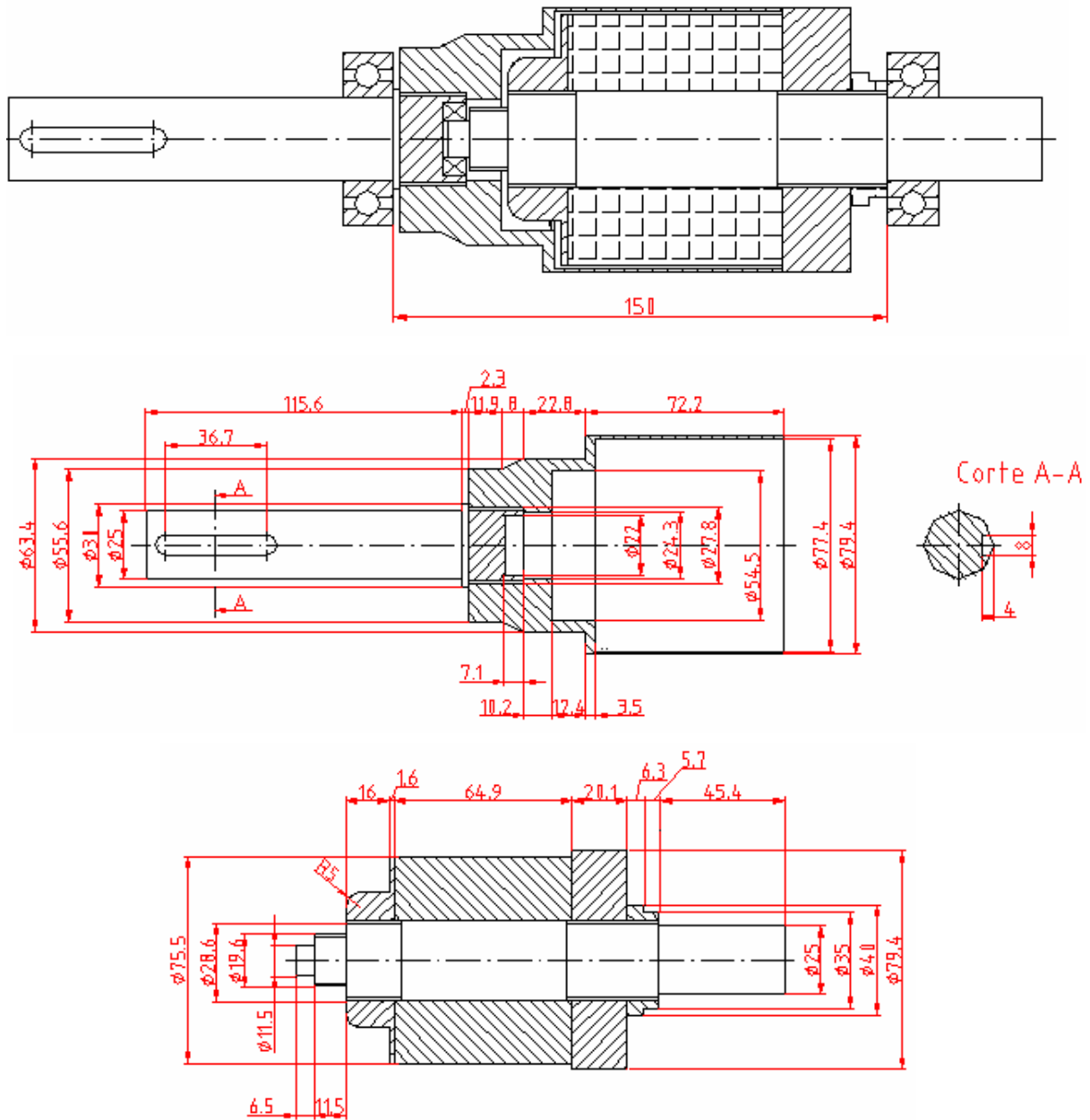


Figura 3.22. Planos del rotor hueco. Obsérvese la unión entre las partes móvil y fija.

Materiales^[M-8,M-11,M12]: el eje tanto de la parte fija como la móvil se construyó utilizando redondo de acero F-114 con barra calibrada de $\phi = 35$ mm; el núcleo con chapa magnética de 0.5 mm de espesor aislada con unas pérdidas eléctricas de 2 W/kg a 1 T y 4 W/kg con 2 T; el vaso es de redondo de cobre DN de $\phi = 90$ mm; y los acoplamientos del vaso con el eje, así como los soportes de las chapas de la parte fija y las uniones son de duraluminio 2030 de $\phi = 90$ mm; en cuanto a cojinetes existen cuatro en este motor: en el extremo exterior del eje móvil existe un cojinete de diámetro $\phi = 52 \times 15$ -6205-Z, en el extremo exterior del eje fijo no existe un cojinete sino un redondo de duraluminio fijo de diámetro $\phi = 52 \times 15$. Aparte existen dos cojinetes más: un pequeño cojinete de $\phi = 22 \times 7$ -608Z con rosca en el mismo extremo del eje de la parte fija que se acopla en el interior del vaso móvil y finalmente un

cojinete mayor ($\phi = 80 \times 18-7208Z$) sujeto en la parte fija y en el que descansa la parte móvil (vaso) cuando el motor esta en funcionamiento.

Construcción^{L-8}: para la construcción de este rotor se dividió el mismo en dos partes, la fija y la móvil. En cuanto a la parte móvil en primer lugar se mecanizo (torneo) el eje de acero en desbaste. Seguidamente se confecciono el vaso de cobre mediante taladrado y posterior mandrilado del redondo de cobre. Se procedió a continuación a la unión del vaso con el eje del rotor, el cual se realizo gracias a una pieza redonda de duraluminio de $\phi = 90$ mm con dos tornillos y un pasador de acero. En el interior del vaso existe un soporte de duraluminio donde encajan el eje de la parte fija y el eje de la parte móvil mediante el concurso de un cojinete de $\phi = 22 \times 7-608Z$ con rosca colocado en el extremo del eje de la parte fija y que se introduce en este soporte colocado en el interior del vaso de la parte móvil a la altura del eje móvil.



Figura 3.23. Rotor hueco. Vista frontal y lateral

Seguidamente se construyo la parte fija del rotor. En primer lugar se mecanizo el eje fijo con redondo de acero dejándose en desbaste. Seguidamente se realizo el núcleo, mediante la unión de las 120 chapas (cortadas en discos como las de los rotores de jaula y en las cuales previamente se les había practicado las ranuras para contener las barras de la jaula de ardilla) por medio de dos soportes redondos de duraluminio, uno de $\phi = 60$ mm que hace las veces de cojinete fijo, es decir sin giro, y por otro soporte del mismo material y dimensiones, encajado en el eje fijo por ambas partes que sujeta las chapas y sirve de apoyo al cojinete^{L-7} mayor de $\phi = 80 \times 18-7208-Z$. Este cojinete mayor esta torneado para ser acoplado y servir asimismo de soporte al vaso móvil cuando éste gira. Además existe un pequeño cojinete de $\phi = 22 \times 7-608Z$ con rosca en el mismo extremo interior del eje fijo, el cual, como ya se ha indicado, se acopla con el soporte situado en el interior del vaso y a la altura del eje móvil del rotor contribuyendo a dar rigidez al conjunto de los ejes fijo y móvil del motor. Este pequeño cojinete lleva incorporada una pieza roscada de duraluminio que será la encargada de prensar por un extremo las 120 chapas magnéticas de 0.5 mm de espesor que forman el núcleo de la parte fija.

Una vez terminado el proceso solo quedaba realizar el chavetero en el extremo del eje móvil mediante el concurso de la fresa con unas dimensiones de 8×45 mm. Todo el conjunto se equilibro mediante la adición de masa en la pieza de duraluminio que sirve de unión entre el vaso y el eje móvil.

3.3.2.5 Rotores de chapas

Estos son los rotores objeto de la investigación, por tanto de ellos se han construido numerosas variantes aunque en todas ellas predomina una base común, las chapas cortadas y conformadas en espiral. En el siguiente apartado se dan las pautas generales de construcción, así como los materiales constructivos. Posteriormente, para cada prototipo se indicarán sus peculiaridades específicas.

Materiales^{M-6,M-7,M-8,M-11-M-12}: los materiales empleados en la construcción del conjunto de los rotores de chapas en espiral son los siguientes: Para el eje de todos los rotores excepto para el eje del prototipo

II, se empleo redondo de acero F-114 con barra calibrada de $\phi=35$ mm. Para el eje del prototipo II, se utilizo un acero más rígido como lo es el redondo de acero F-522 (equivalente al U-13) de $\phi=35$ mm. Para los anillos en cortocircuito se utilizo redondo de duraluminio 2030 de $\phi=90$ mm y en algún modelo redondo de cobre DN de $\phi=90$ mm. Finalmente las chapas que forman el núcleo del rotor son diversas: chapa magnética aislada por las dos caras de 0.5 mm de espesor en fleje y con unas pérdidas eléctricas de 1,35 W/Kg a 1 T y 2.8 W/kg a 1.5 T; chapa magnética sin aislar de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.2 W/kg a 1 T y de 4.64 W/kg a 1.5 T; chapa magnética de grano orientado sin aislar de 0.35 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 0.45 W/kg a 1 T y de 0.94 W/kg a 1.5 T; chapa de hierro sin aislar de 0.35 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.8 W/kg a 1 T y de 5.8 W/kg a 1.5 T; y finalmente chapa de hierro sin aislar de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 4.4 W/kg a 1 T y de 6.5 W/kg a 1.5 T. Los cojinetes en todos los casos serán de un diámetro $\phi=52 \times 15-6205-Z$. Las chavetas cuentan con unas dimensiones de 8x45 mm y son de acero.

Chapas^{L-8}: se cortaron las chapas mediante una cizalla a la medida correspondiente, este tipo de corte no deja rebabas y aparte asegura que cada chapa estará magnéticamente separada de las restantes. Se realizaron posteriormente los encajes de los anillos mediante fresado, aunque las chapas con el fresado queden unidas magnéticamente en esta ocasión no era de suma importancia ya que al estar situado el corte en los encajes de los aros no provocara problemas ya que los aros precisamente servirán para cerrar el circuito electromagnético. A continuación se conformaron las chapas para obtener la forma definitiva mediante una prensa o, en nuestro caso, utilizando una máquina de taladrar de columna con el fin de hacer las veces de prensa, siendo el procedimiento utilizado el que sigue: se construyeron varios útiles cada uno con la forma exacta de las curvas a las que queríamos conformar las chapas. Seguidamente sujetábamos el útil escogido en el portabrocas de la máquina de taladrar y sujetamos asimismo mediante un utillaje adecuado las chapas en la mesa de la máquina (se fija el eje de la máquina con el fin de que ésta no girara). A continuación, mediante la maneta del eje portabrocas de la máquina de taladrar se procedió a realizar presión (con el útil elegido para cada forma de chapa en concreto) sobre la mesa donde estaban colocadas las chapas, aunque la presión ejercida con este sistema no era muy grande fue suficiente para conformar la chapas en la forma escogida.

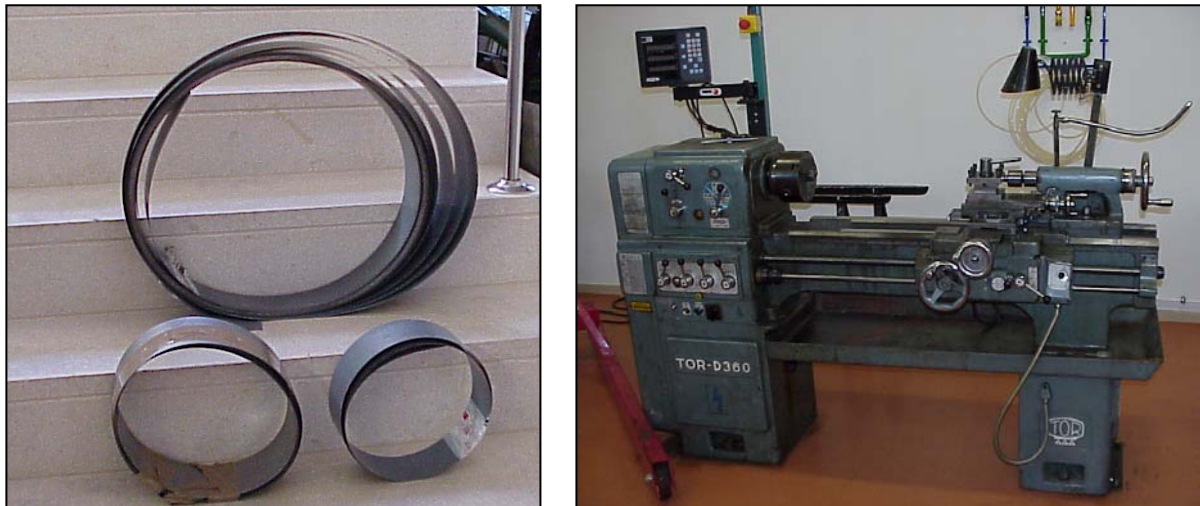


Figura 3.24. Detalle de algunas de las chapas utilizadas. Torno en el cual se mecanizaron los rotores.

Construcción^{L-7,L-8}: se procedió al desbaste del eje de acero mediante mecanizado. A continuación se construyeron los dos aros (de duraluminio o de cobre) mecanizando en primera instancia y fresando a posteriori dejándolos en desbaste tanto en su diámetro exterior como en su anchura. Los aros se construyeron mediante fresado de forma que sobresalen de ellos una aletas para la ventilación del motor cuando éste funciona. Posteriormente se preparó un utillaje en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas, previamente conformadas con su forma definitiva, con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro. A continuación se unieron las chapas al eje mediante dos

procedimientos: soldando sus extremos y rebajando la soldadura al final para conseguir un mejor acabado, o bien mediante un estriado que se práctico en el eje de algunos modelos uniéndose las chapas al eje mediante un material adhesivo conductor y resistente a las altas temperaturas. A continuación se colocaron los aros doblándose levemente las chapas y terminándose de acoplar entre ellas. A partir de aquí, se procedió al acabado del eje y de los aros, colocándose los cojinetes correspondientes en los extremos del eje, en el cual se habían practicado previamente unos rebajes para fijar los mismos. Finalmente se realizo el chavetero de acero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la adición o sustracción de masa según los modelos.

Equilibrado^{L-8j}: una vez terminados los rotores se procedió a su equilibrado, este equilibrado se realizó tanto añadiendo masa (mediante la adición de pasta o arandelas en los anillos), como por sustracción de la misma con la perforación de las chapas. El último método, sustracción de la masa, no es tan eficaz ya que afecta al conjunto de las chapas, pero es más duradero y se comprobó que su influencia en los resultados electromagnéticos era prácticamente nula.

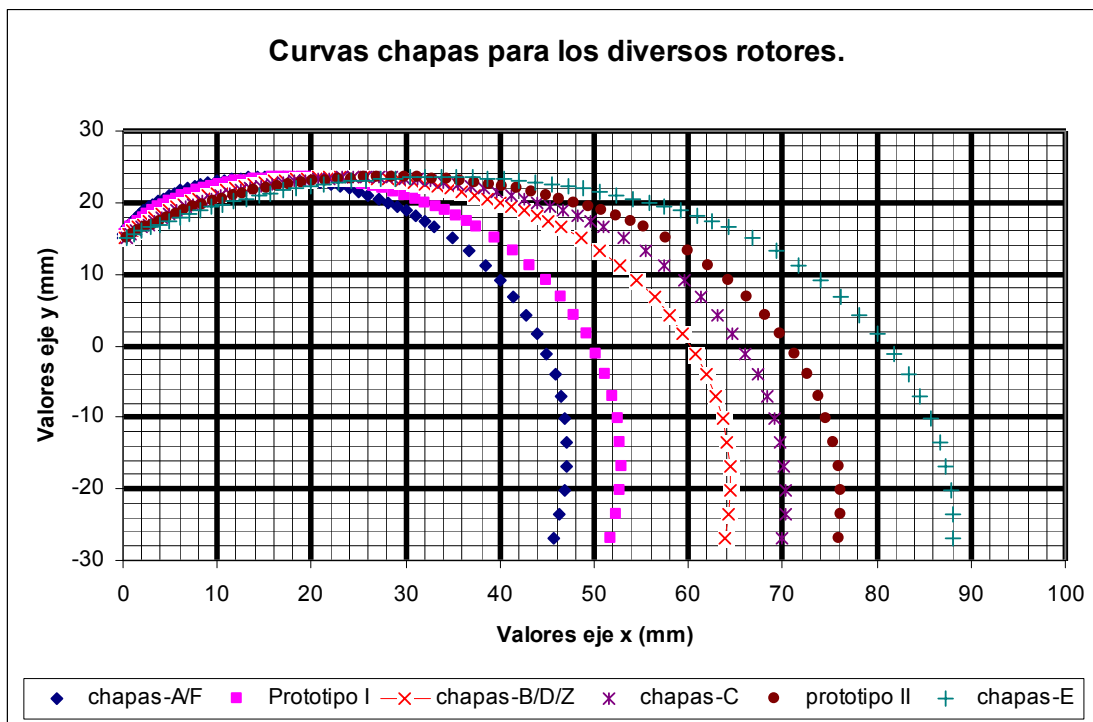


Figura 3.25. Perfiles de las curvas utilizadas en la construcción de los rotores de chapas.

Finalmente y antes de pasar a la descripción específica de los modelos construidos con este sistema, es importante realizar una aclaración. La identificación dada a los diversos rotores de chapas construidos (A, B, C...etc.) podría llevar a confusión ya que obedece a aspectos formales y no a la secuencia con que fueron construidos los rotores. En este primer capítulo los rotores simplemente son presentados con sus peculiaridades constructivas ordenándose por orden alfabético. Será en el capítulo IX (Análisis de resultados), donde se analizaran los motivos (eléctricos, magnéticos, térmicos y mecánicos) que llevaron a la construcción de cada nuevo modelo, siendo entonces sí imprescindible una secuenciación por orden de aparición de los modelos.

3.3.2.5.1 Rotor de chapas tipo A

Este no fue el primer prototipo con chapas en espiral que se construyo, sino al contrario, ha sido uno de los últimos y con el que en conjunto se han obtenido mejores resultados. Las diferencias con otros rotores estriban básicamente en el material utilizado, la curvatura de las chapas y el acabado de las mismas.

Para este rotor el material^{M-6} escogido ha sido chapa magnética sin aislar de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.2 W/kg a 1 T y de 4.64 W/kg a 1.5 T, la cual se conformó con útiles artesanales cortando primeramente el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarían las chapas definitivas. Después fueron dobladas una a una con la forma elíptica dada por la ecuación diferencial [3.1] y que aquí reproducimos.

$$y = -7 \cdot 10^{-8} x^6 + 8 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0004 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1677 x^2 + 1.7178 x + 15.609 \quad [3.1]$$

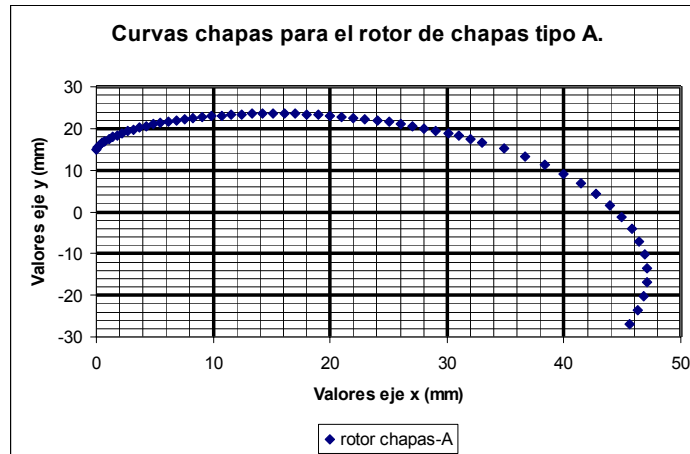


Figura 3.26. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción de este modelo tipo A.

Otra peculiaridad con la que se ha optado en la construcción^{L-8} de este rotor es el nivel de acabado. En esta ocasión no se ha mecanizado el rotor en su superficie exterior, así como tampoco en los laterales dejando las chapas en vista con su curvatura característica. Un último rasgo distintivo lo constituye la forma en que se han unido las chapas al eje, realizándose esta unión mediante el estriado previo del eje y la posterior cuidadosa colocación de las chapas y con el concurso de un producto adhesivo conductor y resistente tanto a las altas temperaturas que es previsible que se alcancen cuando funcione el motor a pleno régimen, como a los esfuerzos a los que estará sometido. El rotor cuenta con anillos de duraluminio en sus extremos.

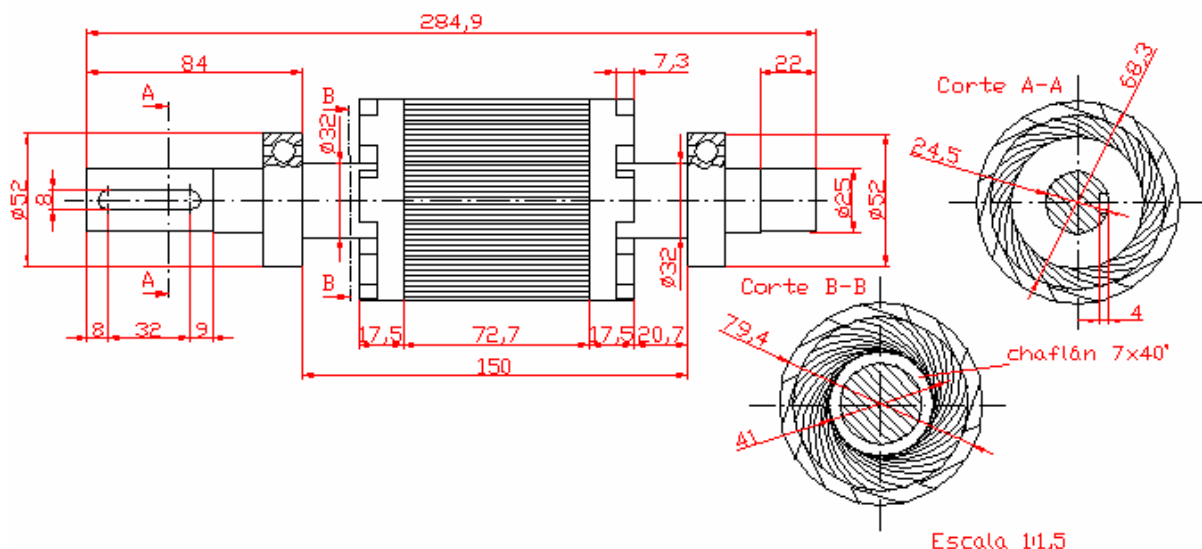


Figura 3.27. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo A. Las cotas están dadas en mm.

Concretamente el eje ha sido construido^{M-11,M-12} mediante el mecanizado en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\phi=35$ mm. El núcleo del rotor, como ya se ha comentado, ha sido construido mediante la unión de 150 chapas magnéticas de 0.5 mm de espesor sin aislar de 2.2 W/kg a

1 T, cortadas con cizalla (los encajes para los aros se realizaron con un fresado posterior del conjunto de las chapas) y conformadas con una prensa hasta obtener su forma definitiva. Posteriormente, se preparó un utillaje en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro. A continuación se unieron las chapas al eje mediante el estriado del mismo y posterior aplicación de un producto adhesivo resistente y conductor. Los aros de redondo de duraluminio 2030 de $\phi=90$ mm se obtuvieron mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste de forma que sobresalen de ellos unas aletas para la ventilación del motor, uniéndose a las chapas mediante unos puntos de soldadura autógena con lo que aumenta la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A partir de aquí se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y de los aros recordando que las chapas nunca fueron mecanizadas ni superficialmente ni lateralmente como queda reflejado en la figura 3.28.

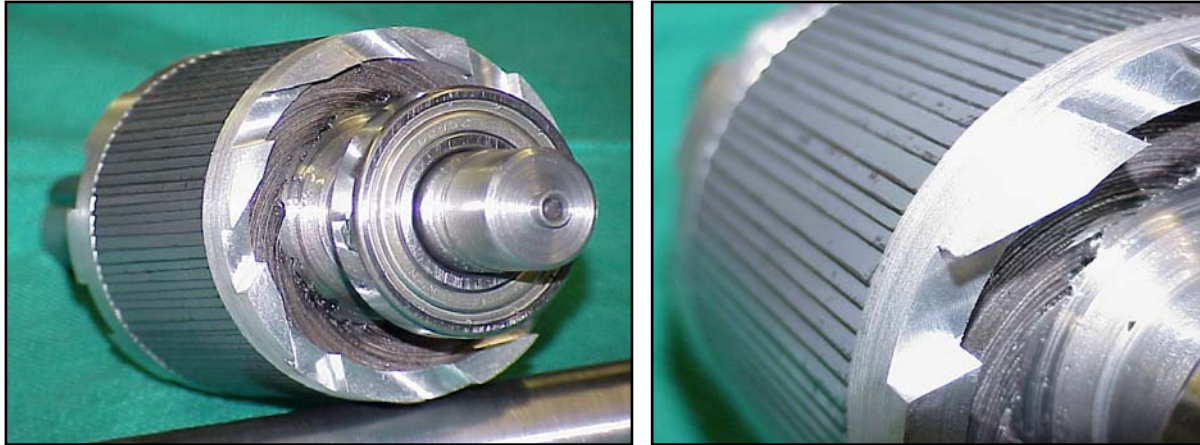


Figura 3.28. Detalles constructivos del rotor de chapas tipo A. Obsérvese la curvatura de las chapas.

Se dispusieron en los extremos del eje dos cojinetes^{L-7} de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. Finalmente se realizó el chavetero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la sustracción de masa, ya que la adición de masa (como se realizará en otros modelos) ofrece la ventaja de no interferir en la chapas pero disminuye la rigidez mecánica del conjunto y presenta una peor reapuesta a las altas temperaturas.

Los motores equipados con este rotor han sido los que han proporcionado unos mejores resultados en conjunto, ya que si bien otros modelos como el rotor de chapas tipo D, le sigue de cerca en prestaciones eléctricas, el rotor tipo A, resulta más equilibrado cuando consideramos otros aspectos de funcionamiento como el térmico y mecánico como se comprobó en el análisis de resultados que se realizará en el capítulo IX de esta obra.

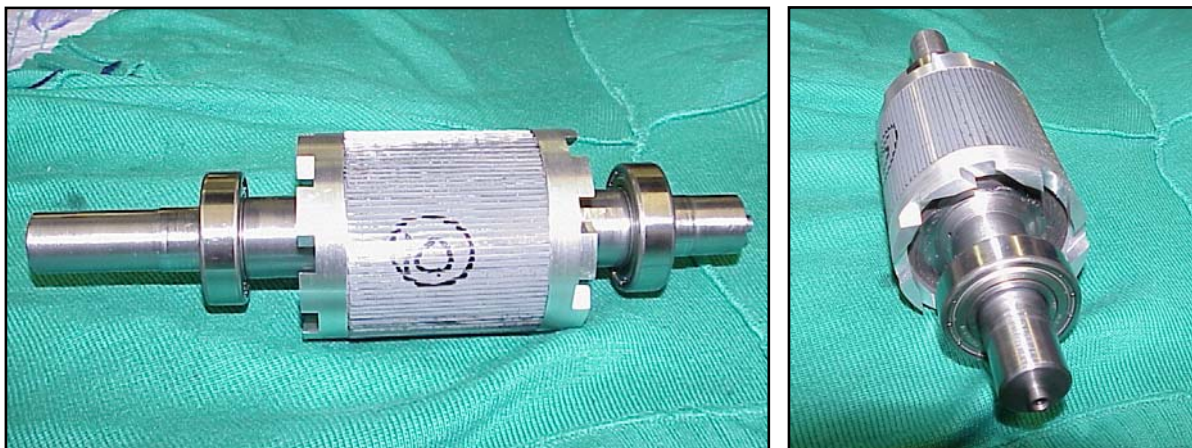


Figura 3.29. Rotor chapas tipo A. Vista frontal y lateral.

3.3.2.5.2 Rotor de chapas tipo B

Aunque en líneas generales el proceso constructivo de este rotor sigue las pautas comunes expuestas para el rotor de chapas tipo A, existen notables diferencias entre ellos, en particular en lo referente a las chapas. Así: material, conformado, unión chapas-eje, acabado final, aros, etc. presentan rasgos distintivos con el modelo analizado en el apartado anterior.

Es importante notar, para comprender el proceso constructivo, que este rotor no es único, sino el último producto de tres variantes (rotor de chapas tipo Z, rotor de chapas tipo D y rotor de chapas tipo B). Aunque cronológicamente el rotor originario, es decir el más antiguo, es el rotor de chapas tipo Z, seguido por el modelo de chapas tipo D, por razones de forma y denominación, se presenta en primer lugar este modelo de chapas tipo B.

$$y = -3 \cdot 10^{-8} x^6 + 5 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0003 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1685 x^2 + 1.6257 x + 14.294 \quad [3.12]$$

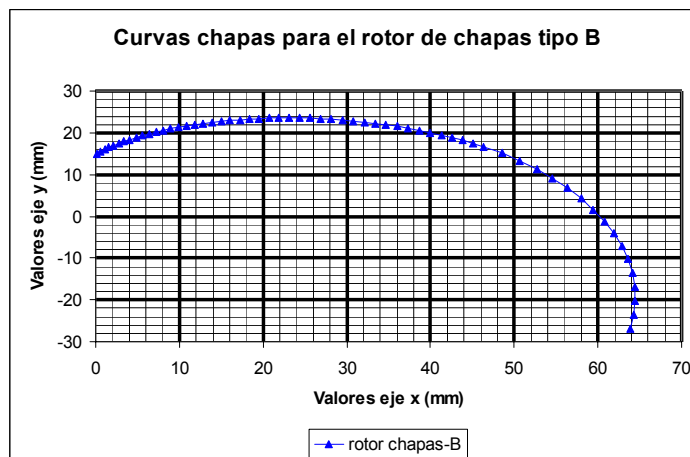


Figura 3.30. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción del modelo de chapas tipo B.

La diferencia entre los tres modelos radica en que en el rotor de chapas tipo Z (el más antiguo) las chapas estaban sin mecanizar (con aristas) quedando un entrehierro variable de 0.28 mm y su núcleo estaba saturado con una inducción magnética máxima en el entrehierro de 0.9 T. Posteriormente el rotor se mecanizó (torneo) levemente (modelo de chapas tipo D) hasta que su superficie exterior quedó sin las aristas de las chapas, con este proceso el entrehierro medio prácticamente no varió, situándose en 0.32 mm, pero su núcleo estaba ya semisaturado (0.76 T), mejorando sus prestaciones electromagnéticas. Finalmente el modelo de chapas tipo B, se originó al sufrir el modelo D, un golpe accidental que deformó su cilindría, y obligó a un segundo mecanizado que elevó la distancia del entrehierro a 0.37 mm, con un núcleo poco saturado (0.6 T), y con una peor respuesta eléctrica. Su inclusión en esta investigación se debe más a la comprobación de la variación de los valores obtenidos al variar el entrehierro que no a la búsqueda de un prototipo con mejores prestaciones. Son por tanto tres modelos idénticos diferenciándose solamente por la ligera modificación que ha sufrido el entrehierro debido a las sucesivas mecanizaciones practicadas.

El proceso constructivo de las chapas en este modelo ha sido con diferencia el más complejo y laborioso, pero vayamos por partes. En primer lugar la chapa empleada^[M-8] (concretamente 215 chapas) estaba formada por chapa de hierro sin aislar de 0.35 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.8 W/kg a 1 T y de 5.8 W/kg a 1.5 T, conformadas con útiles artesanales cortando primeramente el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado, para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarán las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar un rebaje en los extremos que alojaran los aros de cobre.

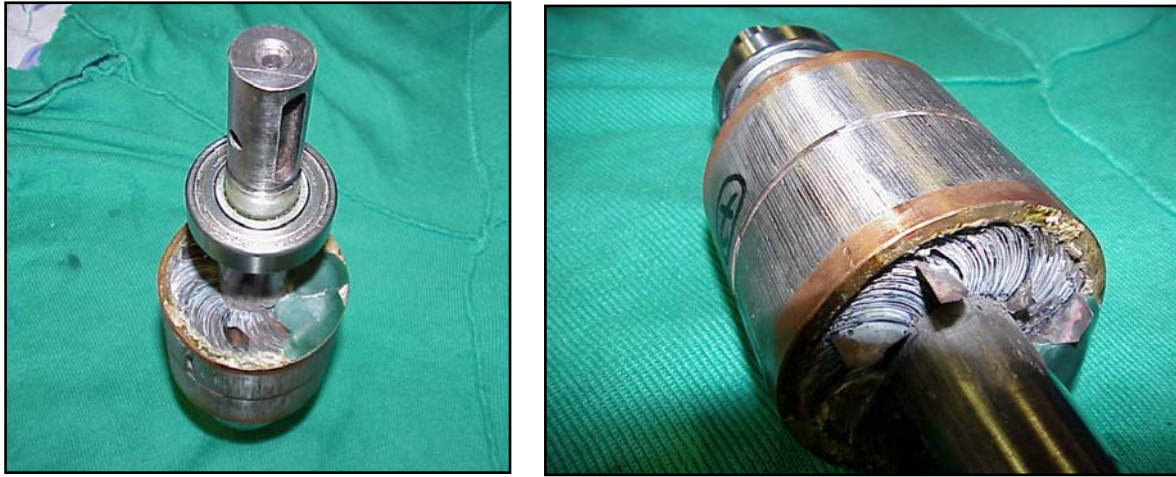


Figura 3.31. Detalles constructivos del rotor chapas tipo B. Obsérvense las chapas de ventilación.

Las diferencias con respecto al resto de los rotores empiezan aquí. Mientras que en los otros modelos una vez practicados los rebajes^{L-8} para alojar los aros, las chapas pasaban a su conformado final, en esta ocasión antes de doblar las chapas, se practico un segundo mecanizado a las mismas para obtener una ranura central con una anchura de 5 mm y una profundidad de 10 mm, rebajándose finalmente las chapas por el centro de esta ranura en dos mitades simétricas. Posteriormente las chapas se conformaron en la forma definitiva mediante la utilización de una prensa (conjunto máquina de taladrar-portabrocas) dejándolas listas para su unión al eje del rotor. Aparte, se cortaron unas segundas chapas de hierro sin aislar (8 en concreto) de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 4.4 W/kg a 1 T y de 6.5 W/kg a 1.5 T, pero en esta ocasión en forma de discos con un orificio central practicado mediante taladrado y posterior mandrilado del mismo diámetro de la ranura central del núcleo de chapas.

Paralelamente se construyeron^{M-11,M-12} los aros con redondo de cobre DN de $\phi=90$ mm mediante torneado y posterior fresado dejándolos en desbaste. Estos aros no disponían de aletas para la ventilación como en el resto de rotores, siendo completamente lisos.

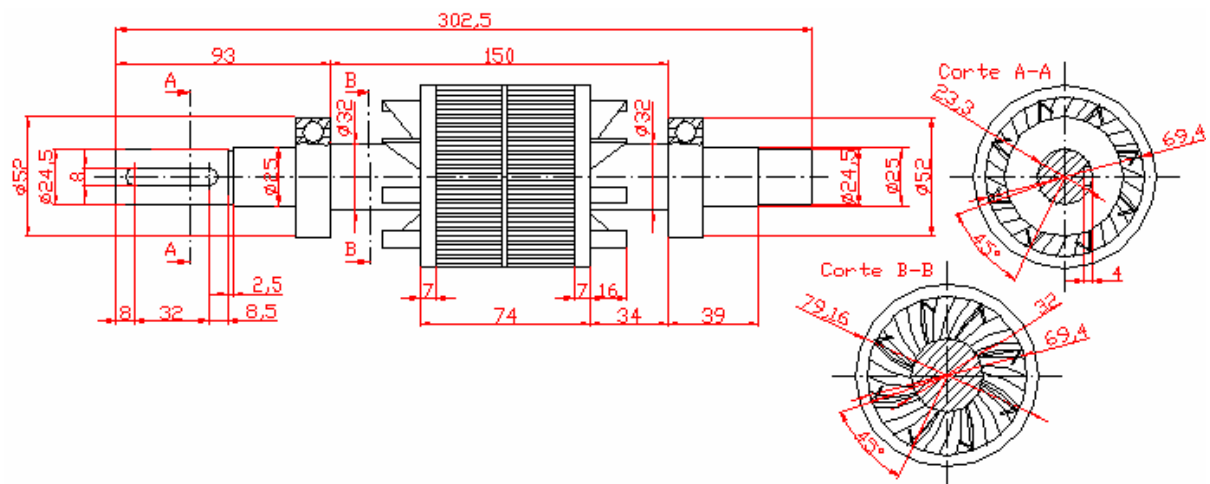


Figura 3.32. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo B. Las cotas están dadas en mm.

Una vez a punto las chapas y los aros se paso a la construcción^{L-8} del eje, que como en otros modelos estaba formado por mecanizado en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada de $\phi=35$ mm, al cual posteriormente se le aplicaron unas estrías que permitirían la mejor sujeción de las chapas.

Ya disponíamos de todos los elementos que formaban el rotor, por tanto solo faltaba unirlos. Para ello se depositaron los dos tipos de chapas en un utillaje en el cual en primer lugar se colocaron las dos secciones de las chapas en espiral con el rebaje simétrico y en medio de estas dos secciones se colocaron las 8 chapas que formaban el disco que servía de sujeción central a las dos secciones de chapas en espiral, depositándose cuidadosamente todo el conjunto en el interior de este utillaje con el fin de que todas las chapas estuvieran concéntricas con el diámetro del eje. Comentar que se dejaron algunas chapas que sobresalían del núcleo para realizar la función de aletas de ventilación.

Posteriormente se introdujo el eje estriado y barnizado con un producto adhesivo resistente y conductor, en el interior del utillaje de las chapas, aplicándose a las chapas un punto de soldadura autógena con lo que se aumento la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre ellas. Se colocaron los aros de cobre uniéndose a las chapas mediante soldadura y se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y los aros recordando que las chapas en el primer modelo (modelo Z) no fueron mecanizadas ni superficialmente ni lateralmente.

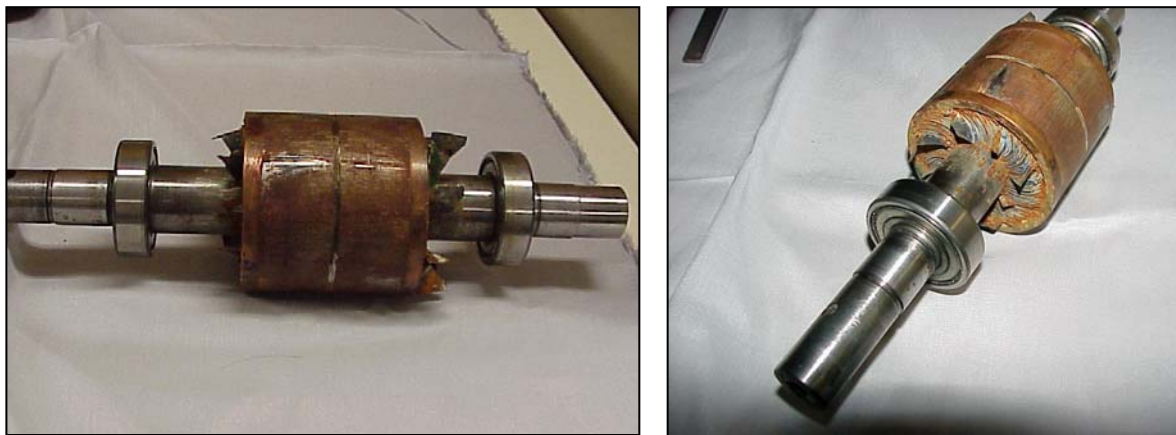


Figura 3.33. Rotor chapas tipo B. Vista frontal y lateral. Observar la pasta resistente de la calibración.

Finalmente, se dispusieron en los extremos del eje dos cojinetes^[L-7] de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. Finalmente se realizo el chavetero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la adición de masa (pasta resistente a las temperaturas y esfuerzos mecánicos para los que se diseño el rotor) ofreciendo la ventaja de no interferir electromagnéticamente en la chapas.

Hasta aquí se ha descrito el proceso constructivo general del modelo Z. Para llegar al modelo B, se tuvieron que realizarse dos mecanizados, uno para obtener el modelo D (superficie del núcleo del rotor lisa), y finalmente mediante un segundo mecanizado se obtuvo el modelo aquí expuesto, el B.

Como ya se ha comentado y será analizado en el capítulo IX de esta obra, este ha sido el modelo con el cual se han obtenido peores resultados. No podía ser de otra forma con un entrehierro tan grande lo que provocó grandes intensidades y pérdidas, siendo su análisis no obstante de utilidad precisamente por este aspecto, ¿cómo varían las respuestas electromagnéticas de estos rotores cuando modificamos el entrehierro?

3.3.2.5.3 Rotor de chapas tipo C

El método empleado para la fabricación de este rotor no difiere sustancialmente de los restantes modelos de rotor de chapas. En este caso se optó por realizar un modelo parecido al rotor de chapas tipo A, pero en esta ocasión con chapa magnética de grano orientado^[M-6] sin aislar de 0.35 mm de espesor con unas pérdidas de 0.45 W/kg y 0.94 W/kg a 1 y 1.5 T. El acabado final asimismo se realizo mecanizando tanto la superficie del núcleo del rotor como sus laterales. La unión de las chapas al eje del motor en esta ocasión se llevo a cabo por medio de soldadura autógena y no por estriado del eje como en otros modelos. La curva de las chapas prácticamente no ha variado respecto a los modelo A-B

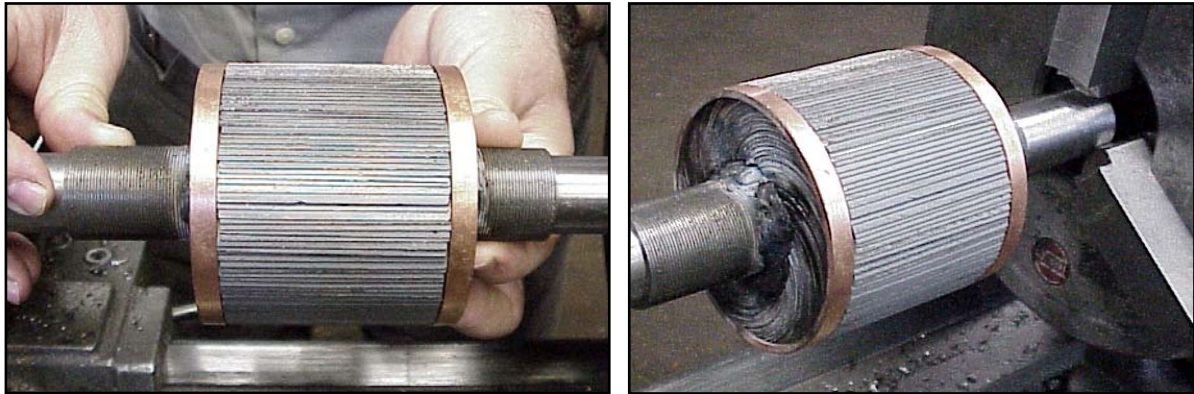


Figura 3.34. Rotor de chapas tipo C. Detalles de la disposición de las chapas antes de ser mecanizadas.

Se pretendía responder algunas hipótesis con la construcción de este rotor: ¿respondería mejor el rotor con las chapas en arista o una vez realizado el mecanizado? ¿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 con aletas para la ventilación? La unión del eje con el núcleo del rotor se realizó en esta ocasión por soldadura autógena, sin realizar estriado en el eje, ¿variación los resultados por este concepto?, etc.

Concretamente^[L-8] el eje de este modelo se construyó^{M-11,M12} mediante el mecanizado en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\phi=35$ mm. Para las chapas que forman el núcleo el material escogido fue un conjunto de 200 chapas magnéticas de 0.35 mm de espesor sin aislar de grano orientado con unas pérdidas de 0.45 W/kg a 1 T y de 0.94 W/kg a 1.5 T, las cuales se conformaron con útiles artesanales cortando primeramente el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarán las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar los rebajes que debían contener los aros de cobre situados en los extremos del núcleo de chapas.

$$y = -2 \cdot 10^{-8} x^6 + 3 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0002 x^4 + 0.0081 x^3 - 0.143 x^2 + 1.4944 x + 14.075 \quad [3.3]$$

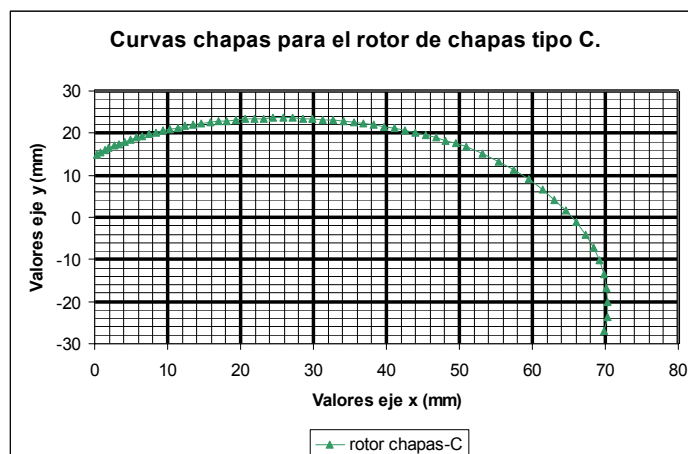


Figura 3.35. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción de este modelo tipo C.

Paralelamente se construyeron los dos aros de los extremos del núcleo de chapas con redondo de cobre DN de $\phi=90$ mm mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste pero sin aletas de ventilación, es decir, lisos. Una vez construidos los aros y preparadas las chapas se procedió al doblaje de las

mismas, el cual fue realizado mediante el concurso de una máquina de taladrar, que hizo las veces de prensa, y a la cual se le anexionó un útil con la forma exacta requerida para las chapas. Posteriormente se preparó un utillaje en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro, uniéndose al eje y a los aros mediante soldadura autógena que aumentó la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A partir de este punto se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y los aros recordando que las chapas en este modelo fueron mecanizadas (el mínimo exigido para eliminar las aristas en la superficie del núcleo del rotor) tanto superficialmente como lateralmente como queda reflejado en la figura 3.37.

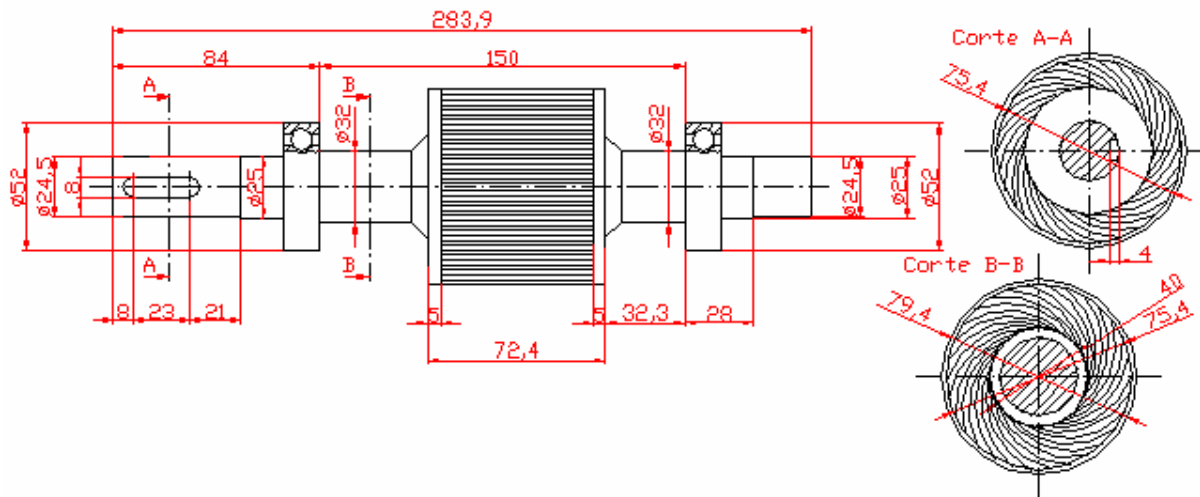


Figura 3.36. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo C. Las cotas están dadas en mm.

Finalmente, se dispusieron en los extremos del eje dos cojinetes^{IL-7} de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. También se realizó el chavetero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la sustracción de masa, realizando unas inclusiones en los laterales del núcleo de chapas, lo cual permite no disminuir la rigidez mecánica del conjunto, sin presentar grandes variaciones en las prestaciones electromagnéticas.

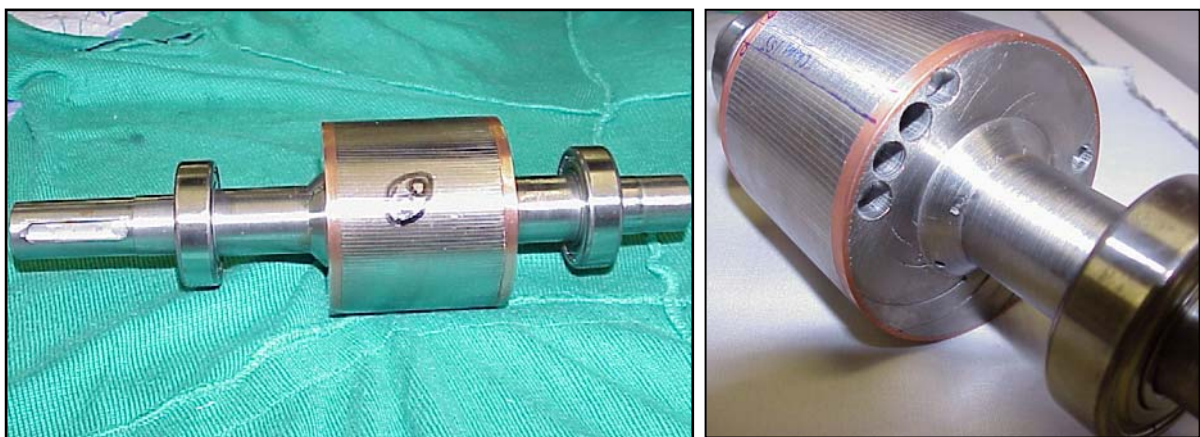


Figura 3.37. Rotor chapas tipo C. Vista frontal y lateral. Obsérvese el equilibrado por sustracción de masas y mecanizado al que fue sometido el modelo.

Los motores equipados con este rotor han presentado unos resultados más bien discretos y como será analizado en el capítulo IX de esta obra, el tipo de chapa, la unión eje-núcleo, el torneado lateral, o la forma y disposición de los aros, entre otros aspectos, podrían haber sido determinantes.

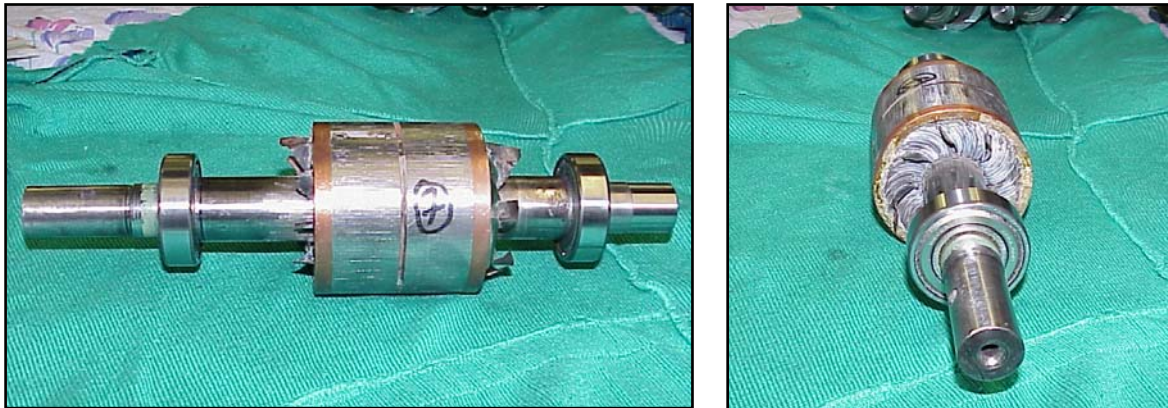


Figura 3.40. Rotor chapas tipo *D*. Vista frontal y lateral. Observar que el rotor ya está mecanizado.

Los resultados eléctricos y magnéticos obtenidos después de practicar el mecanizado mínimo para conseguir un entrehierro constante y sin aristas, han mejorado respecto a la versión *Z* primera sin mecanizar, elevándose el valor del par, aunque la intensidad y las pérdidas prácticamente se han mantenido constantes, lo que ha repercutido en un aumento de sus prestaciones y rendimiento. Aparte, mecánicamente, se ha aumentado su robustez, solidez y calibrado, aunque térmicamente las aristas de las chapas del modelo *Z*, ayudaban a refrigerar el entrehierro. En general considerando en conjunto los aspectos eléctricos, magnéticos, térmicos y mecánicos los dos modelos están muy igualados.

3.3.2.5.5 Rotor de chapas tipo *E*

El rotor de chapas tipo *E*, constituye otra variante del modelo con el que se han obtenido los mejores resultados (el rotor de chapas tipo *A*). La idea de crear este rotor surgió de la hipótesis siguiente: ¿qué sucedería si en vez de seguir las chapas la curva diferencial del resto de los modelos, optábamos por una curva parabólica de tercer grado? Esta curva resulta más abierta, con lo que a igualdad de diámetros la chapa tendría una menor longitud y por tanto representaba un ahorro de material, pero ¿y su respuesta eléctrica y magnética, se verían afectadas? Aparte, en este modelo se introdujo una variable más, la superficie del núcleo del rotor se mecanizó, aunque no sus laterales en los cuales las chapas permanecieron sin modificar. En el capítulo IX se analizarán las consecuencias de estos cambios, por ahora veamos la construcción mecánica y a los materiales empleados.

$$y = -4 \cdot 10^{-9} x^6 + 9 \cdot 10^{-7} x^5 - 8 \cdot 10^{-5} x^4 + 0.0035 x^3 - 0.076 x^2 + 1.051 x + 14.073 \quad [3.5]$$

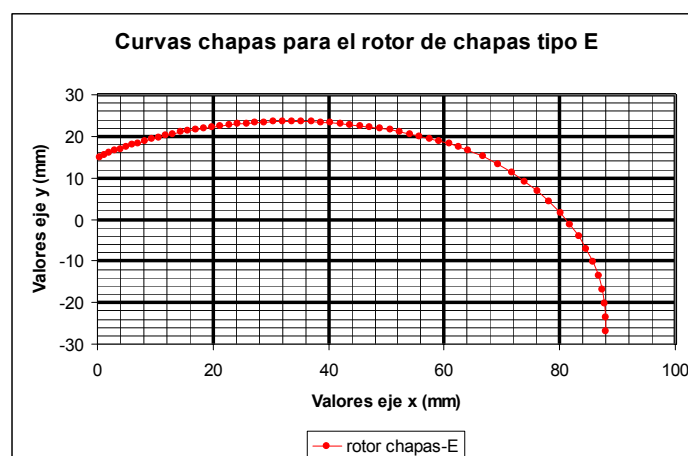


Figura 3.41. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción de este modelo tipo *E*.

En definitiva se pretendía sin cambiar el material ni los aros construir un modelo que permitiera comparar los resultados obtenidos con los modelos *A* y *F*, y que al mismo tiempo representase un complemento a los mismos. Así mientras que el modelo *A*, estaba formado por chapas sin mecanizar y con dos aros en los extremos del núcleo, el modelo *F*, presentaba características idénticas al modelo *A*, en cuanto a materiales, forma constructiva, aros, acabado de las chapas, etc. pero introducía una diferencia esencial, la inclusión de un tercer aro en la parte central del núcleo. Finalmente con la construcción del modelo *E*, se pretendió efectuar un paso más con respecto a los modelos *A* y *F*, cambiar la curvatura de las chapas y dar a la superficie del núcleo un acabado mecanizado, es decir, liso sin aristas en el entrehierro.

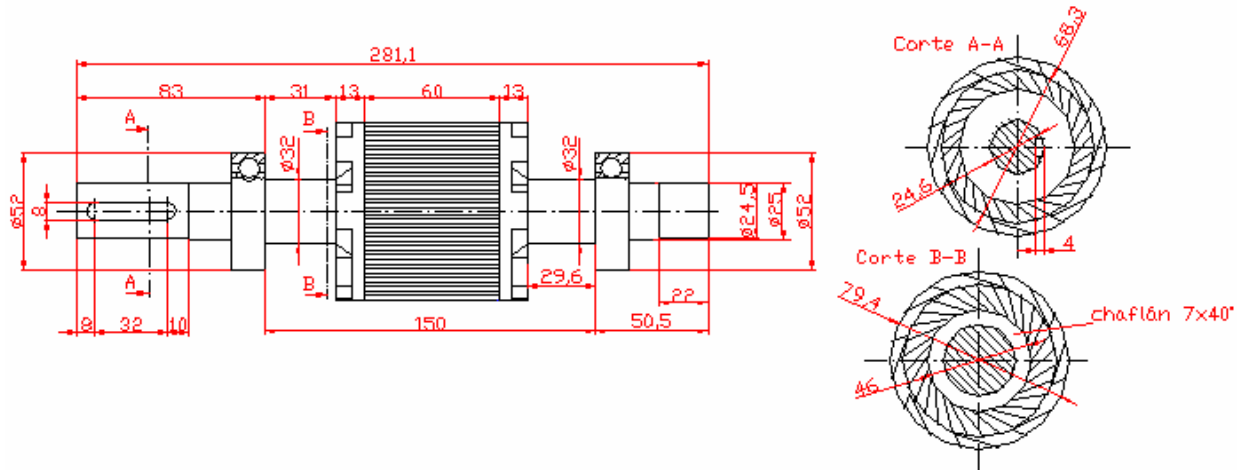


Figura 3.42. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo *E*. Las cotas están dadas en mm.

Concretamente^{L-8} el eje de este modelo se construyó mediante el mecanizado^{M-11,M-12} en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\varnothing=35$ mm. Para el conjunto de las 140 chapas^{M-6} que forman el núcleo el material escogido lo constituyó la chapa magnética sin aislar de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.2 W/kg a 1 T y de 4.64 W/kg a 1.5 T, las cuales se conformaron con útiles artesanales cortando primeramente el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarían las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar los rebajes que debían contener los aros de duraluminio situados en los extremos del núcleo de chapas.

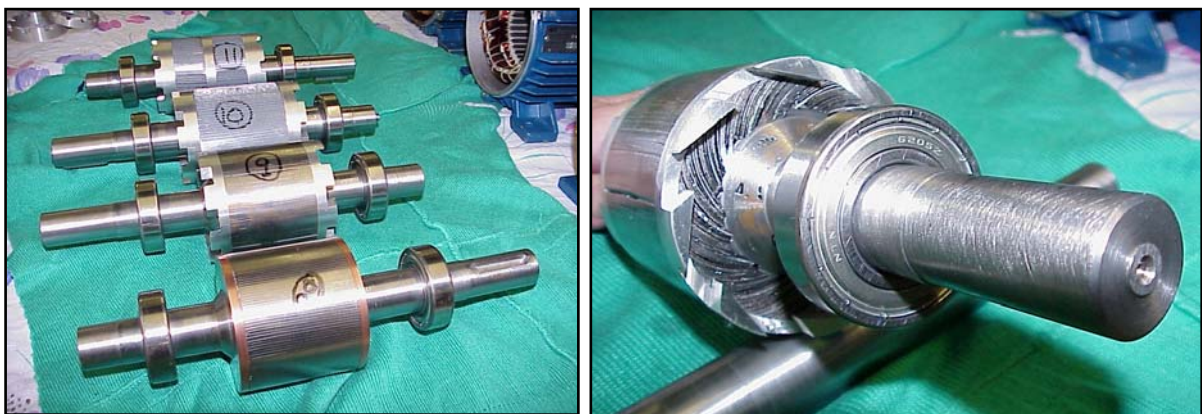


Figura 3.43. Algunos rotores de chapas construidos. Detalle constructivo, rotor chapas tipo *E*.

Paralelamente se construyeron^{L-8} los dos aros de los extremos del núcleo de chapas con redondo de duraluminio 2030 de $\varnothing=90$ mm mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste dejando unas aletas que realizaran funciones de ventilación cuando el rotor estuviera en movimiento. Una vez construidos los aros y preparadas las chapas se procedió al doblaje de las mismas, el cual fue realizado

mediante el concurso de una máquina de taladrar, que hizo las veces de prensa, y a la cual se le anexionó un útil con la forma exacta requerida para las chapas de este modelo. Posteriormente se preparo un utillaje en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro, uniéndose al eje gracias al estriado del mismo, unos puntos de soldadura autógena y la posterior aplicación de un producto adhesivo resistente y conductor lo que aumento la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A partir de de esta operación se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas, como del eje y los aros recordando que las chapas en este modelo fueron mecanizadas (el mínimo exigido para eliminar las aristas en la superficie del núcleo del rotor) superficialmente pero no lateralmente como queda reflejado en la figura 3.43.

Finalmente, se dispusieron en los extremos del eje dos cojinetes^{L-7} de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. También se realizo el chavetero de 8x45 mm, mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor por sustracción de masa, realizando unas inclusiones en los laterales del núcleo de chapas, lo cual permitió no disminuir la rigidez mecánica del conjunto, sin presentar grandes variaciones en las prestaciones electromagnéticas.

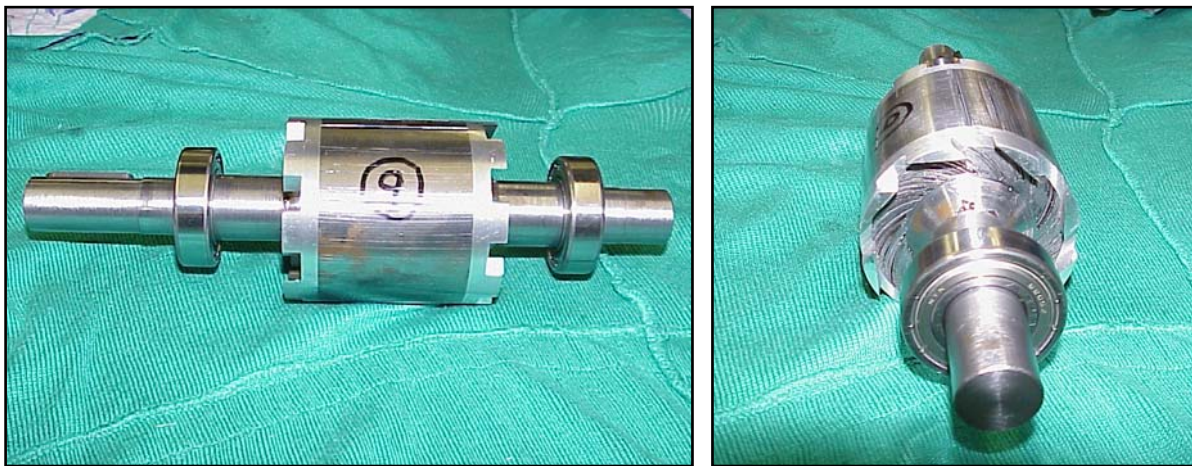


Figura 3.44. Rotor chapas tipo *E*. Vista frontal y lateral. Obsérvese el acabado superficial y la curvatura de las chapas en este modelo.

Con este rotor de chapas tipo *E*, se han obtenido unos resultado no tan satisfactorios respecto a su homologa tipo *A*, siendo uno de los prototipos con prestaciones más bajas si exceptuamos al rotor de chapas tipo *B*. Térmicamente se comporta prácticamente igual, y mecánicamente se notan pocas variaciones, pero eléctricamente y magnéticamente los resultados distan bastante del mejor de los prototipos, el *A*, lo que nos lleva a pensar en la influencia que representa la curvatura de la chapa.

3.3.2.5.6 Rotor de chapas tipo *F*

Al realizar este modelo nos preguntamos cómo influiría (sin cambiar material, curvatura, anillos o conformado de las chapas respecto al rotor de chapas tipo *A*) la inclusión de un tercer anillo central en el núcleo del rotor. Este anillo mejoraría la rigidez mecánica, prácticamente no influiría en su respuesta térmica, pero ¿y sus respuestas eléctricas y magnéticas, se verían afectadas? En capítulos posteriores se explicarán las consecuencias que introduce este tercer aro, por ahora nos limitamos a su construcción mecánica y a los materiales empleados.

Concretamente^{M-11,M-12} el eje se construyó mediante el mecanizado^{L-8} en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\phi = 35$ mm. Para las chapas que forman el núcleo el material escogido fue un conjunto de 150 chapas magnéticas^{M-6} sin aislar de 0.5 mm de espesor con unas pérdidas eléctricas de 2.2 W/kg a 1 T y de 4.64 W/kg a 1.5 T, las cuales se conformaron con útiles artesanales

cortando primeramente el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarían las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar unos rebajes: los dos primeros rebajes se practicaron en los extremos del núcleo para alojar los aros externos de duraluminio, mientras que el tercer rebaje, que marca la diferencia entre los modelos *A* y *F*, se obtuvo por mecanizado de una tercera ranura en la parte central simétrica del núcleo, de una anchura de 15 mm y una profundidad de 10 mm.

$$y = -7 \cdot 10^{-8} x^6 + 8 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0004 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1677 x^2 + 1.7178 x + 15.609 \quad [3.6]$$

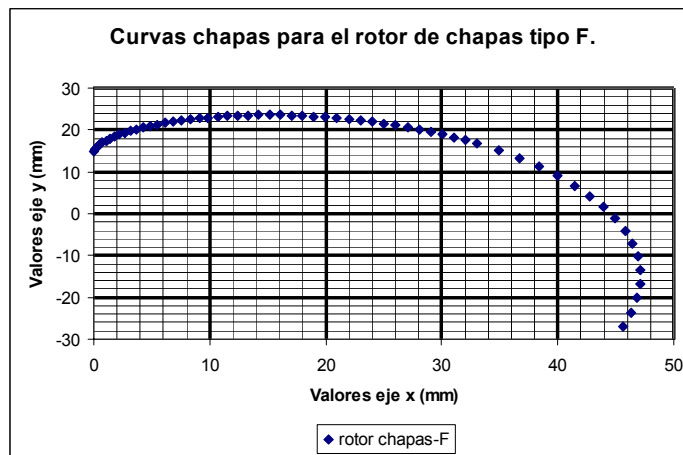


Figura 3.45. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción de este modelo tipo *F*.

Paralelamente se construyeron los aros de duraluminio 2030 de $\phi=90$ mm, en los cuales se han seguido dos métodos diferentes: en cuanto a los aros laterales se han obtenido mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste de forma que sobresalen de ellos unas aletas para la ventilación del rotor. Mientras que para la construcción del aro central, también del mismo redondo de duraluminio, se dejó su superficie lisa (sin aletas de ventilación), dividiéndose el aro en dos mitades simétricas que permitirían a posteriori introducir el aro en la ranura central y por medio de una rosca practicada en cada extremo volverlo a unir quedando el mismo integrado en el núcleo.

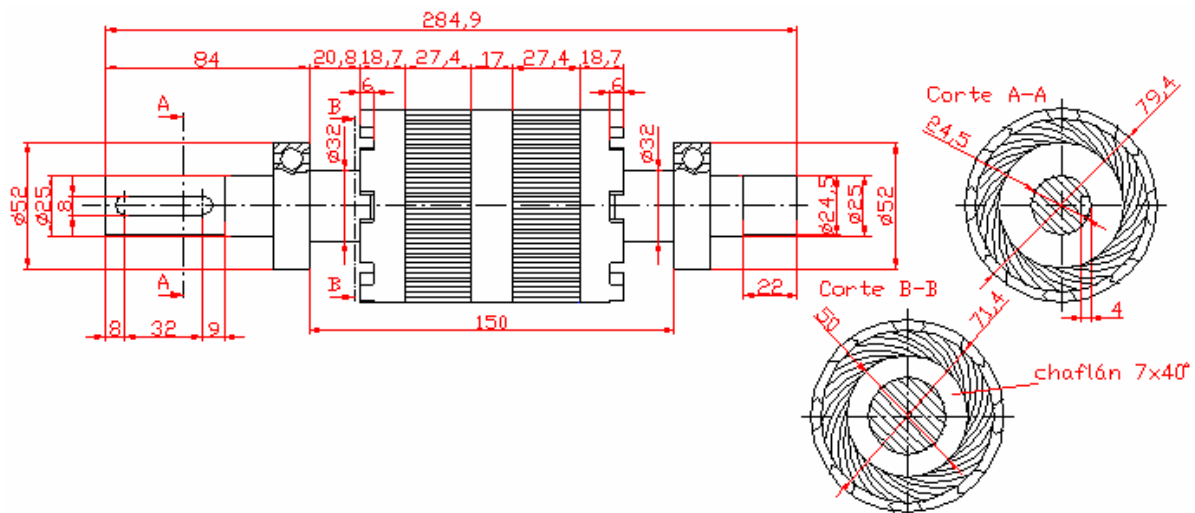


Figura 3.46. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo *F*. Las cotas están dadas en mm.

Una vez construidos los aros y preparadas las chapas se procedió al doblaje de las mismas, el cual fue realizado mediante el concurso de una máquina de taladrar, que hizo las veces de prensa, y a la cual se le anexionó un útil con la forma exacta requerida para las chapas. Posteriormente se preparó un utillaje

en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro, uniéndose al eje gracias al estriado del mismo, unos puntos de soldadura autógena y la posterior aplicación de un producto adhesivo resistente y conductor que aumento la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A continuación, se colocó el tercer anillo central por medio de una rosca practicada en cada extremo que permitía su posterior unión quedando integrado en el núcleo. A partir de aquí, se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y de los aros, recordando que el núcleo de chapas nunca fue mecanizado ni superficialmente ni lateralmente como queda reflejado en la figura 3.47.

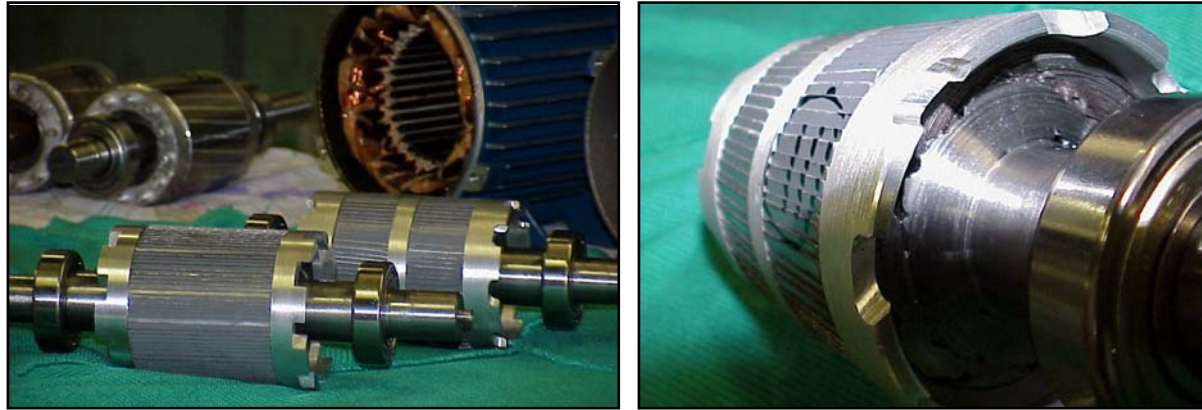


Figura 3.47. Rotor chapas tipo *A* y *F*. Detalle constructivo del rotor de chapas tipo *F*.

Finalmente, se dispusieron en los extremos del eje dos cojinetes^{IL-7j} de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. También se realizó el chavetero de $8 \times 45 \text{ mm}$ mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la sustracción de masa, ya que la adición de masa (como se realizará en otros modelos) ofrece la ventaja de no interferir en la chapas pero disminuye la rigidez mecánica del conjunto y presenta una peor respuesta a las altas temperaturas.

Con este rotor de chapas tipo *F*, se han obtenido unos resultado ligeramente inferiores a su homólogo con dos anillos (tipo *A*), siendo sus características eléctricas y magnéticas ligeramente menores. Térmicamente se comporta prácticamente igual, y mecánicamente se ha conseguido una mayor rigidez al conjunto gracias al ancho anillo central que hace las veces de sujeción de las chapas. El motivo de estas ligeras variaciones puede estar en la inclusión del tercer aro sin aumentar la longitud del núcleo de chapas, lo que ha podido repercutir en una menor efectividad específica de las mismas

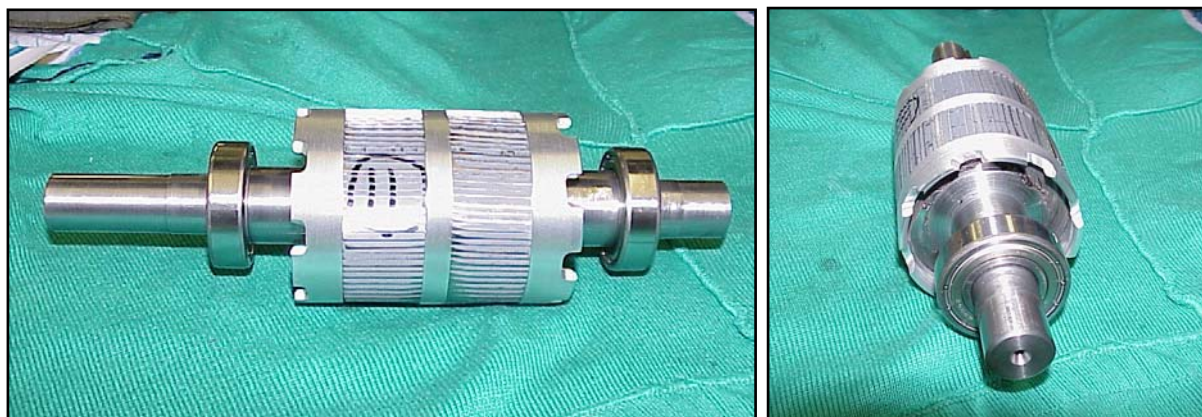


Figura 3.48. Rotor chapas tipo *F*. Vista frontal y lateral.

3.3.2.5.7 Rotor de chapas tipo *Z*

El rotor de chapas tipo *Z*, fue el primer rotor de chapas construido, y el que a posteriori, y después de sendos torneados, se transformó en los modelos *D* y *B* respectivamente. En esta ocasión las aristas de

las chapas se dejaron sin toronar con un entrehierro relativamente pequeño (0.28 mm) lo que permitía obtener una inducción máxima en el mismo de 0.9 T, quedando el núcleo saturado.

$$y = -3 \cdot 10^{-8} x^6 + 5 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0003 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1685 x^2 + 1.6257 x + 14.294 \quad [3.7]$$

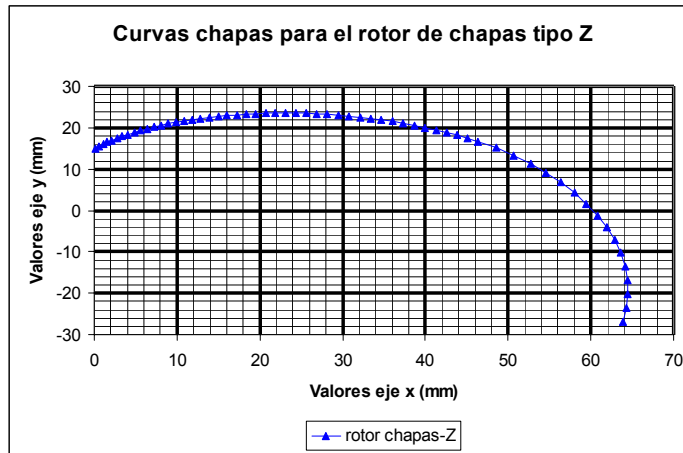


Figura 3.49. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción de este modelo tipo Z.

No existiendo pues variaciones ni en el material ni en la forma constructiva respecto a los otros modelos B y D, lo expuesto al presentar el modelo B es completamente válido para el modelo Z.

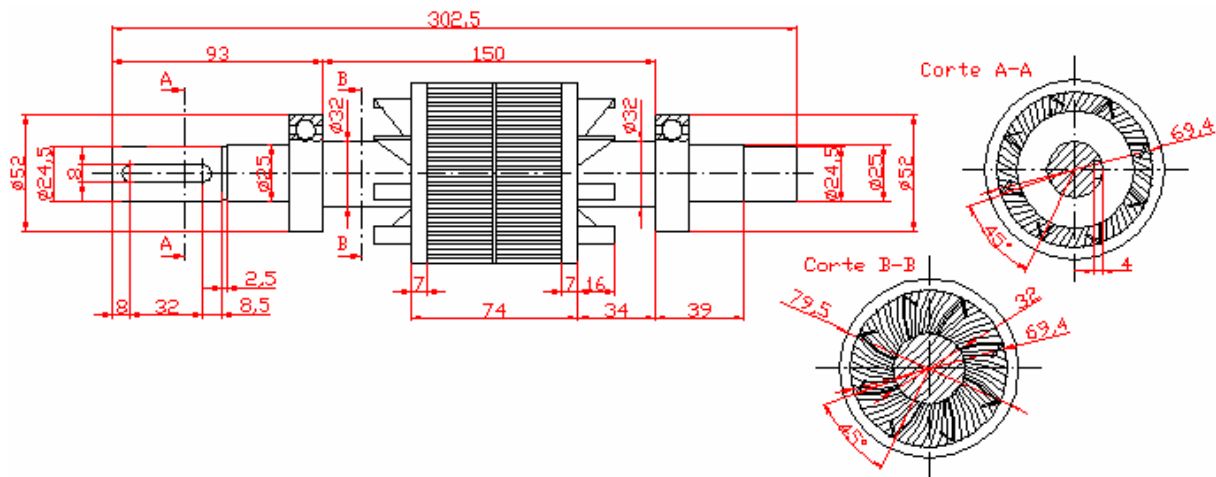


Figura 3.50. Vista lateral y en planta del rotor de chapas tipo Z. Las cotas están dadas en mm.

La figura 3.51 muestra algunos de los aspectos constructivos, así como la forma final de rotor. Nótese la gran cantidad de chapas que forman el núcleo de este rotor, esto fue posible al disponer de la curvatura exacta para las mismas de forma que quedaban perfectamente superpuestas unas sobre las otras.

Otro aspecto importante lo constituyen los dos aros laterales de cobre y al aro central del núcleo formado por 8 chapas, esta vez cilíndricas, colocadas de forma perpendicular al eje (igual que en un rotor de jaula de ardilla convencional), con lo que se obtuvo una consistencia y rigidez mecánica del conjunto muy buena permitiendo el funcionamiento del rotor durante largos periodos de tiempo como se demostró en las que pruebas de resistencia a las que se sometieron todos los rotores construidos.

Como se indico en la exposición de los modelos B y D, las chapas que sobresalen lateralmente del núcleo realizan la función de aletas de ventilación al ser los aros de cobre completamente lisos.

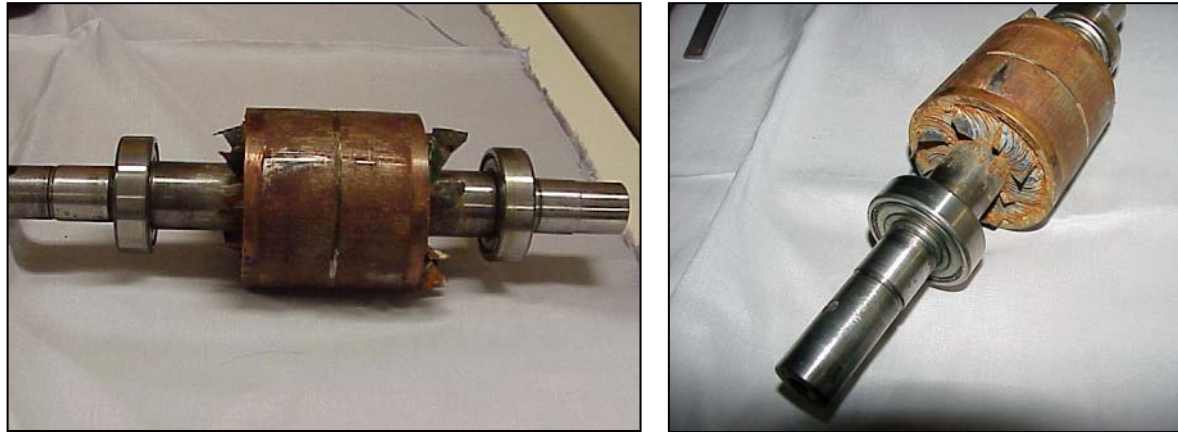


Figura 3.51. Rotor chapas tipo Z. Vista frontal y lateral. Obsérvese que la superficie del núcleo del rotor no ha sido mecanizada en este modelo.

Los resultados eléctricos y magnéticos obtenidos (que serán analizados en el capítulo IX de esta obra), antes de realizar el mecanizado de las aristas de las chapas superficiales del núcleo no son tan correctos como los de su sucesor (el modelo *D*), obteniéndose un valor del rendimiento y par algo menores. Mecánicamente es menos rígido y sólido que el modelo *D*, en cambio, térmicamente los resultados obtenidos superan positivamente al modelo *D*, debido al efecto ventilador que producen las aristas en el entrehierro cuando el motor se encuentra en funcionamiento.

3.3.2.5.8 Rotor de chapas tipo prototipo I

Con la construcción de los siete rotores precedentes se habían resuelto muchas hipótesis, otras quedarían por responder y formarían parte de otra investigación. Pero había una pregunta que no deseábamos pasar por alto. ¿Si se utilizaban chapas magnéticas aisladas por las dos caras como las usadas en los rotores de jaula de ardilla, el motor funcionaría correctamente?

No era tan rápida la respuesta como a priori podía parecer, ya que el flujo magnético en este tipo de rotores sabíamos que seguía caminos diferentes al de los rotores convencionales. Aparte, de la forma en que pensábamos que se cerraba el circuito magnético en estos rotores de chapas, no parecía extraño que se originaran fuerzas magnéticas que en según que situaciones podrían llegar a doblar las chapas del núcleo cuando los motores estuvieran en funcionamiento.

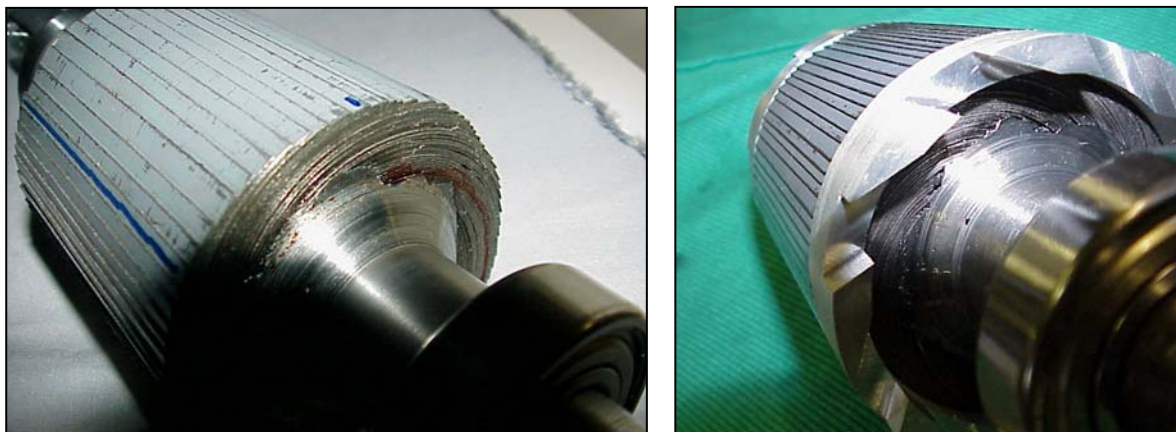


Figura 3.52. Diversas fases constructivas del rotor de chapas prototipo I.

Eran pues, bastante las hipótesis que debíamos validar y a priori se pensó en comprobar este efecto mediante la simulación con el programa de elementos finitos que tan buenos resultados nos había proporcionado con los otros modelos, pero eran muchas las variables que intervenían y los modelos

numéricos o los programas de simulación difícilmente las contemplarían todas. Por tanto, parecía que la única forma de validar con rigor estas hipótesis pasaba por la laboriosa construcción de algún modelo más, utilizando esta vez chapa magnética aislada por las dos caras.

Para estas pruebas se utilizó chapa magnética^{M-7} aislada por las dos caras de 0.5 mm de espesor en fleje con unas pérdidas eléctricas de 1,35 W/Kg a 1 T y 2.8 W/kg a 1.5 T. Esta chapa presentaba espesores y pérdidas eléctricas de unas magnitudes análogas al del resto de las chapas utilizadas en otros modelos y por tanto resultando válidas a la hora de realizar comparaciones.

Para la construcción del primer prototipo (prototipo I), se decidió que fuera lo más similar posible al modelo de chapas que hasta el momento había proporcionado los mejores resultados del tipo A. Por tanto, excepto la chapa, el proceso constructivo, la curva de la chapa, otros materiales y el acabado final deberían ser fiel reflejo de aquel rotor.

$$y = -7 \cdot 10^{-8} x^6 + 1 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0005 x^4 + 0.0135 x^3 - 0.1973 x^2 + 1.7873 x + 14.951 \quad [3.8]$$

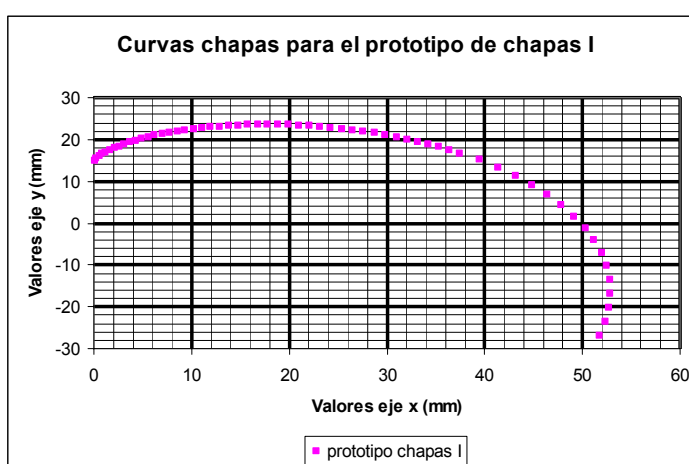


Figura 3.53. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción del prototipo I.

Concretamente el eje se construyó^{M-11,M-12} mediante el mecanizado^{L-8} en desbaste de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\phi=35$ mm. Para las chapas que forman el núcleo el material escogido fueron 160 chapas magnéticas aisladas de 0.5 mm de espesor en fleje con unas pérdidas eléctricas de 1,35 W/Kg a 1 T y de 2.8 W/kg a 1.5 T, las cuales se habían conformado con útiles artesanales cortando en primer lugar el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarían las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar los rebajes correspondientes a sus extremos en los cuales estaría alojados los anillos o aros de duraluminio. Paralelamente se construyeron los aros de duraluminio 2030 de $\phi=90$ mm mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste de forma que de ellos sobresalían unas aletas para la ventilación del motor.

Una vez construidos^{L-8} los aros y preparadas las chapas se procedió al doblaje de las mismas, el cual fue realizado mediante el concurso de una máquina de taladrar, que hizo las veces de prensa, y a la cual se anexionó un útil con la forma exacta requerida para las chapas. Posteriormente se preparó un utillaje en el que se depositaron cuidadosamente las chapas y los aros con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro, uniéndose al eje gracias al estriado del mismo, unos puntos de soldadura autógena y la posterior aplicación de un producto adhesivo resistente y conductor que proporcione un aumento de la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A partir de esta operación se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y de los aros recordando que las chapas no fueron mecanizadas ni superficialmente ni lateralmente en un primer momento.

Finalmente, se dispuso en los extremos del eje dos cojinetes^(L-7) de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. También se realizó el chavetero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la sustracción de masa para que el rotor presentara una mayor resistencia térmica y mecánica.

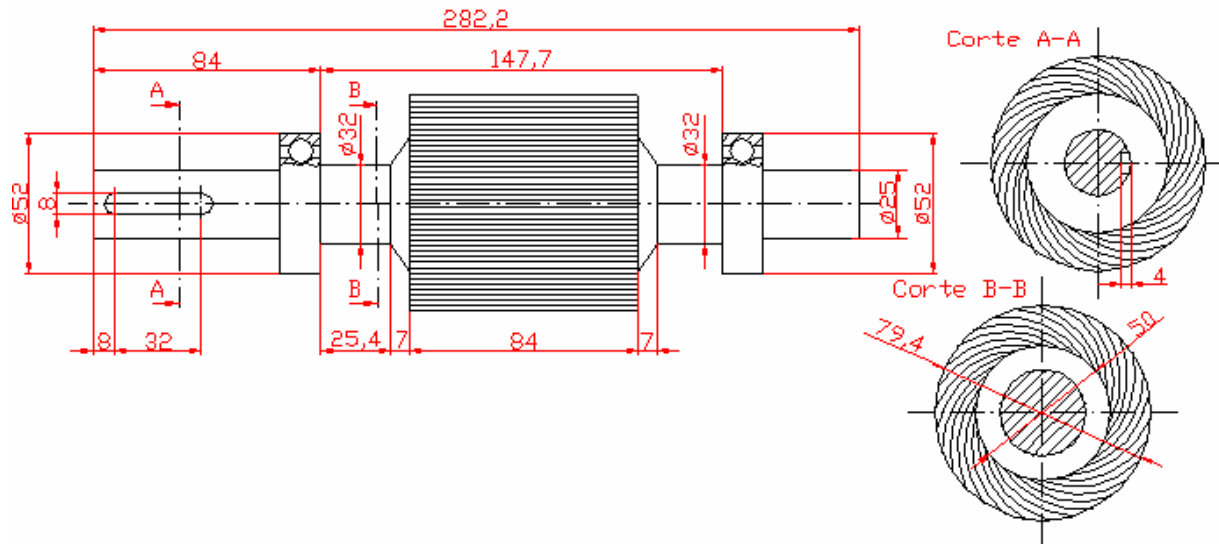


Figura 3.54. Vista lateral y en planta del rotor de chapas prototipo I. Las cotas están dadas en mm.

Aunque se analizaran con detalle los resultados obtenidos con este y otros modelos en el capítulo IX de la presente obra, es necesario para comprender los pasos seguidos en la construcción de estos prototipos finales dar en este momento una primera aproximación de los resultados.

Una vez construido el rotor prototipo I, llegó el momento de probarlo, primeramente con el motor de seis polos. Se conectó el motor en vacío a la red y mediante una fuente trifásica regulable en tensión se probó girando correctamente con tensiones pequeñas. Pero al aumentar la tensión (a partir de unos 200 V) el motor empezaba a dar muestras de saturación y en vez de ganar velocidad ésta se mantenía. Cuando se alcanzaron los 300 V el motor empezó a perder velocidad, llegando a estar prácticamente bloqueado al alcanzarse los 380 V nominales.

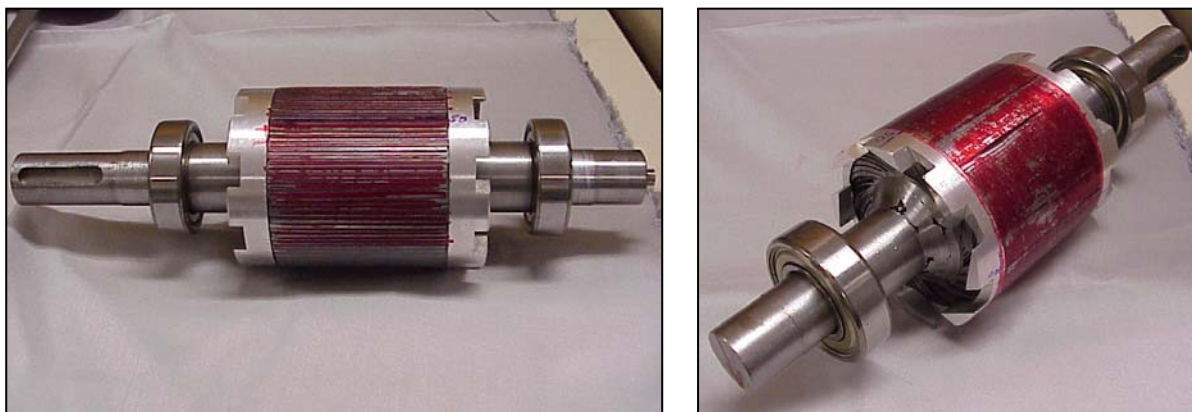


Figura 3.55. Rotor chapas prototipo I. Obsérvese las sucesivas mecanizaciones a las que fue sometido el modelo generándose cada vez un entrehierro mayor.

Como ya habíamos supuesto con esta chapa los motores tendrían problemas pero: ¿con motores menos saturados magnéticamente el rotor respondiera mejor? Para comprobar esta hipótesis se montó el rotor, en primer lugar, con el motor de cuatro polos y a posteriori con el motor de dos polos, los resultados fueron los siguientes: Se noto una mejoría con el motor de cuatro polos y aún la respuesta se hizo más

patente con el motor de dos polos, cada vez podíamos alcanzar velocidades mayores con tensiones también más elevadas. Así pues la saturación del motor influía de forma decisiva en el comportamiento de este prototipo I, pero en ninguno de los casos el motor llegó a funcionar correctamente.

Seguidamente se planteó otra hipótesis: ¿podría ser que las chapas del rotor se doblaran hasta rozar en el estator por efecto del camino que seguía el flujo magnético, el cual tendría seguramente dificultades para cerrarse al estar las chapas aisladas entre sí? Para comprobarlo se pintó con un rotulador permanente la parte exterior del núcleo de chapas y se volvió a conectar el motor de dos polos a la red, comprobándose que efectivamente con tensiones elevadas las chapas llegaban a rozar en el estator al quedar marcado la superficie del rotor pintada con rotulador.

Cabía una solución al problema, ¿sí mecanizábamos la superficie del rotor mínimamente eliminando las aristas de las chapas en el entrehierro desaparecería este efecto negativo?

Para responder a esta pregunta se mecanizó el núcleo de chapas magnéticas hasta conseguir que desaparecieran las aristas de las chapas en el entrehierro con lo que éstas quedarían más sujetas y se volvió a pintar la superficie con rotulador, montándose el rotor en el motor menos saturado magnéticamente, el de dos polos. Se probó el motor en estas nuevas condiciones y aunque se retrasó el efecto, al final las chapas volvían a rozar en el estator.

Se realizaron hasta cuatro mecanizados posteriores, rebajando en cada pasada 0.1 mm, aumentando el entrehierro inicial de 0.3 mm hasta alcanzar prácticamente los 0.8 mm. Con un entrehierro tan grande se consiguió que al fin las chapas no rozaran en la superficie del estator, pero las pérdidas eléctricas y la intensidad eran tan elevadas que la solución no era válida.

3.3.2.5.9 Rotor de chapas tipo prototipo II

Parecía claro que utilizando chapa magnética aislada por las dos caras no era posible construir rotores de chapas en espiral ya que éstas debido a las fuerzas magnéticas se doblaban y llegaban a rozar la superficie interior del estator. Pero aún teníamos nuestras dudas: ¿qué las chapas se doblaran cuando la superficie del rotor aún no estaba torneada tenía una cierta lógica pero: ¿una vez mecanizada la superficie del rotor podían seguir doblándose las chapas?



Figura 3.56. Rotor de chapas prototipo II. Vistas generales. Obsérvese en las figuras que el rotor se probó con diferentes aros

Tampoco entendíamos porqué después de realizar una prueba con tensión en la cual las chapas habían rozado el estator y prácticamente bloqueado el giro del motor, cuando se desconectaba el motor las chapas podían volver a su posición inicial sin dejar señales de su flexión (solo quedaban las marcas del roce con el estator pero la superficie del rotor permanecía completamente lisa como corresponde a un mecanizado). Este proceso; conexión motor, roce chapas con estator, desconexión motor y análisis superficie del rotor, se repitió en varias ocasiones siendo el resultado siempre el mismo, con tensión

había roce (chapas dobladas) y sin tensión la superficie del rotor permanecía lisa como si nada hubiera pasado, ¿era posible que las chapas volviesen una y otra vez a su estado original sin dejar señales?

Necesitábamos hallar respuesta a estos interrogantes y con el rotor de chapas prototipo I, no podíamos contar debido a las sucesivas pasadas del torno que aumentaron en exceso el entrehierro inutilizando el rotor a efectos prácticos. Este rotor ya había realizado su función: demostrar que con chapas aisladas por las dos caras se inducían unas fuerzas magnéticas elevadas capaces de deformar la superficie del núcleo del rotor con independencia de estar mecanizado, provocando el roce de las chapas con la superficie del estator y además, que este problema no podía solventarse con sucesivos mecanizados ya que para eliminar los roces, el entrehierro debía tener unas dimensiones que lo hacían eléctricamente inaceptable por sus elevadas intensidades y potencias consumidas.

$$y = -1 \cdot 10^{-8} x^6 + 2 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0002 x^4 + 0.0061 x^3 - 0.1163 x^2 + 1.3281 x + 14.081 \quad [3.9]$$

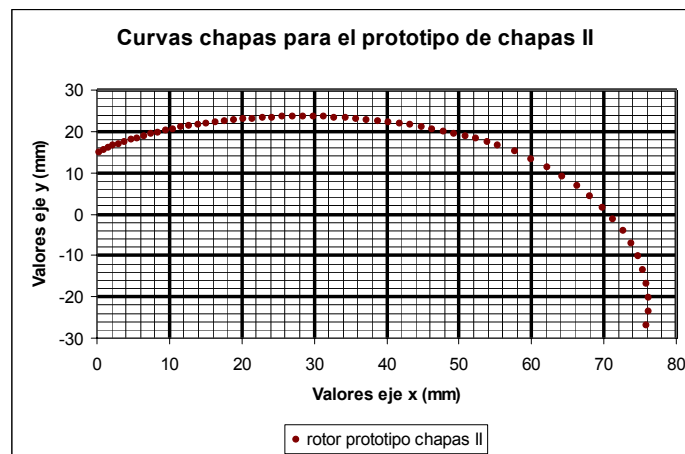


Figura 3.57. Ecuación y curva dada a la chapa para la construcción del prototipo II.

Nos parecía tan raro que las chapas pudieran doblarse cuando el motor estaba con tensión (más aún estando mecanizadas), o cuando se desconectaba el motor las chapas fueran capaces de volver a su estado inicial sin dejar señales, qué nos planteamos otra hipótesis: ¿y si las chapas no se doblaban y lo que flexionaba era el eje del rotor?

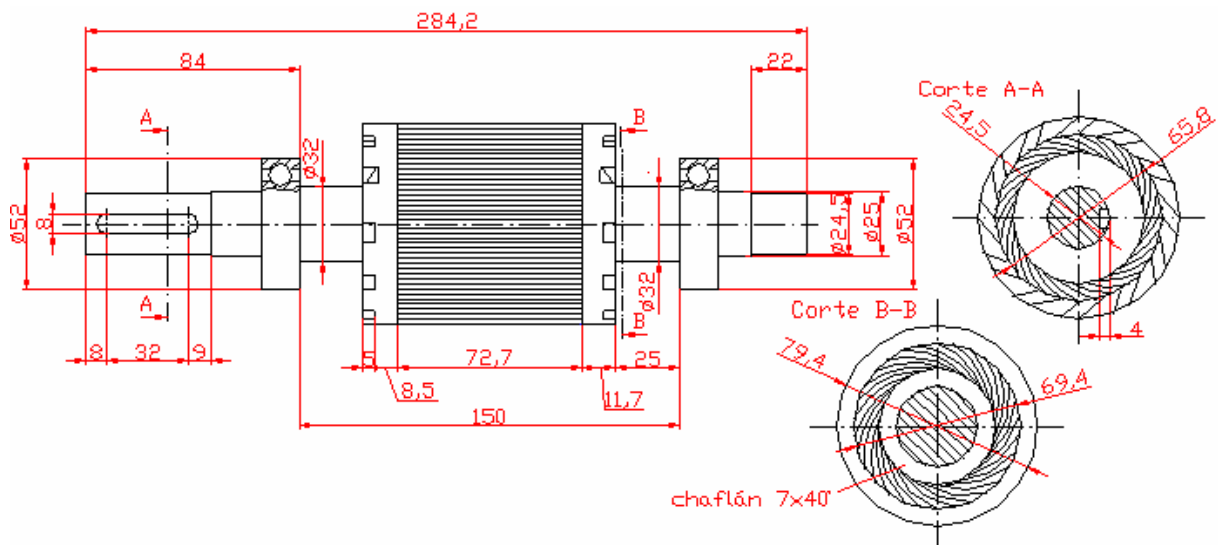


Figura 3.58. Vista lateral y en planta del rotor de chapas prototipo II. Las cotas están dadas en mm.

Los ejes construidos^{M-11,M-12} hasta el momento partían de redondo de acero F-114 con barra calibrada $\phi=35$ mm el cual una vez mecanizado adopta el diámetro final de $\phi=30$ mm. Con la longitud que

presentan estos rotores, como máximo de 300 mm, no parecían lógicas flexiones radiales del eje, pero, ¿por qué no probar un acero más rígido que certifique que la flexión de las chapas y no la flexión del eje los causantes del bloqueo del motor cuando está en funcionamiento?

Concretamente el eje se construyó^{L-8} mediante el mecanizado en desbaste de un acero más rígido, utilizándose redondo de acero F-522 (U-13), de $\phi=35$ mm. Para las chapas que forman el núcleo el material escogido no cambió estando el núcleo del rotor formado por 160 chapas magnéticas^{M-7} aisladas de 0.5 mm de espesor en fleje con unas pérdidas eléctricas de 1,55 W/Kg a 1 T y de 3.1 W/kg a 1.5 T, las cuales se habían conformado con útiles artesanales cortando en primer lugar el material recibido mediante cizalla en laminas del tamaño adecuado (para no modificar magnéticamente las chapas), para después, volverlas a cortar en los rectángulos que formarían las chapas definitivas. Antes de doblar las chapas, éstas se juntaron y colocaron en la fresa automática para practicar los rebajes correspondientes a sus extremos en los cuales estaría alojados los anillos o aros de duraluminio. Paralelamente se construyeron los aros de duraluminio 2030 de $\phi=90$ mm mediante mecanizado y posterior fresado en desbaste de forma que de ellos sobresalían unas aletas para la ventilación del motor.

Una vez construidos los aros y preparadas las chapas se procedió al doblaje de las mismas, el cual fue realizado mediante el concurso de una máquina de taladrar, que hizo las veces de prensa, y a la que se anexionó un útil con la forma exacta requerida para las chapas. Posteriormente se preparó un utillaje^{L-8} en el cual se depositaron cuidadosamente las chapas y los aros con el fin de que todas estuvieran concéntricas con el diámetro, uniéndose al eje gracias al estriado del mismo, unos puntos de soldadura autógena y la posterior aplicación de un producto adhesivo resistente conductor aumentando la rigidez mecánica del rotor al quedar las chapas más acopladas y unidas entre sí. A partir de esta operación se procedió al acabado tanto del núcleo de chapas como del eje y los aros recordando que las chapas en las primeras pruebas no fueron mecanizadas ni superficialmente ni lateralmente.

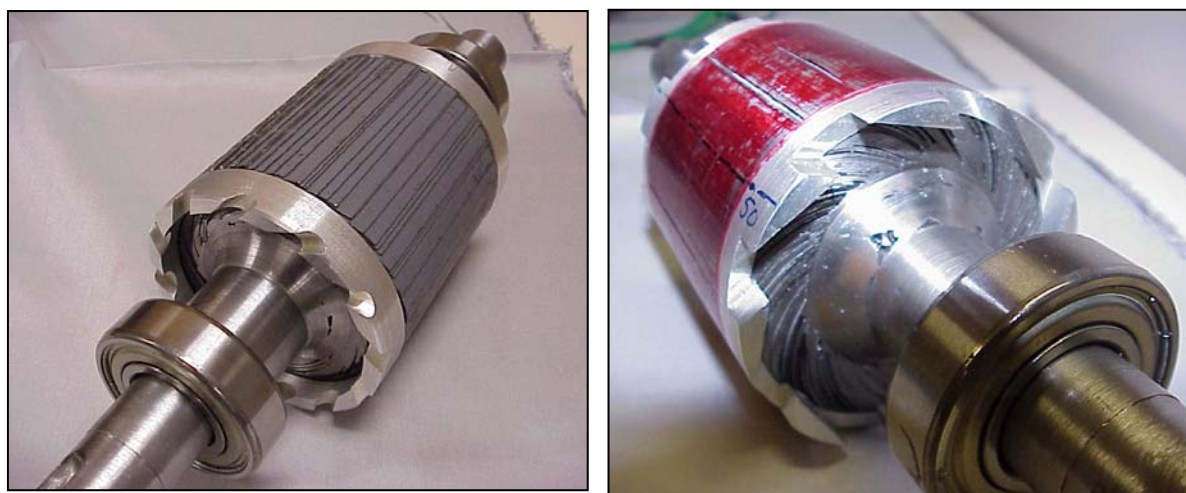


Figura 3.59. Rotor chapas prototipo II. Detalle del rotor con las chapas intactas y una vez mecanizado.

Finalmente, se dispuso en los extremos del eje dos cojinetes^{L-7} de un diámetro $\phi = 52 \times 15-6205-Z$ para lo cual se habían practicado previamente unos rebajes con el fin de fijar los mismos. También se realizó el chavetero de 8x45 mm mediante el concurso de una fresa y se procedió al calibrado del motor mediante la sustracción de masa para que el rotor no perdiera resistencia mecánica.

Nos dispusimos a realizar la primera prueba con este nuevo rotor colocándolo directamente en el motor de dos polos por ser el menos saturado y recordando que en esta prueba las chapas estaban sin mecanizar, es decir, tenían intactas sus aristas. Se pintó la superficie de las chapas y se aplicó tensión al motor en vacío alcanzándose los 250 V sin problemas. A partir de esta tensión la velocidad empezó a disminuir levemente, disminución que se hizo más patente a medida que la tensión se acercaba a su

valor nominal (380 V) llegándose prácticamente al bloqueo del motor. Posteriormente se extrajo el rotor y pudo comprobarse que la superficie pintada tenía evidentes señales de roce con el estator.

Seguidamente se mecanizó levemente la superficie del rotor, (lo justo para eliminar las aristas de las chapas y dejar su superficie lisa), y volvió a realizarse la prueba con el mismo motor de dos polos. El resultado fue parecido, quizás se retrasaron las flexiones ya que éstas aparecieron al alcanzarse los 290 V, pero surgiendo los mismos defectos. Parecía pues descartada la hipótesis del fleje del eje ya que este acero era mucho más rígido, mientras que los resultados no variaron, roce chapas rotor con superficie del estator. Se llegó incluso a probar la sujeción de las chapas del núcleo del rotor con diversos tipos de aros como queda reflejado en las figuras 3.56 y 3.59 no mejorándose los resultados.

Para estar seguros de que el problema lo constituía realmente la flexión de las chapas se probó un nuevo sistema. Las dos tapas laterales de los motores están construidas con materiales opacos (aluminio, hierro forjado, etc.) no permitiendo la visión del interior del motor. Pero si construíamos un soporte con un material plástico transparente que permitiera la sujeción del eje sustituyendo a una de las tapas (para realizar pruebas cortas) seríamos capaces de ver lo que realmente ocurriría en el interior del motor: así comprobaríamos si realmente las chapas se doblaban cuando el motor se hallaba en tensión y después eran capaces de volver a su posición inicial cuando se desconectaba el motor de la red

Mediante este sistema pudo comprobarse que efectivamente a partir de una tensión determinada (que variaba según los motores fueran de dos, cuatro o seis polos) las chapas se doblaban clavándose en la superficie del estator, volviendo a la posición inicial cuando cesaba la alimentación del motor. Pudo comprobarse visualmente este hecho, incluso pudo apreciarse con toda claridad el ruido que producían las chapas al tocar de forma gradual (nunca lo hicieron todas a la vez sino de forma ordenada a medida que el campo magnético giratorio así lo determinaba) la superficie interior del estator.

En el capítulo IX de esta obra se darán los detalles numéricos experimentales y las diversas fases en que se producían estos efectos, analizándose en detalle la interacción de las chapas aisladas por sus dos caras con el campo magnético responsable de su deformación.

3.3.2.5.10 Rotor de chapas tipo prototipo III

Comentar finalmente, la construcción de un tercer prototipo (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 el que los ensayos fueron destructivos ya que desde el primer momento se comprobó el efecto de las aristas y al mismo tiempo de los aros laterales (con diversas formas y tamaños), pero después se procedió a su mecanizado con sucesivas pasadas en el torno que permitió comprobar su respuesta al variar el entrehierro.