

CAPÍTULO IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

9.1 INTRODUCCIÓN

Los objetivos que se plantearon en la realización de esta tesis, pasaban por encontrar un motor asíncrono trifásico que dispusiera de un alto par de arranque manteniendo la intensidad en valores normales. Otro de los objetivos prioritarios era conseguir un motor en el cual la influencia de la carga fuera mínima, es decir, que al variar ampliamente la carga conectada al motor la intensidad permaneciera prácticamente constante. Finalmente, el último de los objetivos perseguidos pasaba por que el motor construido tuviera una respuesta en regímenes transitorios superior a los motores convencionales de jaula de ardilla.

Para intentar cumplir estos objetivos se pensó en el motor asíncrono trifásico con rotor de chapas en espiral, del que hasta el momento se han expuesto su funcionamiento, sus materiales y formas constructivas, sus respuestas mecánicas, térmicas y eléctricas, los resultados de los diversos ensayos experimentales, las simulaciones realizadas,...etc. Con todo este material estamos ya en condiciones de realizar un análisis profundo del porqué de cada respuesta o funcionamiento del motor, así como decidimos por el mejor de los prototipos y comprobar si se han cumplido los objetivos propuestos al inicio de este trabajo.

Para realizar este estudio, se ha dividido el mismo en tres partes: en primer lugar se analizarán los motores equipados con rotores de chapas en sus diversas versiones. Para realizar estos análisis tendremos en cuenta todas las respuestas obtenidas (eléctrica, magnética, térmica y mecánica) buscando el prototipo que presente un mejor equilibrio entre las mismas.

Una vez hallados él o los prototipos con rotores de chapas con mejores resultados, será el momento de comparar estos motores con los motores equipados con rotores de jaula de ardilla y macizo con aros. En este punto es importante destacar que el motor con rotor macizo con aros, como era de esperar, ha obtenido mejores resultados que su homólogo sin aros, siendo por tanto el que se comparará con el motor propuesto en esta tesis. La comparación con el motor con rotor de jaula es obvia, ya que es el motor convencional al que intentamos mejorar en algunos de sus regímenes o funcionamientos particulares.

Finalmente se destacaran otros aspectos considerados importantes y que aun sin estar propuestos de antemano en este trabajo, han ido surgiendo a lo largo de la realización de la tesis.

9.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LOS MOTORES CON ROTORES DE CHAPAS

El análisis de los diversos resultados obtenidos para las versiones del motor con rotor de chapas, nos permitirá escoger la mejor entre ellas, o quizás, obtener más de un motor adecuado para usos diferentes.

La forma de proceder pasa en primer lugar por analizar los valores eléctricos y magnéticos, para posteriormente centrarnos en los valores térmicos y mecánicos de los diferentes modelos. Pero antes de todo, cabe recordar las características constructivas de los distintos rotores de chapas.

En la siguiente tabla, se resumen las características más representativas de los rotores de chapas construidos. Sólo se indican las características más importantes, remitiéndose al lector al capítulo III, para obtener información sobre el resto de los datos referentes a los mismos. Así por ejemplo, el rotor de chapas tipo *A*, y tipo *E*, aparentemente son iguales en la siguiente tabla, estribando su diferencia en la curvatura de las chapas que es diferente en los dos modelos como se indica en la figura 9.1.

Rotor	N° chapas	Espesor chapas	Aislamiento Chapas	Pérdidas Eléctricas	Acabado superficial chapas	Unión eje	Eje rotor	Anillos chapas	Entrehierro	Equilibrado 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 0.94W/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 5.8W/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	1.35 W/kg a 1T 2.8 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 IX.I Características principales de los rotores de chapas construidos.

La información resumen dada en la tabla anterior no estaría completa si no dispusiéramos de una figura con las curvaturas de las chapas de cada rotor construido.

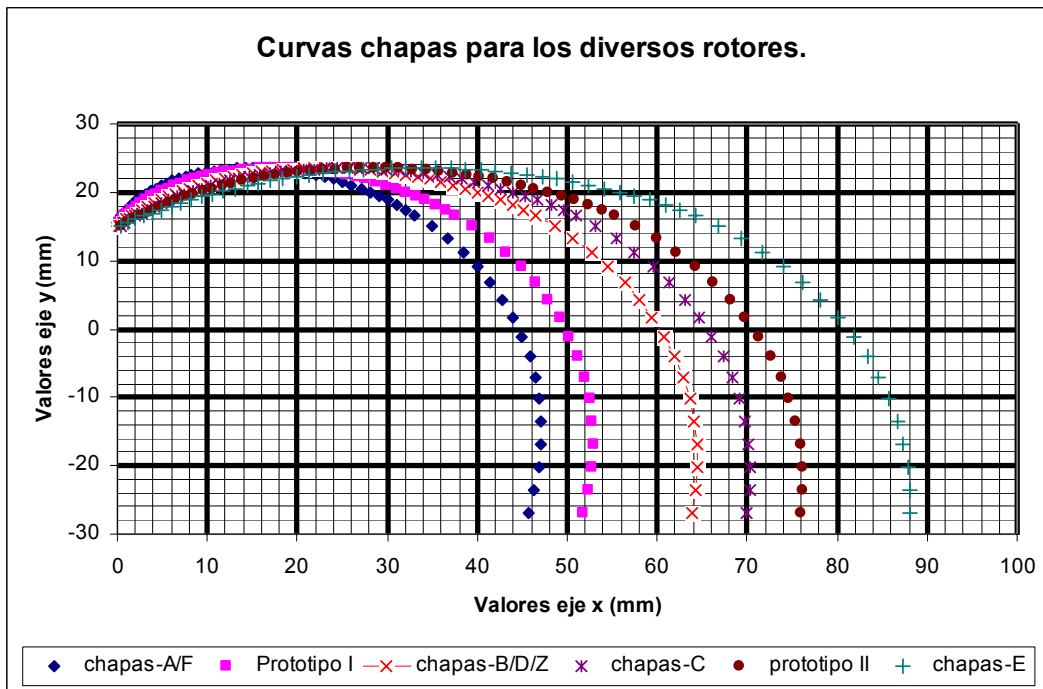


Figura 9.1. Curvaturas de las chapas en los diversos rotores de chapas construidos.

Y de las ecuaciones empíricas que representan a estas curvaturas:

- **Rotor chapas-A-F**

$$y = -7 \cdot 10^{-8} x^6 + 8 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0004 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1677 x^2 + 1.7178 x + 15.609 \quad [9.1]$$

- **Rotor chapas-B-D-Z**

$$y = -3 \cdot 10^{-8} x^6 + 5 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0003 x^4 + 0.0104 x^3 - 0.1685 x^2 + 1.6257 x + 14.294 \quad [9.2]$$

- **Rotor chapas-C**

$$y = -2 \cdot 10^{-8} x^6 + 3 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0002 x^4 + 0.0081 x^3 - 0.143 x^2 + 1.4944 x + 14.075 \quad [9.3]$$

- **Rotor chapas-E**

$$y = -4 \cdot 10^{-9} x^6 + 9 \cdot 10^{-7} x^5 - 8 \cdot 10^{-5} x^4 + 0.0035 x^3 - 0.076 x^2 + 1.051 x + 14.073 \quad [9.4]$$

- **Prototipo I**

$$y = -7 \cdot 10^{-8} x^6 + 1 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0005 x^4 + 0.0135 x^3 - 0.1973 x^2 + 1.7873 x + 14.951 \quad [9.5]$$

- **Prototipo II.**

$$y = -1 \cdot 10^{-8} x^6 + 2 \cdot 10^{-6} x^5 - 0.0002 x^4 + 0.0061 x^3 - 0.1163 x^2 + 1.3281 x + 14.081 \quad [9.6]$$

Una vez recordadas las características principales, las curvas y las ecuaciones que definen a los diversos rotores de chapas construidos, analizaremos los resultados obtenidos con los mismos.

9.2.1 ANÁLISIS ELÉCTRICO DE LOS MOTORES CON ROTOR DE CHAPAS

En primer lugar se analizarán las características eléctricas halladas al realizar los ensayos experimentales. Estos ensayos se realizaron en su gran mayoría por duplicado, manteniendo las constantes de temperatura y humedad del laboratorio dentro de un estrecho margen. En concreto los valores extremos al realizar los ensayos fueron para la temperatura de 20°C hasta los 24°C, mientras que los valores de humedad relativa ambiental variaron entre un 60% y un 75%.

Con estas medidas adoptadas, se consideran válidos los resultados obtenidos mediante estos ensayos, siendo más significativos que las simulaciones realizadas tanto con programas de elementos finitos como mediante el control vectorial. No debemos olvidar que los programas de simulación, por lo menos los actuales, no permiten tener en consideración todas las variables que puedan afectar al funcionamiento de un motor, y por tanto aunque de gran ayuda, no pueden sustituir los resultados experimentales.

Realizadas estas aclaraciones, vamos a analizar los resultados hallados en el laboratorio, y para ello vamos a empezar con las gráficas que nos presentan la evolución con respecto a la velocidad de algunas de las magnitudes eléctricas más importantes referidas al estator de 3000 rpm que es el régimen con el cual se han obtenido mejores resultados para el motor de chapas analizado.

En cada gráfica se representan a los siete rotores de chapas construidos y que han funcionado, lo que permite una más cómoda comparación entre los mismos.

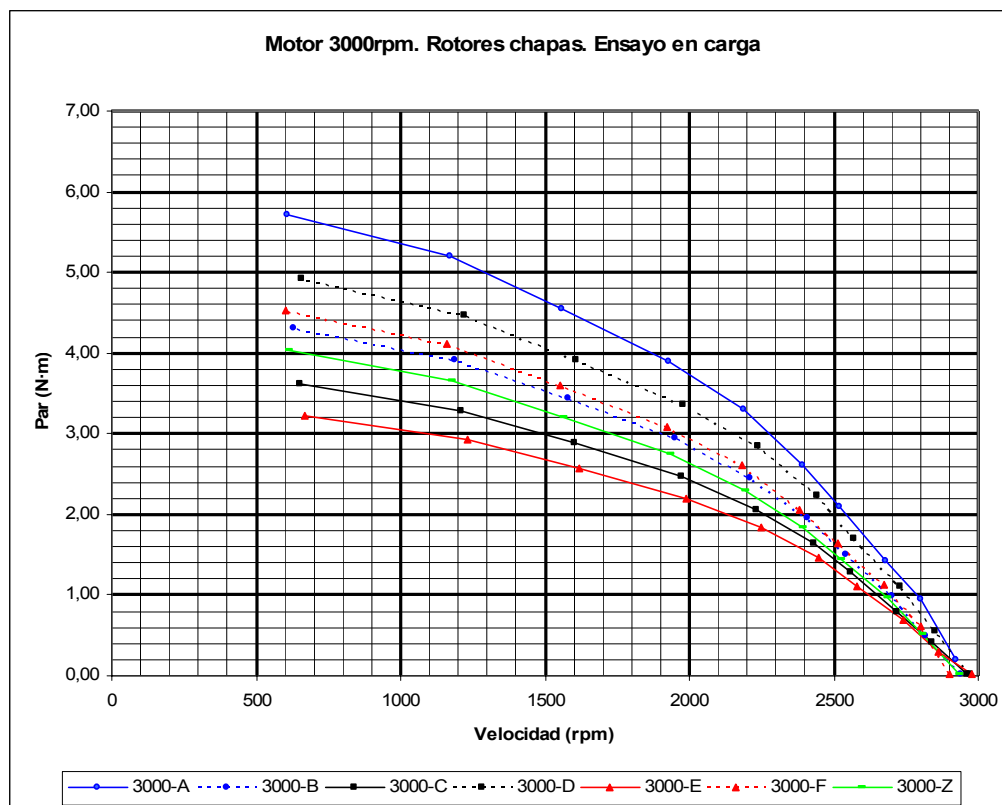


Figura 9.2. Variación del par con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas.

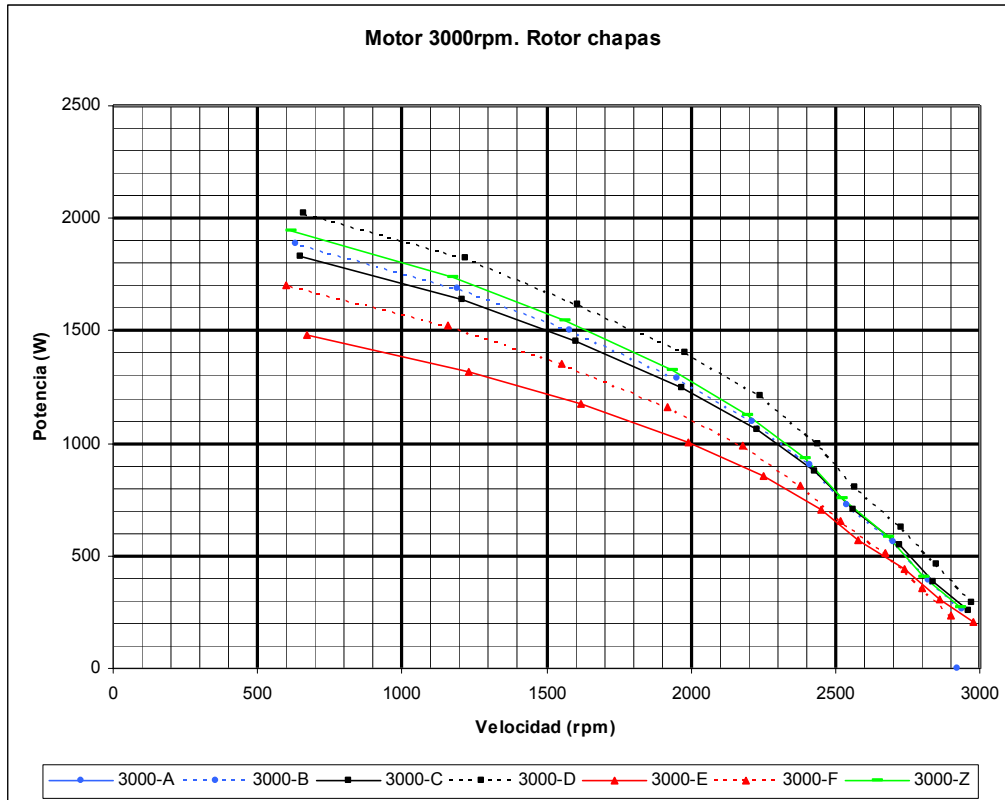


Figura 9.3. Variación de la potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas.

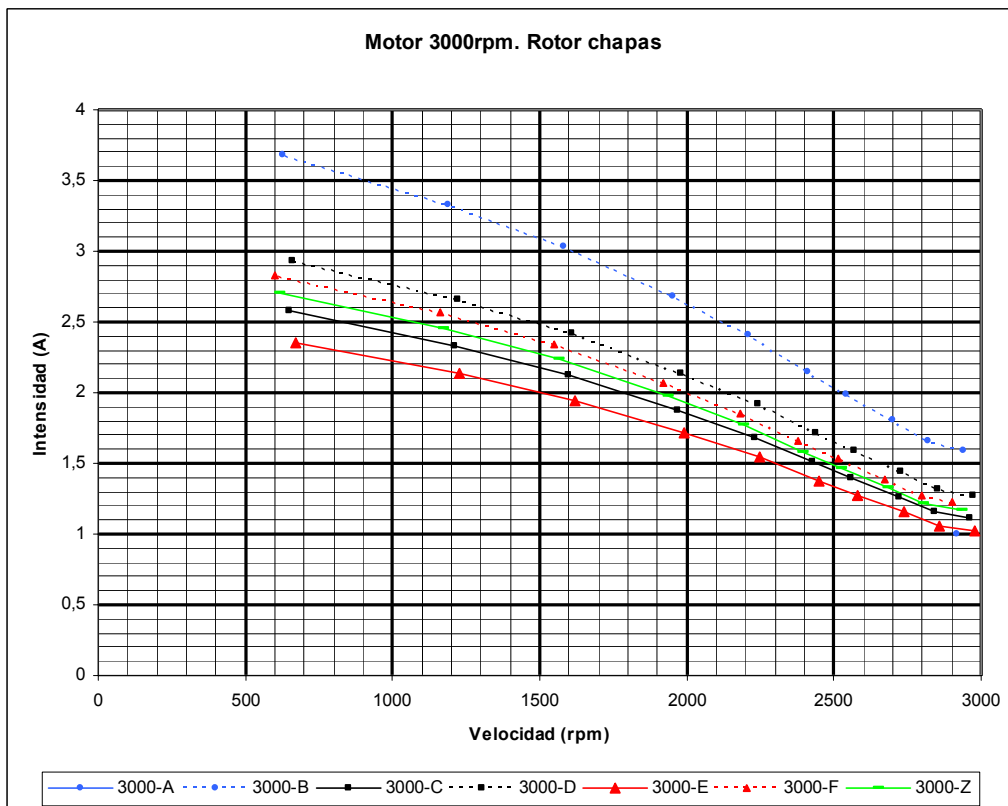


Figura 9.4. Variación de la intensidad con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas.

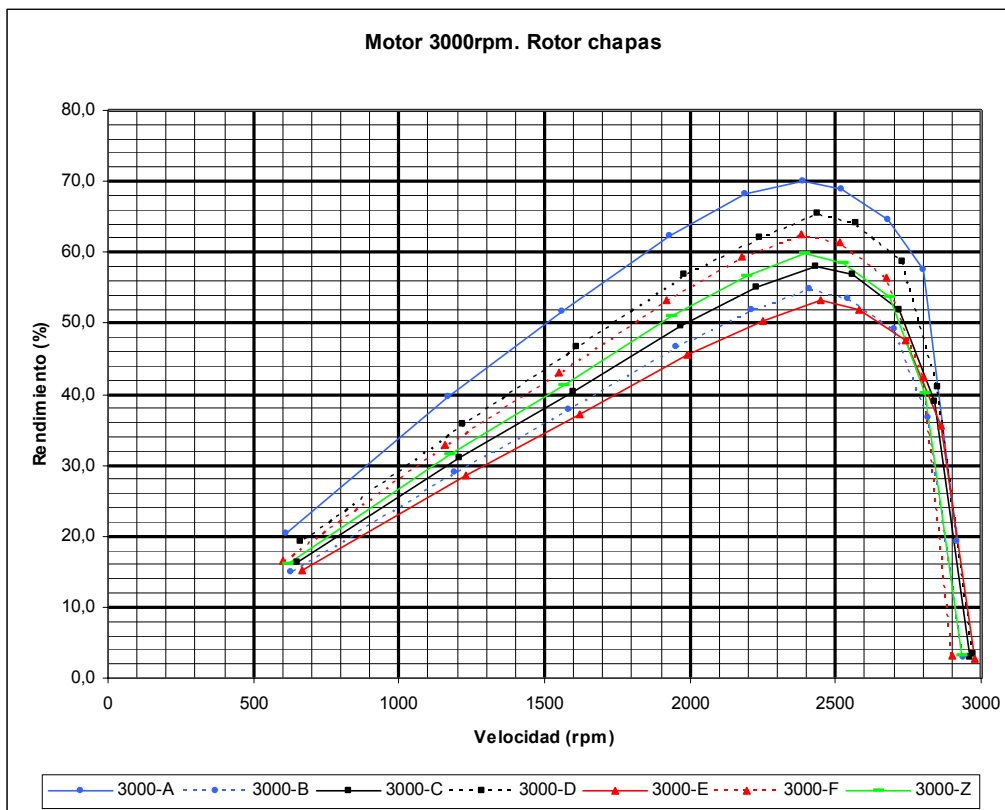


Figura 9.5. Variação do rendimento com a velocidade em el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas

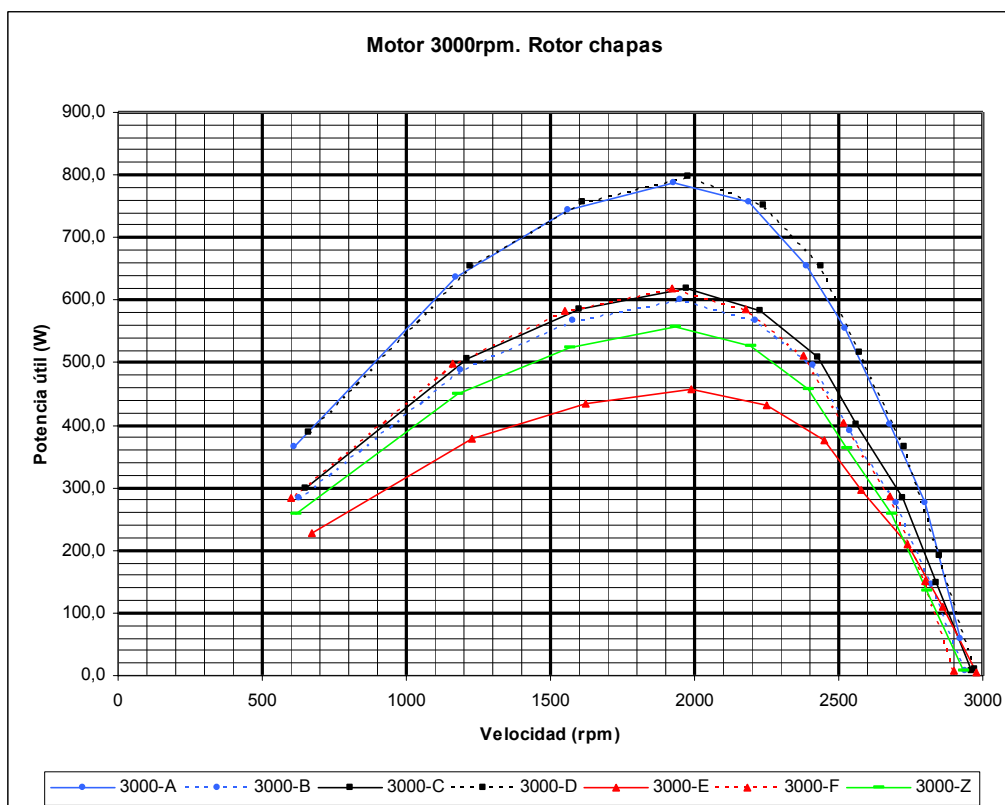


Figura 9.6. Variação de la potencia útil con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas

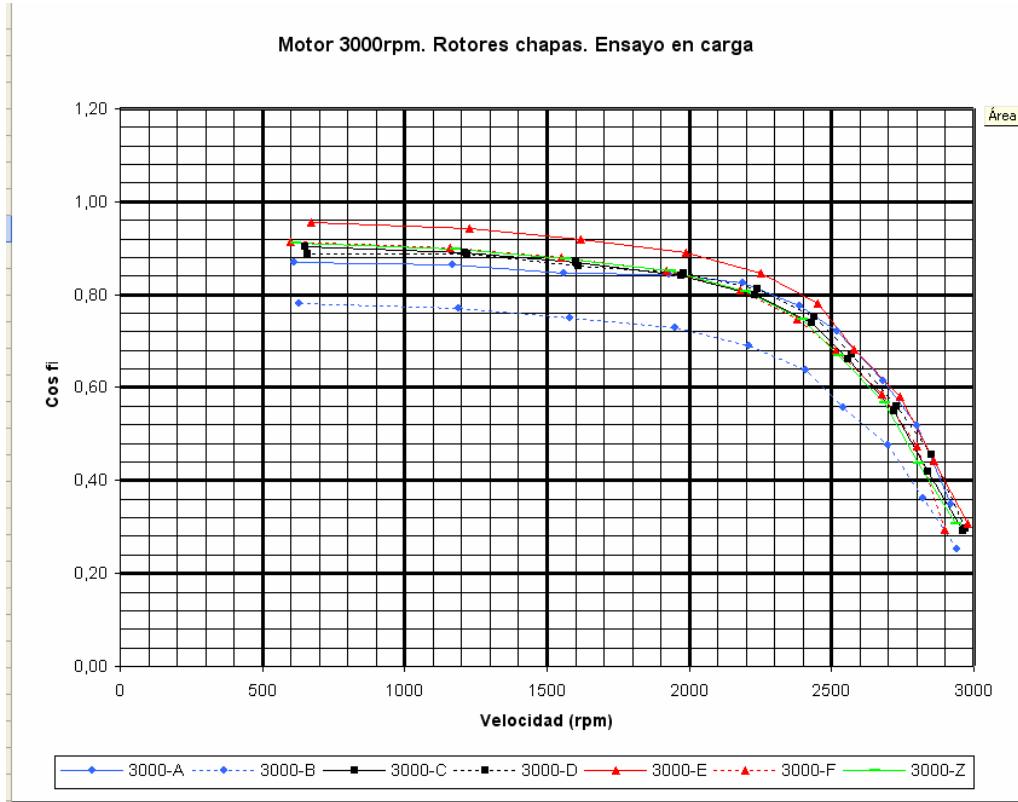


Figura 9.7. Variación del factor de potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas

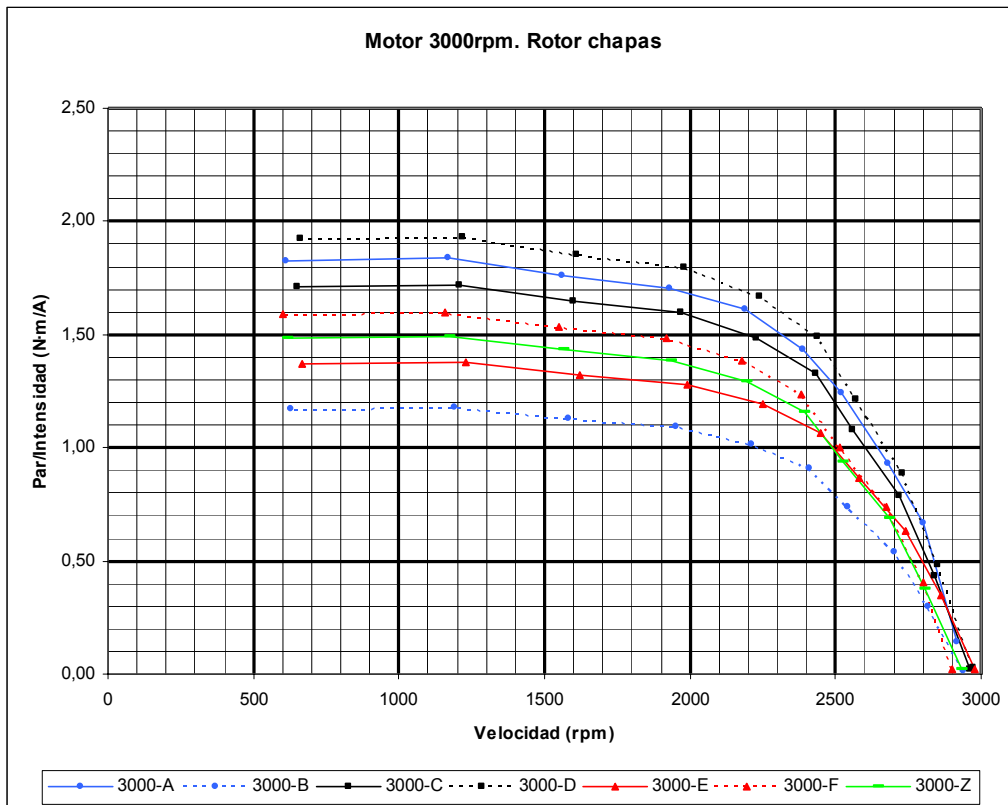


Figura 9.8. Variación del par/intensidad con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores de chapas

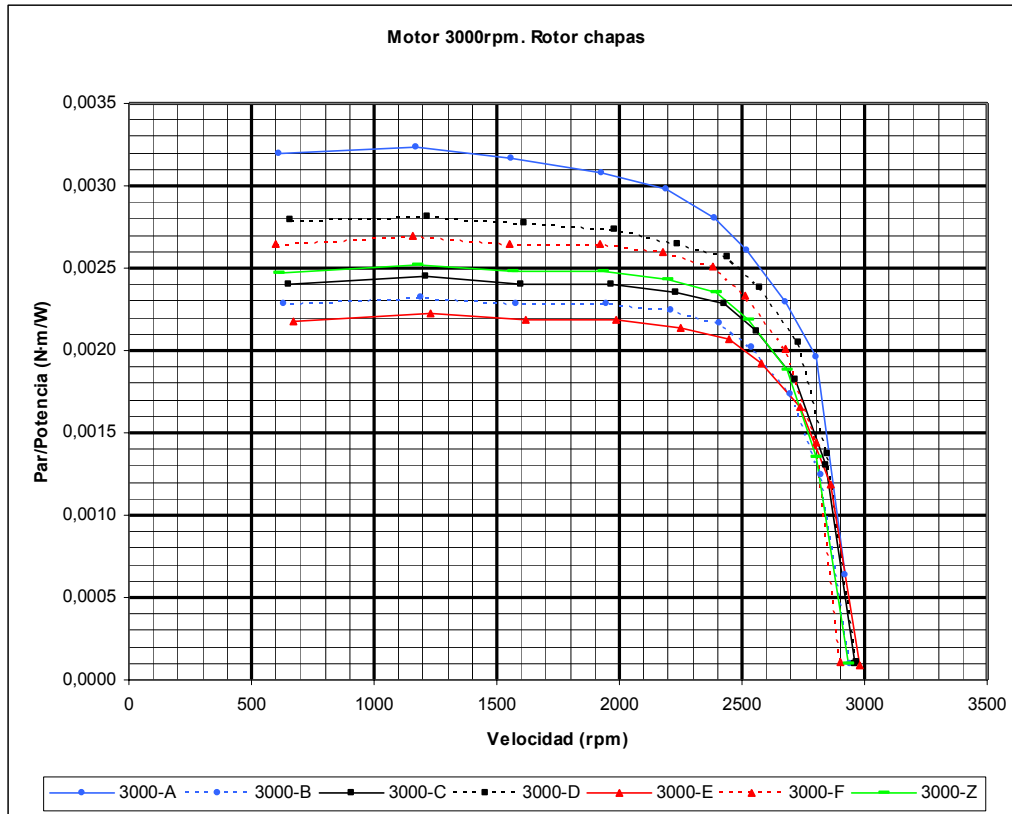


Figura 9.9. Variación del par/potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con rotores de chapas

En las gráficas (figuras) precedentes se observa que el motor con rotor de chapas tipo *A*, desbanca en la mayor parte de las magnitudes eléctricas al resto de los motores de chapas, siendo por tanto el mejor situado para cumplir los objetivos. Una rápida visualización de las gráficas permite confirmar estos buenos resultados, pero vamos a realizar una breve comparación entre ellos (de los cuatro modelos con mejores resultados). Para ello se han confeccionado unas tablas y gráficas en las cuales se toman como valores de referencia para las magnitudes eléctricas las proporcionadas por el motor de chapas tipo *A*.

Motores a 3000 rpm. Par (N·m)					Motores a 3000 rpm. Par (% respecto chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	6,00	5,20	4,80	4,23	0	100	86,7	80,0	81,3
500	5,80	5,00	4,59	4,08	500	100	86,2	79,1	81,6
1000	5,40	4,65	4,27	3,82	1000	100	86,1	79,1	82,2
1500	4,60	4,10	3,68	3,27	1500	100	89,1	80,0	79,8
2000	3,70	3,30	2,98	2,67	2000	100	89,2	80,5	80,9
2500	2,20	2,02	1,69	1,51	2500	100	91,8	76,8	74,8
2750	1,20	1,00	0,80	0,65	2750	100	83,3	66,7	65,0
3000	0,20	0,10	0,10	0,10	3000	100	50,0	50,0	50,0
Motores a 3000 rpm. Potencia (W)					Motores a 3000 rpm. Potencia (% respecto chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	2000	1830	1820	1750	0	100	91,5	91,0	95,6
500	1800	1750	1720	1655	500	100	97,2	95,6	94,6
1000	1600	1620	1580	1520	1000	100	101,3	98,8	93,8
1500	1400	1430	1380	1320	1500	100	102,1	98,6	92,3
2000	1200	1170	1110	1070	2000	100	97,5	92,5	91,5
2500	800	760	700	675	2500	100	95,0	87,5	88,8
2750	550	520	510	470	2750	100	94,5	92,7	90,4
3000	200	205	204	202	3000	100	102,5	102,0	101,0

Tabla IX.II. Comparativa entre diversos motores de chapas. Valores de par y potencia en carga.

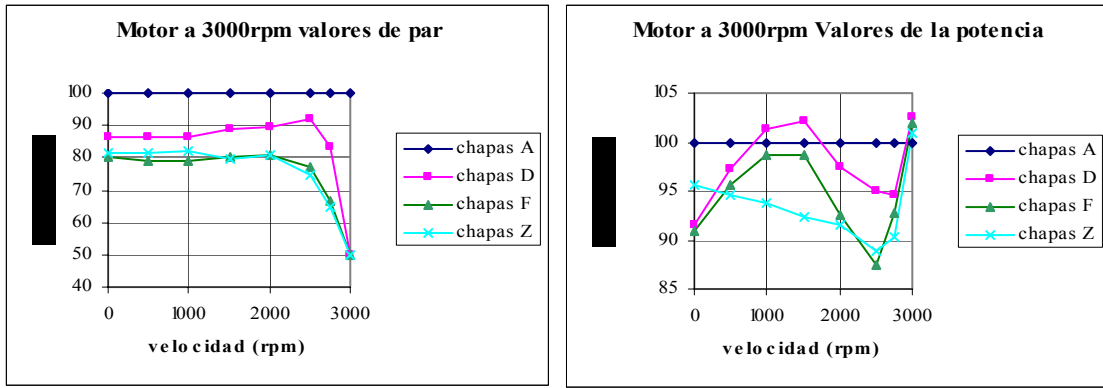


Figura 9.10. Comparativa motores de chapas. Evolución del par y la potencia en carga.

Motores a 3000 rpm. Intensidad (A)					Motores a 3000 rpm. Intensid (% respecto chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	3,600	3,200	3,000	2,860	0	100	88,9	83,3	89,4
500	3,200	3,020	2,880	2,750	500	100	94,4	90,0	91,1
1000	3,000	2,770	2,650	2,550	1000	100	92,3	88,3	92,1
1500	2,600	2,500	2,370	2,370	1500	100	96,2	91,2	94,8
2000	2,200	2,210	2,010	1,930	2000	100	100,5	91,4	87,3
2500	1,700	1,660	1,540	1,470	2500	100	97,6	90,6	88,6
2750	1,400	1,420	1,320	1,260	2750	100	101,4	94,3	88,7
3000	1,200	1,260	1,180	1,150	3000	100	105,0	98,3	95,8
Motores a 3000 rpm. Rendimiento (%)					Motores a 3000 rpm. Rendimien (% resp. Chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	4,00	3,80	3,50	3,60	0	100	95,0	87,5	94,7
500	17,00	15,00	14,00	12,90	500	100	88,2	82,4	86,0
1000	34,00	30,10	28,30	26,30	1000	100	88,5	83,2	87,4
1500	50,00	45,00	41,90	39,00	1500	100	90,0	83,8	86,7
2000	63,00	59,10	56,20	52,20	2000	100	93,8	89,2	88,3
2500	68,00	66,10	63,10	58,60	2500	100	97,2	92,8	88,7
2750	60,00	56,50	51,50	51,10	2750	100	94,2	85,8	90,4
3000	20,00	18,00	15,00	16,00	3000	100	90,0	75,0	80,0

Tabla IX.III. Comparativa entre motores de chapas. Valores de la intensidad y el rendimiento.

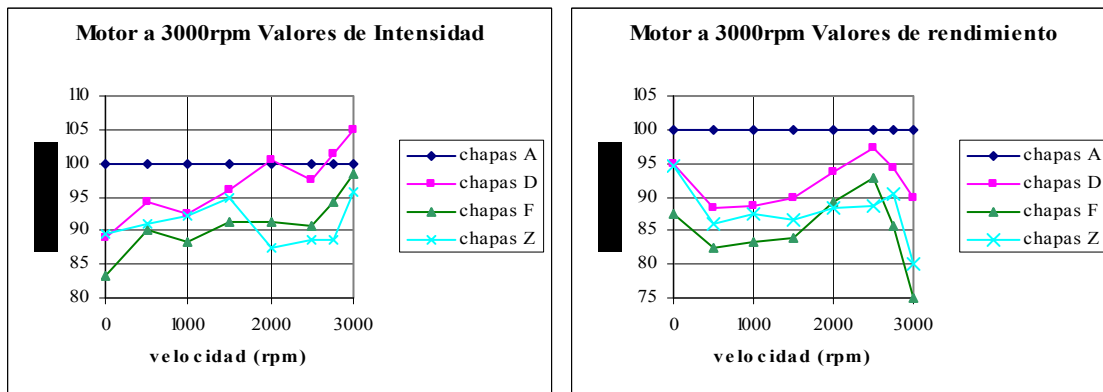


Figura 9.11. Comparativa motores de chapas. Evolución de la intensidad y el rendimiento.

Finalmente, aunque no sean magnitudes eléctricas propiamente dichas, se ofrecen las relaciones entre el par y la intensidad, y entre el par y la potencia, ya que sus respuestas son una de las bases de estos motores de chapas.

Motores a 3000 rpm. Par/Intensidad (N·m/A)					Motores a 3000 rpm. Par/Inten (% resp. Chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	1,82	1,63	1,60	1,48	0	100	89,6	87,9	90,8
500	1,81	1,66	1,59	1,49	500	100	91,7	87,8	89,8
1000	1,80	1,68	1,61	1,50	1000	100	93,3	89,4	89,3
1500	1,76	1,64	1,55	1,44	1500	100	93,2	88,1	87,8
2000	1,68	1,56	1,48	1,38	2000	100	92,9	88,1	88,5
2500	1,25	1,22	1,10	1,01	2500	100	97,6	88,0	82,8
2750	0,76	0,70	0,61	0,59	2750	100	92,1	80,3	84,3
3000	0,20	0,02	0,02	0,02	3000	100	10,0	10,0	10,0
Motores a 3000 rpm. Par/potencia (N·m/W)					Motores a 3000 rpm. Par/potenc (% resp. Chapas A)				
n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z	n (rpm)	chapas A	chapas D	chapas F	chapas Z
0	0,0032	0,0028	0,0026	0,0024	0	100	87,5	81,3	85,7
500	0,0032	0,0029	0,0027	0,0025	500	100	90,6	84,4	86,2
1000	0,0032	0,0029	0,0027	0,0025	1000	100	92,1	85,7	86,2
1500	0,0031	0,0029	0,0027	0,0025	1500	100	93,5	87,1	86,2
2000	0,0030	0,0028	0,0027	0,0025	2000	100	93,3	90,0	89,3
2500	0,0026	0,0025	0,0024	0,0022	2500	100	96,2	92,3	88,0
2750	0,0021	0,0020	0,0018	0,0018	2750	100	95,2	85,7	90,0
3000	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	3000	100	50,0	50,0	50,0

Tabla IX.IV. Comparativa motores de chapas. Valores de par/intensidad y par/potencia.

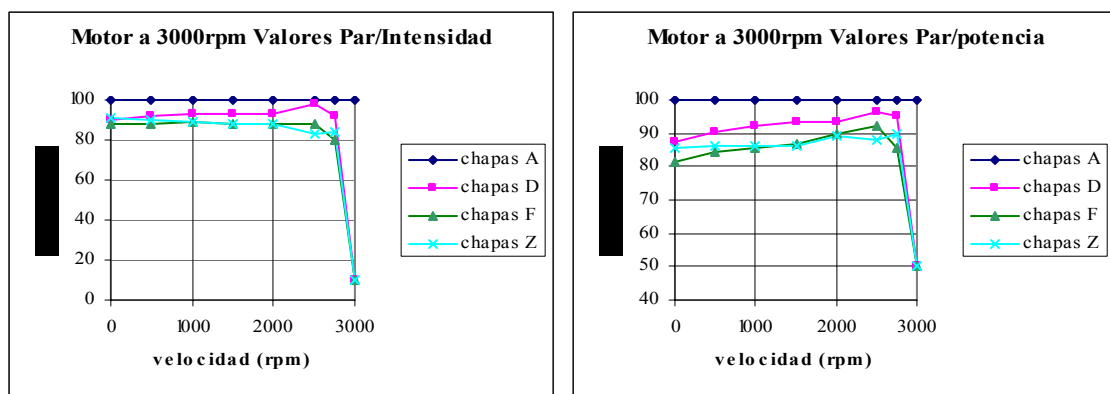


Figura 9.12. Comparativa motores de chapas. Evolución del par/intensidad y par/potencia.

De las figuras anteriores (figuras 9.10-9.12) podemos apreciar que el par es siempre mayor en el motor de chapas tipo *A* (un 20% mayor en promedio), que en los restantes motores de chapas (ventaja para el rotor *A*), incluso a partir de las 2500 rpm se nota que el resto de motores sufren un descenso en el valor del par. En cuanto a la potencia e intensidad, también el motor de chapas tipo *A*, muestra unos valores mayores (desventaja para el rotor *A*), pero estos excesos no representan más del 6% en la potencia y del 10% en la intensidad. De forma que visualizando el rendimiento (dependiente de las dos magnitudes anteriores) se aprecia que el rotor con mejores resultados sigue siendo el tipo *A*, debido a su buena respuesta en el par que compensa los valores no tan buenos que presenta con la intensidad y la potencia.

Las dos últimas gráficas (par/intensidad y par/potencia) confirman este hecho, destacando el motor de chapas tipo *A*, que esta por encima del resto de motores, especialmente en el último tramo de funcionamiento ya que en el resto es un 10% mayor.

En todos los modelos de chapas, el rendimiento es alto pero está desplazado hacia velocidades bajas (unas 2650-2750 rpm), mientras que en motores con rotor macizo el rendimiento se alcanza a más régimen de velocidad (2800 rpm) aunque sus valores absolutos son menores. Finalmente, son los motores de jaula de ardilla los que alcanzan valores más elevados de rendimiento, pero también la velocidad de giro a la que se alcanza este rendimiento es más elevada (2950 rpm).

9.2.1.1 Resultados eléctricos en carga para motor de chapas tipo A

Una vez analizados eléctricamente los diversos rotores de chapas y comprobado que el rotor con mejores resultados es el del tipo A, se presentan a continuación los valores obtenidos con este rotor A, a diversas velocidades, lo cual nos permitirá analizar su comportamiento en conjunto.

Se presentan ocho gráficas (las tablas y resto de gráficas pueden hallarse en los anexos), con las características eléctricas más relevantes, las cuales a continuación se describen y analizan brevemente considerando conjuntamente las magnitudes de potencia, intensidad y par.

La curva del par indica que el régimen donde se alcanza el valor máximo es con el motor de 1500 rpm, el cual se eleva unos 12.6 N·m. El par alcanzado por el motor a 3000 rpm es inferior (6.8 N·m) y similar al del motor de 1000 rpm pero presentando una pendiente menos pronunciada. El motor a 1500-A rpm presenta un par de 8.6 N·m.

Por su parte, la potencia sigue unas pautas parecidas, siendo el motor con el mayor consumo el modelo de 1500 rpm (2225 W), seguido de cerca por el motor a 3000 rpm (2100 W). Correspondiéndoles a los motores de 1500-A rpm y 1000 rpm valores inferiores (1400 W y 1150 W respectivamente).

Respecto al parámetro de la intensidad, ésta es mayor en el motor de 1500 rpm (4.35 A) seguido por el motor a 3000 rpm (3.15 A), y como en las magnitudes anteriores, los valores de la intensidad de los motores de 1500-A y 1000 rpm resultan inferiores (2.6 A y 2.5 A respectivamente).

Estas tres magnitudes pueden resumirse en la gráfica del rendimiento, la cual muestra que el motor que consigue el mejor rendimiento es el motor a 3000 rpm (70%) seguido del motor a 1500-A rpm (65%) y ya por debajo están los motores a 1500 rpm (57%) y 1000 rpm (28%).

Si analizamos estas cuatro primeras gráficas observamos que aunque el par es mayor en el motor de 1500 rpm, al tener este motor un mayor consumo de potencia y de intensidad en proporción a su homólogo de 3000 rpm, permite que este último lo sobrepase en un 13% cuando consideramos su rendimiento. Incluso el motor a 1500-A rpm sobrepasa a su compañero de 1500 rpm, aún presentando valores de par muy inferiores, debido principalmente a un consumo muy moderado de intensidad gracias a un mayor número de espiras por ranura. El motor con peores prestaciones es el de 1000 rpm, el cual arroja valores de rendimiento despreciables en la utilización práctica de los motores.

Si ahora analizamos las cuatro últimas gráficas se confirma el liderazgo del motor a 3000 rpm. Concretamente, la potencia útil (par por velocidad angular) se eleva sustancialmente en este modelo (920 W), dejando al motor de 1500 rpm muy por debajo de estos valores (525 W). En esta ocasión vuelve a destacar el motor a 1500-A rpm que con prácticamente 800 W, se coloca cerca del motor a 3000 rpm. Finalmente, el motor a 1000 rpm sigue siendo el modelo más precario.

La gráfica correspondiente al factor de potencia nos determina valores elevados para el motor a 3000 rpm (0.95), estando el resto de los motores alrededor del 0.8-0.85.

Las dos últimas gráficas nos indican dos parámetros interesantes, la relación par/intensidad y par/potencia. Lo que interesa en esta ocasión son valores altos de estas relaciones lo que indica que el par obtenido respecto a la intensidad o potencia consumidas es grande. En esta relación los motores de 1500 rpm, 1500-A rpm y 1000 rpm son los mejor parados (un 50% mayor) como les corresponde por su elevado par y baja intensidad, manteniéndose en una posición más discreta el motor a 3000 rpm (valores de 2.1 frente a 3.2 en par/intensidad y valores de 0.0031 frente a 0.006 en par/potencia)

Estas gráficas se corresponden al modelo de rotor de chapas A, pero en los anexos puede comprobarse que con el resto de rotores de chapas construidos se siguen manteniendo estas pendientes y formas parecidas, destacando el motor a 3000 rpm como el más equilibrado si analizamos todos los datos en conjunto, siendo este el motivo por lo cual ha sido el analizado en este capítulo.

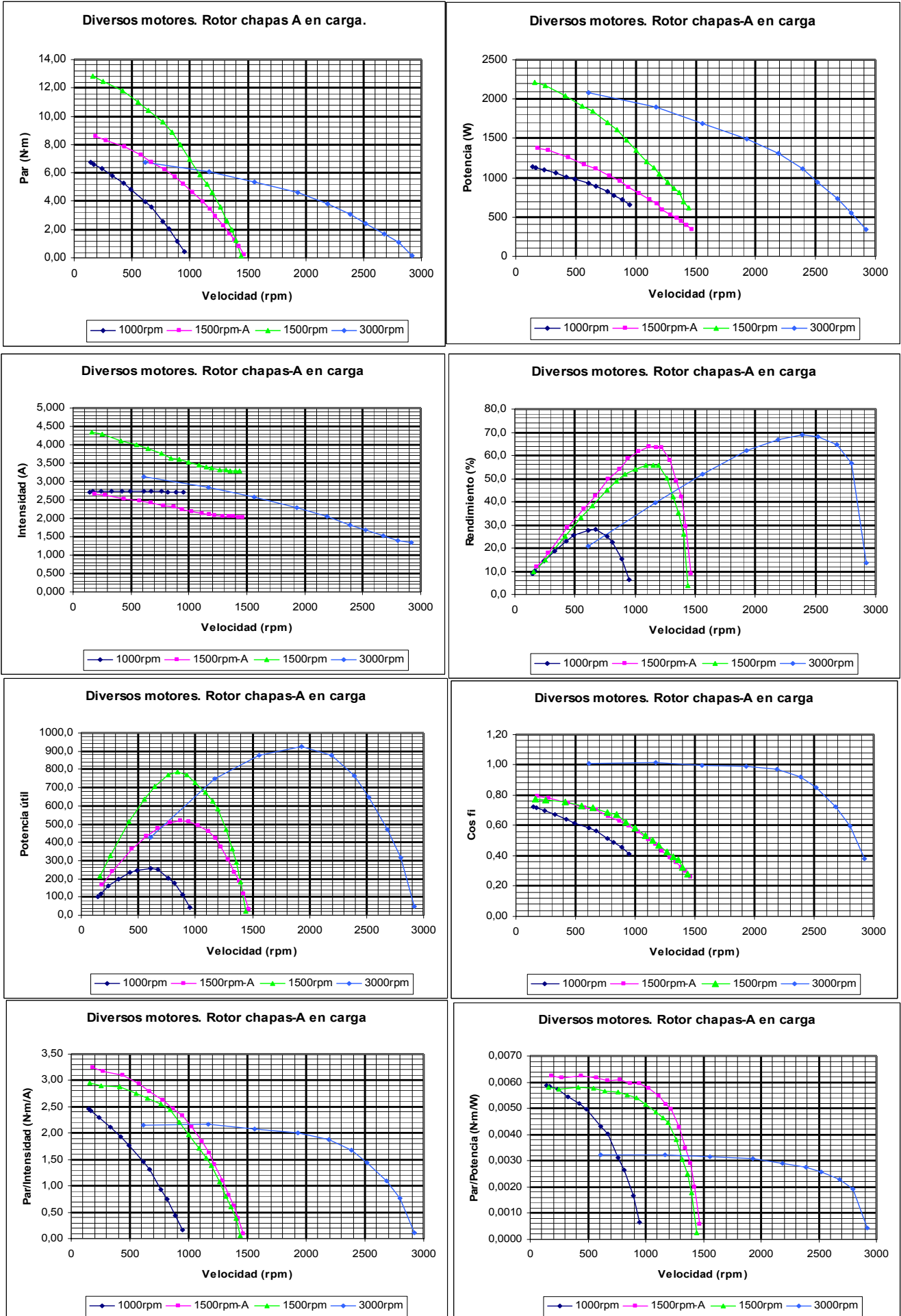


Figura 9.13. Características eléctricas del motor de chapas A, para diversas velocidades.

9.2.1.2 Resultados eléctricos con convertidor de frecuencia para motor de chapas tipo A

Como complemento a las gráficas eléctricas para el motor con rotor de chapas tipo A, con 3000 rpm, en las figuras siguientes se muestran una serie de magnitudes a diferentes frecuencias. Cabe resaltar que por motivos de seguridad, con los motores a 3000 rpm sólo se han alcanzado los 50 Hz, superándose en regímenes inferiores los 70 Hz. Añadir finalmente que como en apartados anteriores se exponen y comentan brevemente sólo una parte de las gráficas hallándose el resto, junto con las tablas, en los volúmenes de los anexos.

Como es lógico al aumentar la frecuencia, aumentan la mayoría de las magnitudes eléctricas, aunque en el caso del par se observa que el incremento es lineal para las frecuencias de 20, 30 y 40 Hz, notándose una disminución de este incremento al alcanzarse los 50 Hz. Concretamente los valores de par máximo respectivos para estas frecuencias son: 3.2, 3.8, 5.4 y 5.7 N·m.

En el caso de la potencia consumida su aumento con la frecuencia es más constante, así podemos cuantificar que para el mismo rango de frecuencias (20, 30, 40 y 50 Hz), los valores máximos de potencia consumida son: 500, 850, 1500, y 1825 W, observándose una progresión prácticamente lineal.

Por su parte para la intensidad, el aumento más significativo se observa entre los 30 Hz (2.1 A) y 40 Hz (2.8 A) mientras que desde esta frecuencia hasta los 50 Hz se produce un pequeño decremento (2.75 A). Los valores a 20 Hz son los más discretos (1.9 A).

Comparando y recogiendo los datos de estas tres primeras gráficas, se observa en la cuarta gráfica la evolución del rendimiento el cual aumenta de forma prácticamente lineal con la frecuencia. Así para el mismo rango de frecuencias (20, 30, 40 y 50 Hz), los valores máximos del rendimiento son: 42, 56, 65 y 70 %, respectivamente. Lo que nos permite aventurar que este motor se moverá mejor, como se comprobará a posteriori, con frecuencias elevadas.

En la gráfica de las potencias útiles se repite prácticamente los efectos anteriores. Así la elevación de la potencia útil en función de la frecuencia es constante y prácticamente lineal, obteniéndose para el mismo rango de frecuencias respectivamente los valores de: 140, 300, 540, y 750 W. Incluso entre las frecuencias de 40 y 50 Hz se observa un repunte de esta potencia útil.

En la gráfica dedicada al factor de potencia, las diferencias son menores, dándose valores máximos para todas las frecuencias próximos al 0.95. No obstante, las pendientes que presentan estas evoluciones del factor de potencia son diferentes, observándose una mayor estabilidad a 50 Hz.

Las gráficas que representan las relaciones par/intensidad y par/potencia, como es natural el proceso se mantiene o incluso se invierte. Así para la relación par/intensidad la variación de la frecuencia prácticamente no se nota elevándose discretamente la relación desde un 1.7, hasta un 2.05 considerando todo el intervalo de frecuencias. Por su parte, para la relación par/potencia, la evolución es incluso decreciente pasándose de un 0.0062 a 20 Hz, a los 0.0030 a 50 Hz. Este fenómeno ocurre al observarse un repunte de la potencia pérdida cuando las frecuencias son elevadas, mientras que el par aumenta de forma mucho más discreta.

Finalmente, se presentan cuatro gráficas quizás no tan importantes, pero que han permitido ver la evolución de algunas magnitudes eléctricas en función de la tensión en los ensayos de vacío y cortocircuito realizados para en conjunto de los motores de chapas. Concretamente, se observa en el ensayo de vacío la evolución de la potencia e intensidad absorbida en función de la tensión, viendo las posiciones aventajadas del motor con rotor de chapas tipo A. Caso análogo ocurre con el ensayo de cortocircuito en el cual se han representado el par y la potencia en función de la tensión. En este caso, también destaca el buen comportamiento del motor con rotor de chapas tipo A, aunque no es tan palpable como en el ensayo de vacío.

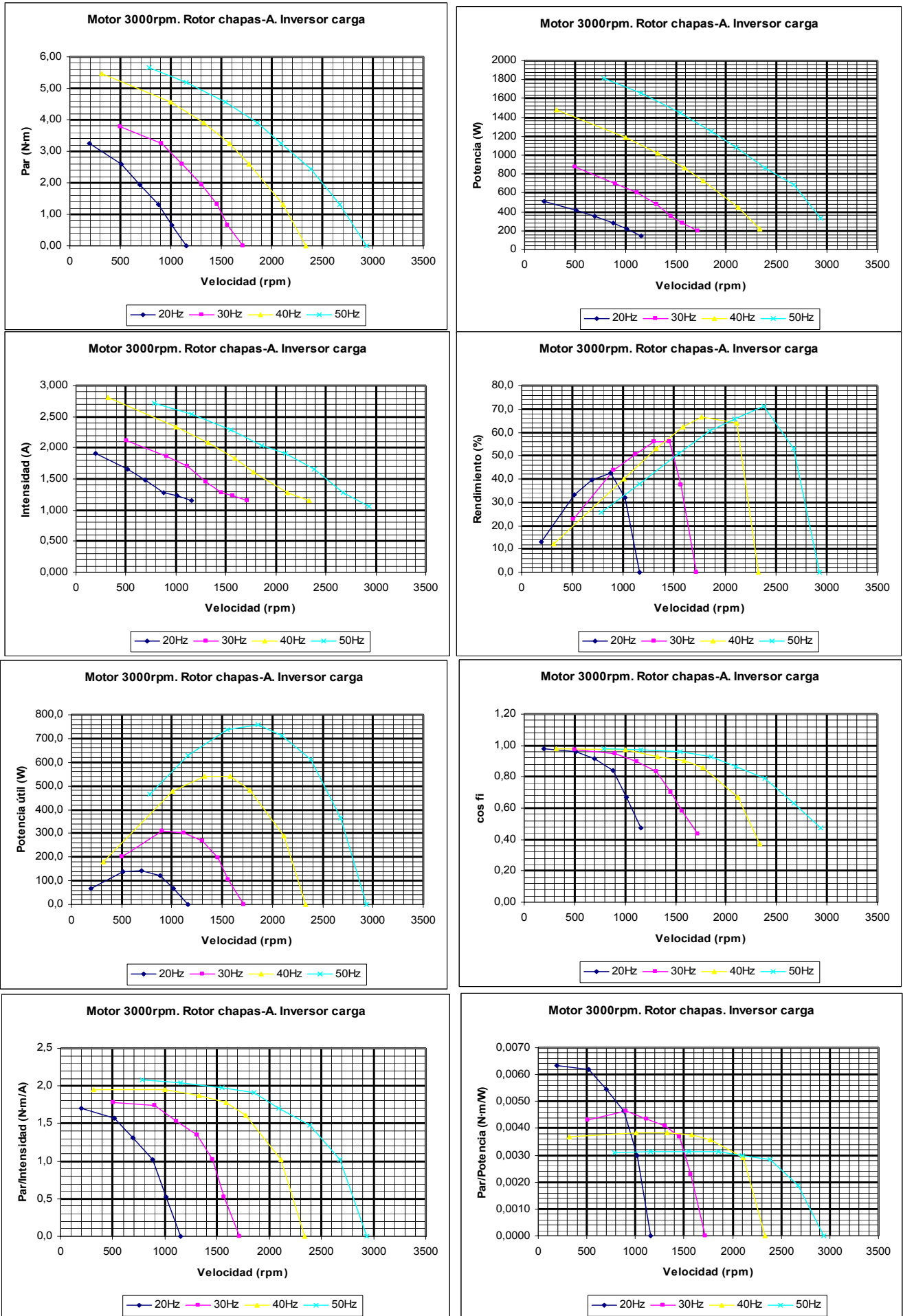


Figura 9.14. Valores de magnitudes eléctricas en carga con convertidor de frecuencia para el motor con rotor de chapas tipo A.

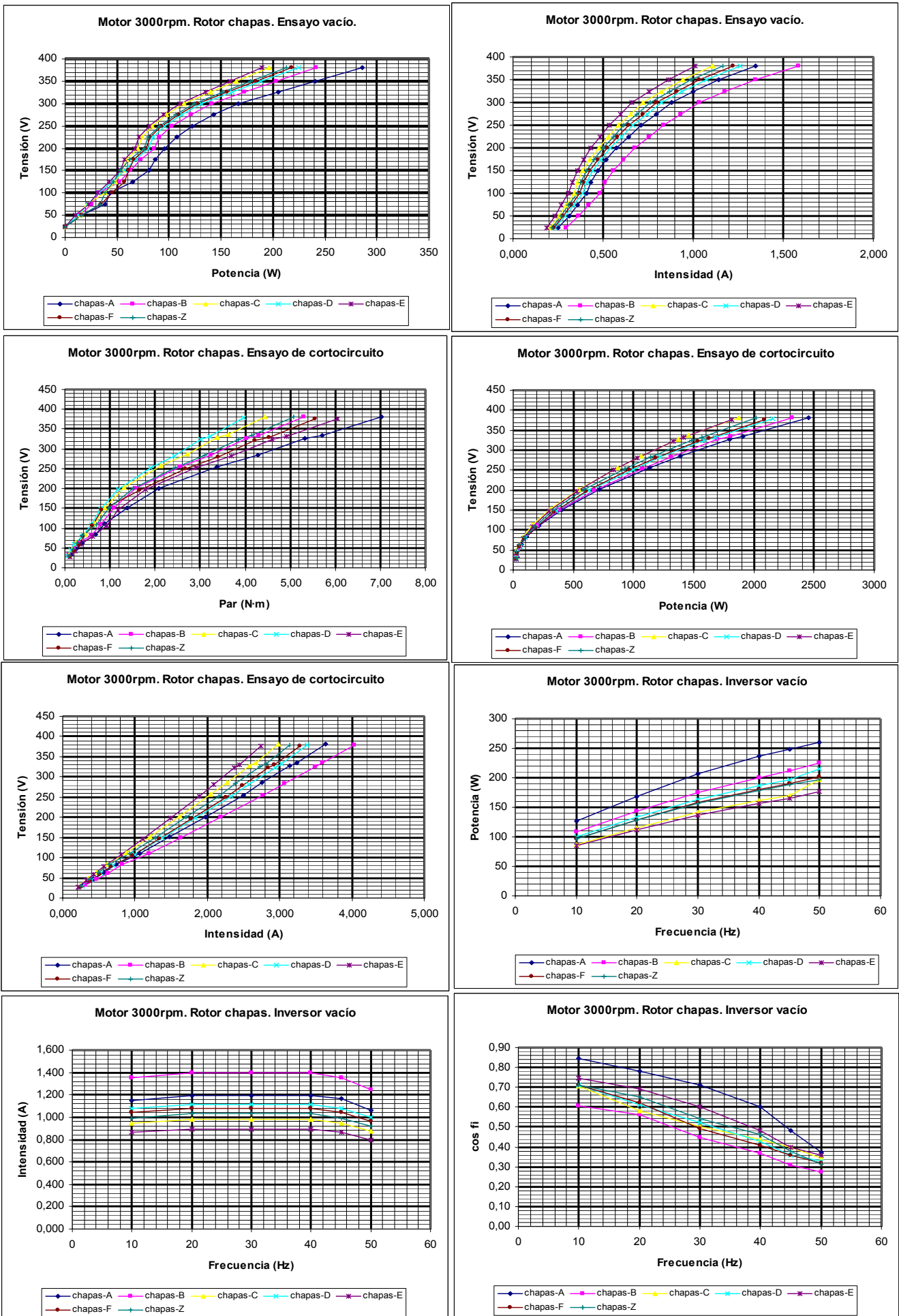


Figura 9.15. Valores de magnitudes eléctricas en vacío y cortocircuito para el motor con rotor de chapas tipo A.

9.2.2 ANÁLISIS MAGNÉTICO DE LOS MOTORES CON ROTOR DE CHAPAS

Para realizar este estudio vamos a dividir en tres grandes grupos los rotores de chapas construidos. Un primer grupo lo constituyen los rotores *Z*, *D* y *B*, ya que en realidad es el mismo rotor pero modificado con sucesivos mecanizados de su superficie.

Un segundo grupo estará formado por los rotores *A*, *E*, y *F*, que aun siendo rotores diferentes sólo se diferencian por la curvatura de las chapas (modelo *E*) y en su acabado superficial, o por incorporar un tercer anillo (*F*). Finalmente el tercer grupo esta formado por el modelo *C*, el cual dispone de otro tipo de chapa, curvatura y anillos de cobre.

9.2.2.1 Motores con rotor de chapas en espiral tipos *B*, *D* y *Z*

Vamos a iniciar el estudio por orden cronológico de construcción de los rotores. Así el primer rotor construido fue el tipo *Z*, en este caso se optó por un tipo de chapa de escasa calidad, y de reducido espesor (0.35 mm, con 215 chapas), asimismo, no se mecanizó su superficie. El modelo que le siguió fue el tipo *D*, en el cual se le practicó un mecanizado superficial mínimo que prácticamente no modificó la distancia del entrehierro pero permitió que éste fuera constante, y finalmente, con un segundo mecanizado del modelo *D*, que aumento su entrehierro se obtuvo el modelo *B*.

A priori, con las pruebas realizadas en estos tres modelos, más las simulaciones efectuadas con el programa FEMM, nos debe permitir conocer la influencia que sobre las magnitudes electromagnéticas introduce la variación del entrehierro, aparte del efecto del aire y de las arista que producen los bordes de las chapas del modelo *Z*, ya que las otras características del rotor permanecen inalterables.

9.2.2.1.1 Efecto de la variación del entrehierro

El efecto de la variación del entrehierro se ha cuantificado analizando con el programa FEMM el rotor tipo *D*, al cual se le ha modificado el entrehierro en varias fases. También se recogen los datos obtenidos de forma experimental de uno de los prototipos que se mecanizó en cuatro ocasiones para comprobar el efecto de este factor. Cabe indicar que dicho prototipo disponía del mismo tipo de chapas y configuración que el modelo *D*, siendo su fin el demostrar precisamente la influencia del entrehierro en el funcionamiento del motor.

En la siguiente tabla (con $B_{\text{máx}}$ en teslas), los valores del 100% indican un entrehierro de 0.3 mm (considerado el valor estándar), mientras que el valor de 1000% indica un entrehierro diez veces mayor (3 mm). Por el contrario el 50% indica un entrehierro la mitad del normal (0.15 mm).

P=4000		c=3		Simulado		P=4000		c=3		Experimental	
% entrehi	T (N·m)	B máx		% entrehi	T (N·m)	B máx		% entrehi	T (N·m)	B máx	
1000	0,03	0,13		1000	0,04	0,16		1000	0,04	0,16	
666	0,04	0,14		666	0,06	0,18		666	0,06	0,18	
333	0,19	0,27		333	0,28	0,32		333	0,28	0,32	
200	0,39	0,45		200	0,50	0,48		200	0,50	0,48	
143	0,60	0,61		143	0,65	0,60		143	0,65	0,60	
111	0,79	0,73		111	0,73	0,70		111	0,73	0,70	
100	0,89	0,79		100	0,80	0,72		100	0,80	0,72	
83	1,06	0,88		83	0,90	0,80		83	0,90	0,80	
71	1,22	0,98		71	1,10	0,85		71	1,10	0,85	
62	1,36	1,05		62	1,20	0,94		62	1,20	0,94	
55	1,49	1,11		55	1,30	1,01		55	1,30	1,01	
50	1,61	1,18		50	1,40	1,08		50	1,40	1,08	

Tabla IX.V. Variación del par y de la inducción máxima en el entrehierro en función del espesor del entrehierro.

Si graficamos estos valores, se observa la evolución del par y de la inducción máxima en el entrehierro en función del propio espesor del entrehierro.

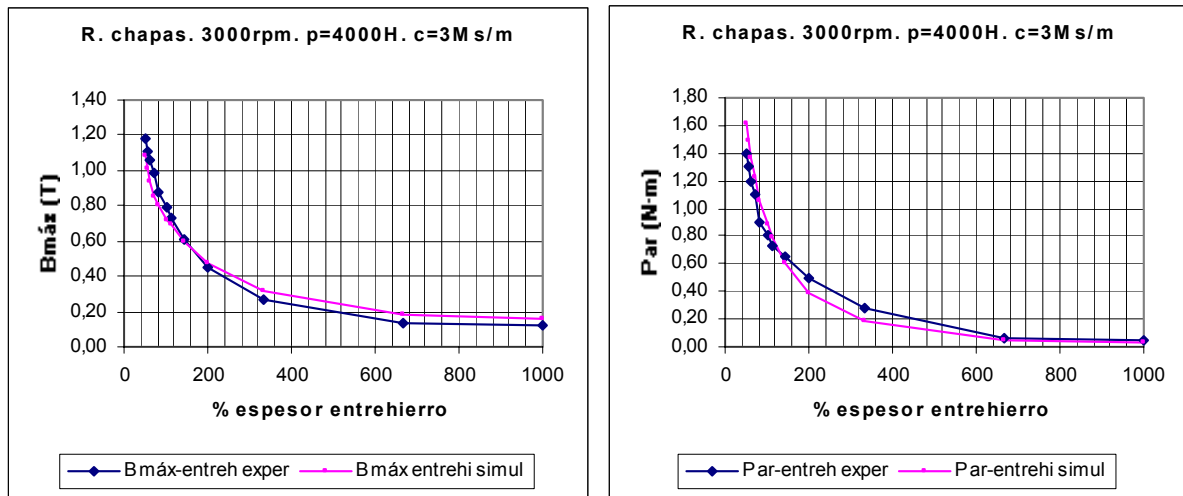


Figura 9.16. Evolución del par y de la inducción máxima en el entrehierro en función de su espesor.

Se comprueba que el margen de error entre los valores experimentales y los valores simulados es pequeño. Considerándose válidas las gráficas experimentales podemos aproximar la evolución del par y la inducción, en función de las siguientes expresiones donde e_e , es el espesor en % del entrehierro.

$$T = 424.83 \cdot e_e^{-1.3653} \quad [9.7]$$

$$B_{máx-entreh} = 29.367 \cdot e_e^{-0.80} \quad [9.8]$$

Se aprecia que a medida que el entrehierro aumenta, disminuye el valor de la inducción y del par siguiendo unas curvas potenciales dadas por las anteriores expresiones.

En cuanto a la profundidad que alcanzan las líneas de campo dependiendo del espesor del entrehierro, las siguientes figuras extraídas del programa FEMM para unos cuantos espesores representativos, nos indican que prácticamente no tiene efecto sobre las mismas. Pero en cambio si tiene efecto sobre la distorsión del campo magnético total, la cual aumenta a medida que disminuye el entrehierro.

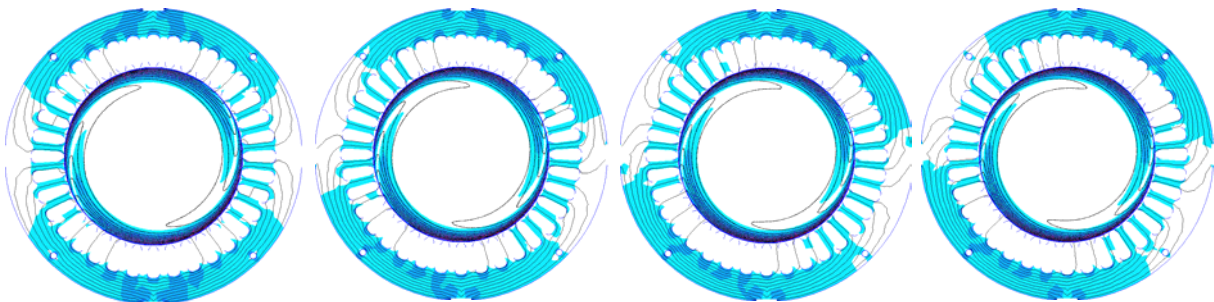


Figura 9.17. Campo magnético en el motor a 3000 rpm con rotor de chapas-A. con $\mu_r=4000$, y $c=3MS/m$. De izquierda a derecha y de arriba abajo: $c=1000\%$, $c=111\%$, $c=71\%$ y $c=50\%$.

Si cuantificamos esta distorsión del campo magnético neto total en función del espesor del entrehierro para unas cuantas simulaciones obtendremos la siguiente tabla y gráfica, tomándose como valor de referencia de la distorsión (0°) al valor de 1000% del entrehierro, es decir a un valor del entrehierro diez veces mayor que su valor nominal (0.3mm).

variación % espesor entrehierro	chapas A
	variación ángulo Bmax
1000	0,00
500	1,00
200	2,00
111	3,25
100	3,50
71	4,50
50	6,00

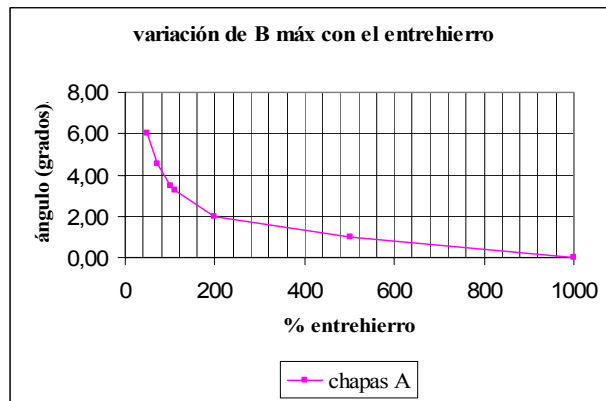


Figura 9.18. Tabla y gráfica con la variación del campo magnético total en función del entrehierro.

Asimismo, esta variación puede cuantificarse mediante una expresión del siguiente tipo:

$$\text{variación ángulo} = -1.8422 \cdot \ln(e_e) + 13.343 \text{ grados} \quad [9.9]$$

Donde e_e , es la variación del entrehierro en %.

En nuestro caso, y para comprobar resultados, recordamos que el rotor D , dispone de un entrehierro de 0.30-0.31 mm, mientras que en el rotor B , el entrehierro aumenta hasta los 0.36-0.37 mm, lo que representa sobre el valor estándar de 0.30 mm (100%) un 102% y un 122% aproximadamente. Por tanto y aplicando las fórmulas [9.7] y [9.8] tendremos para los dos rotores:

$$T_D = 424.83 \cdot e_e^{-1.3653} = 424.83 \cdot (102)^{-1.3653} = 0.77 \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{Experimental } T_D = 0.79 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$T_B = 424.83 \cdot e_e^{-1.3653} = 424.83 \cdot (122)^{-1.3653} = 0.61 \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{Experimental } T_B = 0.62 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$B_{\text{máx-entrehierro-D}} = 29.367 \cdot e_e^{-0.80} = 29.367 \cdot (102)^{-0.80} = 0.73 \text{ T} \quad \text{Experimental } T_D = 0.76 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$B_{\text{máx-entrehierro-B}} = 29.367 \cdot e_e^{-0.80} = 29.367 \cdot (122)^{-0.80} = 0.63 \text{ T} \quad \text{Experimental } T_D = 0.66 \text{ N}\cdot\text{m}$$

El desplazamiento en grados debido a la variación del entrehierro de estos dos motores lo hallaremos aplicando la ecuación [9.9] y comparándolos con los resultados obtenidos por simulación.

$$\text{variación ángulo} - D = -1.8422 \cdot \ln(e_e) + 13.343 = -1.8422 \cdot \ln(102) + 13.343 = 4.82^\circ$$

$$\text{variación ángulo} - B = -1.8422 \cdot \ln(e_e) + 13.343 = -1.8422 \cdot \ln(122) + 13.343 = 4.49^\circ$$

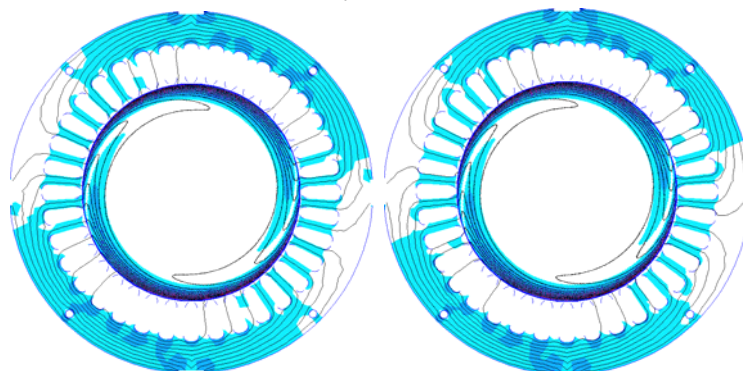


Figura 9.19 Campo magnético en el motor a 3000rpm con rotores de chapas D ($c=111\%$) y B ($c=71\%$)

9.2.2.1.2 Efecto del mecanizado sobre los rotores de chapas (efecto aristas)

De estos tres modelos de rotor cabe extraer otra conclusión: ¿cómo afectará las aristas de las chapas al comportamiento del motor cuando el rotor no está mecanizado? No es fácil responder a esta pregunta ya que existe un efecto magnético y un efecto del aire que, aunque de forma tenue, altera los resultados eléctricos obtenidos con motores no mecanizados superficialmente.

Pero vayamos por partes: en primer lugar las aristas de las chapas provocan que el entrehierro no sea constante, introduciendo modificaciones del campo magnético en el entrehierro y debilitando el campo magnético neto total. Para describir y cuantificar este efecto se han realizado tres series de simulaciones para tres permeabilidades relativas de las chapas (4000, 8000 y 25000). En cada una de estas series se ha variado la conductividad, obteniéndose dos curvas para el par y la inducción máxima en el entrehierro, una con los rotores sin mecanizar (con aristas) y otra con el rotor mecanizado (sin aristas). Para las tres curvas, se entiende por mecanizado, al mínimo rebaje exigido para eliminar las aristas dejando el entrehierro constante.

Comparación rotor con y sin aristas

Motor chapas a 3000rpm			Motor chapas a 3000rpm		
f=3,33Hz	p=4000H	normal	f=3,33Hz	p=4000H	con aristas
c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)
1	0,706	0,83	1	0,657	0,75
3	0,887	0,79	3	0,780	0,70
5	0,933	0,71	5	0,821	0,64
7	0,943	0,64	7	0,838	0,61
10	0,936	0,57	10	0,842	0,57
12	0,928	0,53	12	0,845	0,54
15	0,906	0,50	15	0,831	0,52
20	0,880	0,48	20	0,820	0,48
25	0,841	0,46	25	0,789	0,46
30	0,816	0,45	30	0,773	0,45
35	0,784	0,43	35	0,748	0,43
50	0,717	0,39	50	0,693	0,38

Comparación rotor con y sin aristas

Motor chapas a 3000rpm			Motor chapas a 3000rpm		
f=3,33Hz	p=8000H	normal	f=3,33Hz	p=8000H	con aristas
c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)
1	0,601	0,84	1	0,598	0,78
3	0,811	0,82	3	0,729	0,73
5	0,888	0,79	5	0,787	0,70
7	0,924	0,75	7	0,819	0,66
10	0,946	0,70	10	0,845	0,61
12	0,950	0,65	12	0,856	0,58
15	0,948	0,61	15	0,858	0,55
20	0,940	0,56	20	0,856	0,52
25	0,915	0,52	25	0,847	0,49
30	0,894	0,49	30	0,835	0,48
35	0,873	0,47	35	0,821	0,46
50	0,805	0,42	50	0,778	0,41

Comparación rotor con y sin aristas

Motor chapas a 3000rpm			Motor chapas a 3000rpm		
f=3,33Hz	p=25000H	normal	f=3,33Hz	p=25000H	con aristas
c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)
1	0,466	0,98	1	0,524	0,82
3	0,683	0,89	3	0,652	0,79
5	0,789	0,84	5	0,722	0,75
7	0,853	0,80	7	0,769	0,72
10	0,911	0,77	10	0,817	0,68
12	0,935	0,73	12	0,840	0,65
15	0,958	0,70	15	0,861	0,61
20	0,974	0,65	20	0,884	0,57
25	0,977	0,61	25	0,893	0,53
30	0,971	0,59	30	0,895	0,50
35	0,962	0,56	35	0,893	0,48
50	0,924	0,52	50	0,871	0,46

Tabla IX.VI. Valores del par y la inducción máxima en el entrehierro obtenidas de forma experimental y por simulación para el rotor con permeabilidades relativas de 4000, 8000 y 25000.

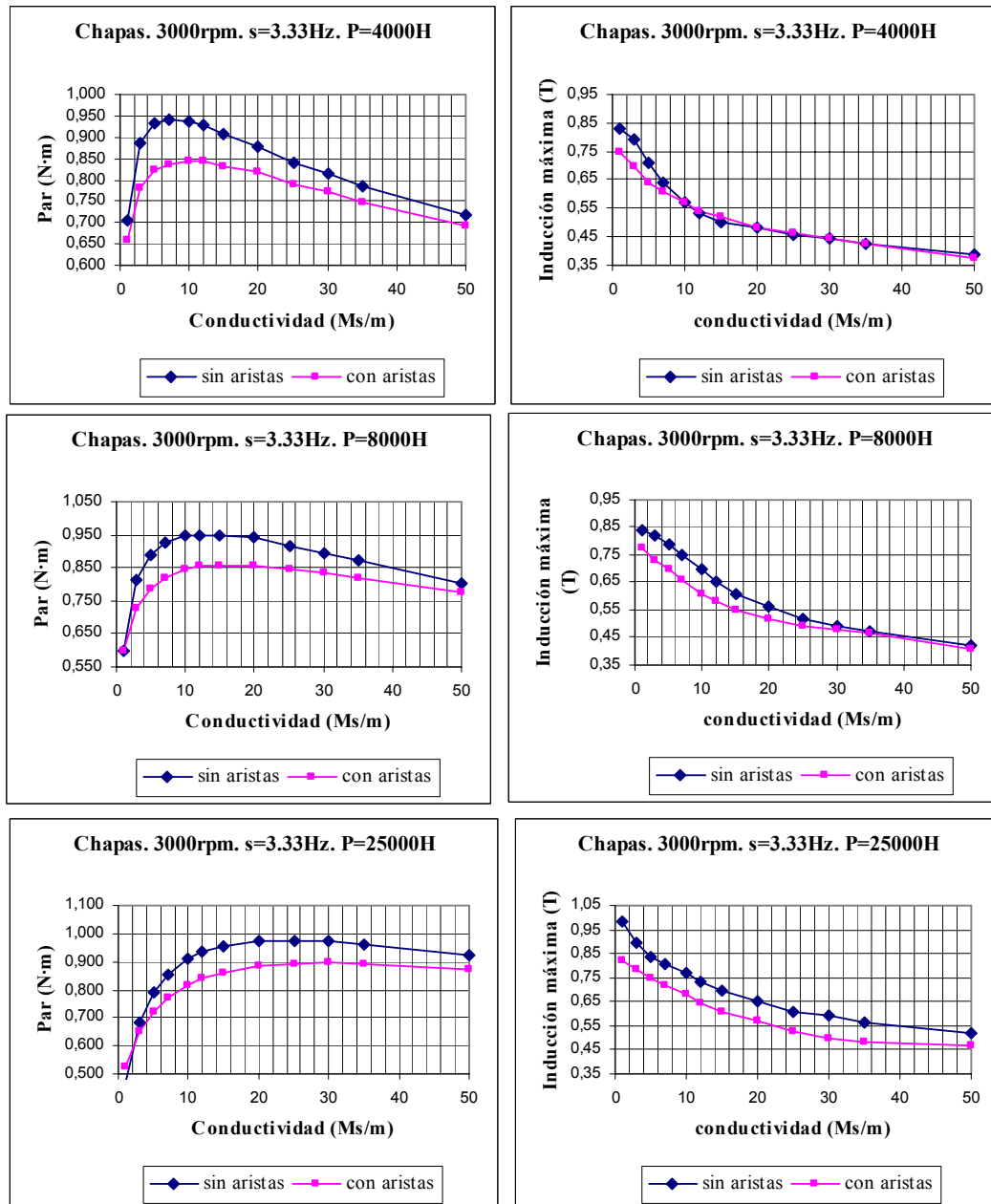


Figura 9.20. Comparación entre el par y la inducción máxima en el entrehierro obtenidas de forma experimental y por simulación para el rotor con permeabilidades relativas de 4000, 8000 y 25000.

Se observa que el par es siempre mayor cuando el rotor está mecanizado, que sin mecanizar. Podemos cuantificar, en tanto por ciento, la diferencia entre el par del rotor de aristas con respecto al rotor mecanizado para cada una de las tres permeabilidades analizadas y para cada una de las conductividades.

De la figura 9.21 se desprende que a medida que se aumenta la permeabilidad de las chapas, en conjunto, los valores del error porcentual son mayores. En cambio con permeabilidades de orden inferior la diferencia de los valores del par se mantiene en valores moderados.

Podemos concluir que la diferencia de par que introduce el mecanizado de los rotores es del orden del 10% como máximo, estando su valor promedio situado en un 6.52%. Este efecto, aunque a tener en consideración, no representan una modificación sustancial del par.

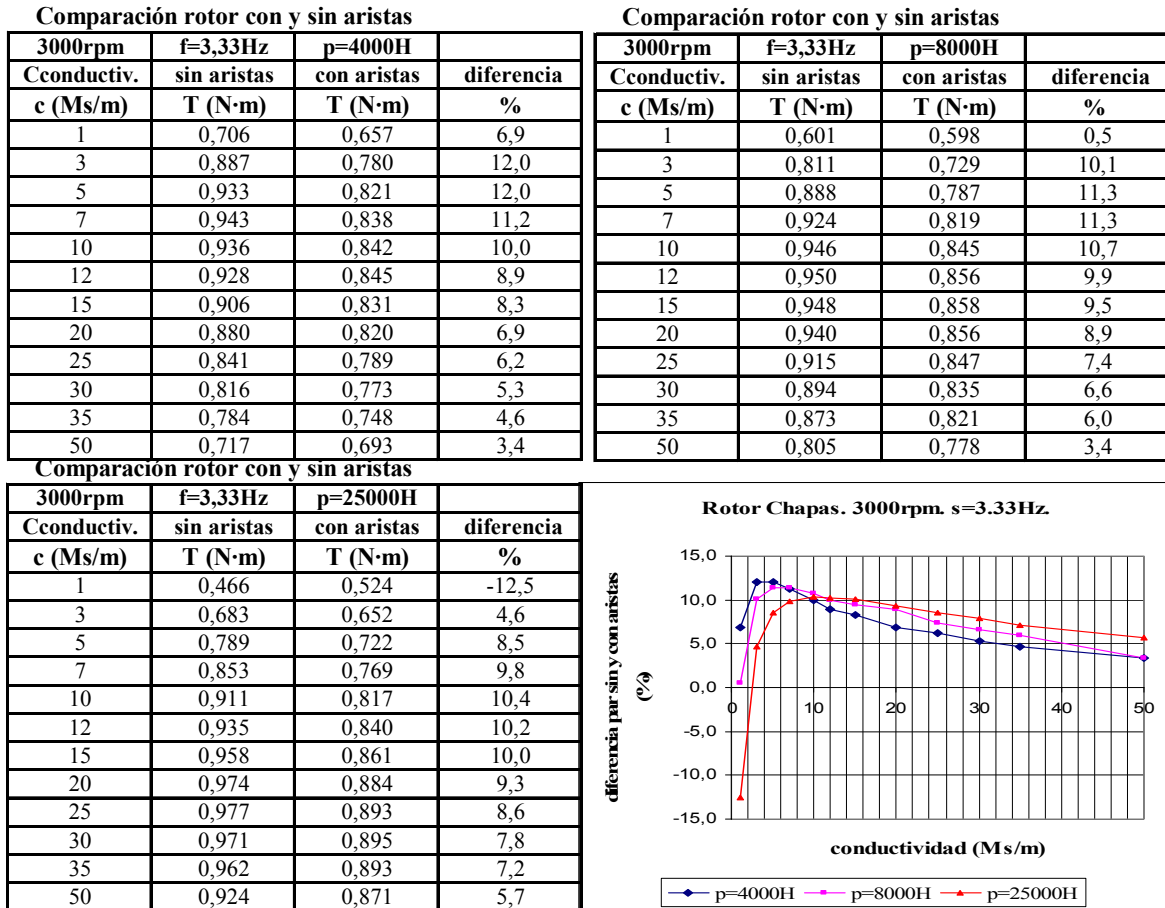


Figura 9.21. Diferencia de par (en %), entre las series de rotores sin y con aristas.

Si comparamos los valores experimentales hallados en los ensayos de los motores equipados con rotores de chapas tipo D, y tipo Z, obtenemos la siguiente tabla.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz

f	n	T (tipo-D)	T (tipo-Z)	Diferencia %
Hz	rpm	N·m	N·m	%
1,00	2940	0,13	0,11	19,2
3,33	2800	0,79	0,65	17,7
8,33	2500	1,99	1,64	17,6
16,66	2000	3,33	2,75	17,4
25,00	1500	4,11	3,39	17,5
33,33	1000	4,69	3,89	17,1
41,66	500	5,02	4,20	16,3
46,66	200	5,15	4,39	14,8

Tabla IX.VII. Variación del par en los motores equipados con rotores de chapas tipo D, y Z.

Como puede apreciarse, y recordando que las chapas de estos modelos tienen conductividades próximas a 3 MS/m y permeabilidades relativas del orden de 4000, la diferencia entre los valores de par, considerando un deslizamiento de 3.33Hz, es de aproximadamente un 17%. Valor que se corresponde perfectamente con lo simulado, ya que como puede apreciarse en la figura 9.21 para una conductividad de 3 MS/m y permeabilidad relativa de 4000, la diferencia debida al efecto arista es del 12%, y debemos recordar que falta el efecto del aire que como se vera más adelante representa un 5%.

Despreciando el primer tramo (recodos de las curvas) de la figura 9.21 que sólo afecta a valores de conductividad de 1MS/m, las ecuaciones que definen el incremento, en tanto por ciento, de los valores

del par en los motores de chapas sin aristas en función de la conductividad, para las tres permeabilidades analizadas, viene definido por:

$$\Delta T\%_{\text{sin aristas-p=4000H}} = 0.0041 \cdot c^2 - 0.4101 \cdot c + 13.682 \quad [9.10]$$

$$\Delta T\%_{\text{sin aristas-p=8000H}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot c^3 - 0.0004 \cdot c^2 - 0.1906 \cdot c + 12.469 \quad [9.11]$$

$$\Delta T\%_{\text{sin aristas-p=25000H}} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot c^4 + 0.0018 \cdot c^3 - 0.0767 \cdot c^2 + 1.1585 \cdot c + 4.5972 \quad [9.12]$$

Donde c , es la conductividad de las chapas en MS/m.

La siguiente figura muestra el comportamiento del campo magnético en un motor a 3000 rpm y una frecuencia de deslizamiento de 3.33 Hz, equipado con rotor de chapas sin mecanizar y una vez efectuado el mecanizado. La simulación se ha realizado con unos valores de permeabilidad relativa de 4000 y de conductividad de 1 MS/m.

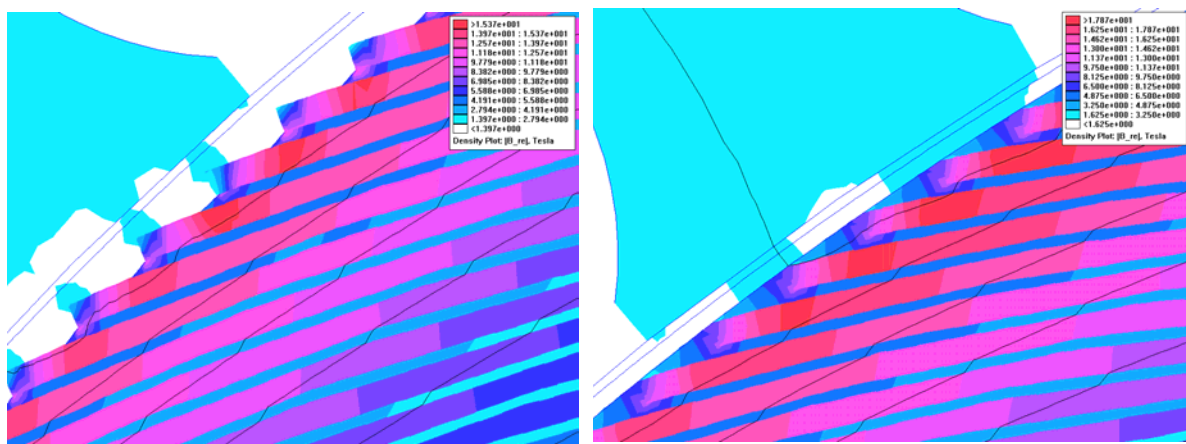


Figura 9.22. Forma del campo magnético en un rotor de chapas antes y después de mecanizarse.

En la figura anterior se pone de manifiesto el efecto que produce un entrehierro variable con una distribución del campo más heterogénea y con picos de inducción en los bordes de las aristas más débiles. Este efecto puede ser observado en las siguientes figuras, las cuales representan la inducción máxima a lo largo del perfil de una chapa para el rotor mecanizado y sin mecanizar respectivamente.

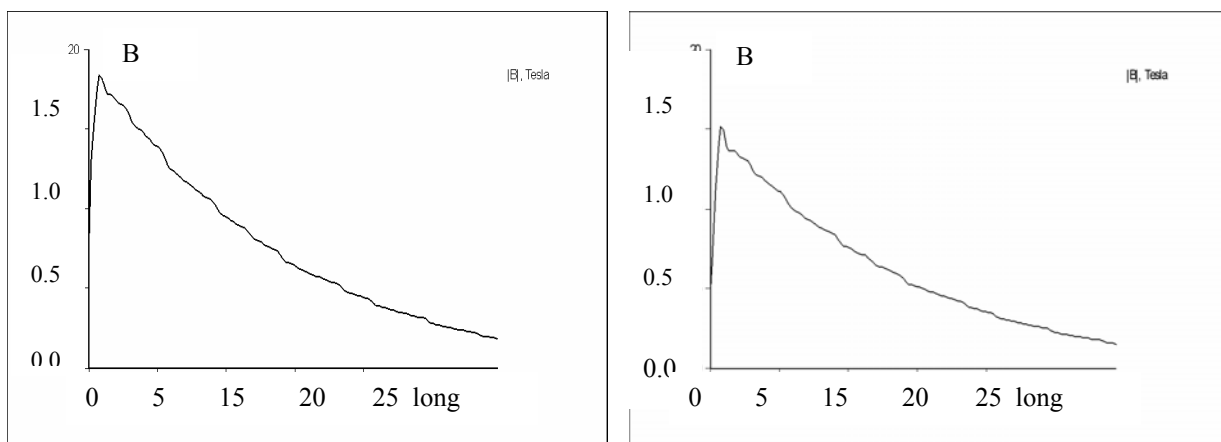


Figura 9.23. Inducción máxima a lo largo de una chapa. a) rotor mecanizado. b) rotor sin mecanizar.

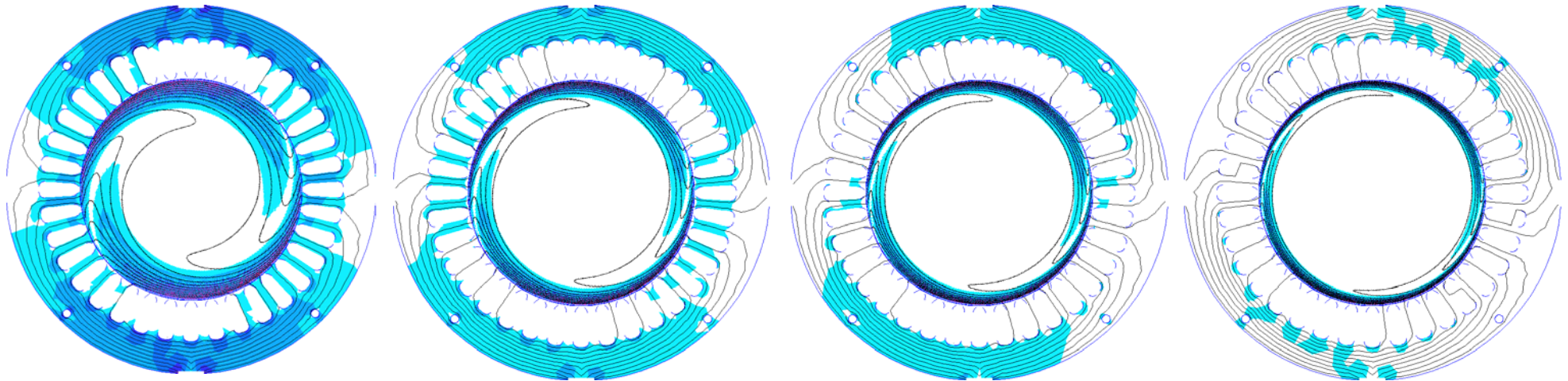


Figura 9.24. Rotor chapas con aristas. Campos magnéticos para una permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 5 MS/m y 10 MS/m.

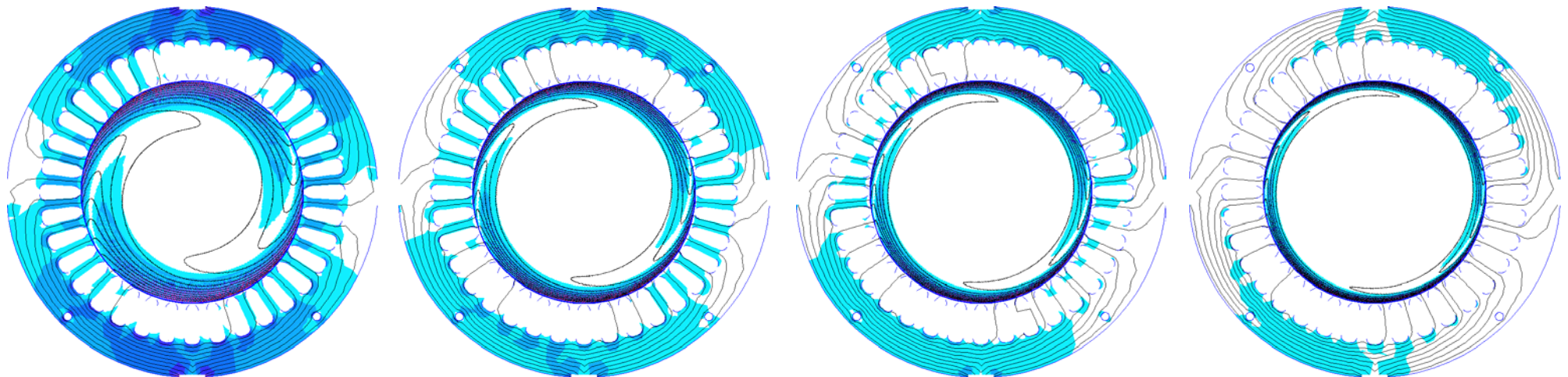


Figura 9.25. Rotor chapas sin aristas. Campos magnéticos para una permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 5 MS/m y 10 MS/m.

En cuanto a la forma que sigue el campo magnético en una visión general del motor, las figuras 9.24 y 9.25, muestran que el campo se debilita antes en el motor equipado con rotor sin mecanizar corroborándose este hecho también si analizamos la intensidad de campo (A/m) y la densidades o pérdidas de Focault (MA/m^2)

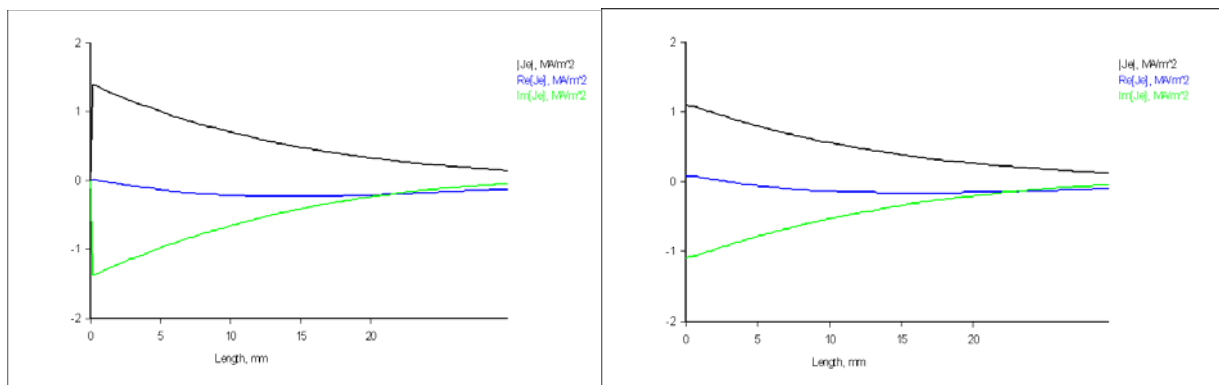


Figura 9.26. Densidades de corrientes de Foucault. a) Rotor mecanizado. b) Rotor sin mecanizar.

9.2.2.2 Motores con rotor de chapas en espiral tipos *A*, *E* y *F*

Una vez analizados los rotores *B*, *D* y *Z*, pasamos a estudiar los rotores *A*, *C*, *E* y *F*. Estos cuatro rotores los podemos englobar en dos conjuntos el *A*, *E* y *F*, de características similares y el *C*, con curvaturas de las chapas, materiales y aros distintos. Los materiales constructivos, de suma importancia, así como el tipo de separación de las chapas, serán analizados posteriormente.

Las diferencias más notorias entre los rotores *A*, *E* y *F*, estriba en que el rotor *F*, incorpora un anillo central de aluminio, siendo idéntico en lo restante al modelo *A*, mientras que el rotor *E*, presenta una curvatura distinta del resto de rotores (más abierta), y aparte, se mecanizó su superficie exterior pero no la lateral.

Pero empecemos por analizar los rotores *A* y *F*, donde la única diferencia es la inclusión de este tercer anillo central. En principio la rigidez mecánica resulta mejorada y su respuesta térmica prácticamente no varía, pero ¿cómo influye el aro en sus respuestas eléctricas y magnéticas?

9.2.2.2.1 Efecto de los anillos en los rotores de chapas

Resulta difícil responder a la pregunta anterior, ya que el programa de elementos finitos FEMM, no permite realizar estudios en 3D, por lo que resulta imposible entrar los datos de un anillo central, con lo que nos tenemos que basar únicamente en los resultados experimentales y remitirnos al capítulo V para la explicación teórica y las fórmulas que nos determinan los cambios eléctricos y magnéticos que introducen los anillos en un rotor de chapas.

De forma simplificada, un anillo representa un camino de retorno para las corrientes situadas en una mitad de las chapas (por ejemplo la superior) al no tener que cerrarse estas corrientes por la otra mitad de la chapa (en nuestro ejemplo la inferior). Así, el par resultante es mayor al existir menos corrientes generadoras de par antagonista.

Pero en el modelo *F*, a los anillos laterales se les ha añadido un anillo central (el cual divide prácticamente al rotor en dos mitades) que debería facilitar el paso de estas corrientes, pero al mismo tiempo disminuye la longitud efectiva de las chapas (recordar que los dos rotores disponen del mismo tamaño). Esta disminución de la longitud efectiva de las chapas repercute en un decremento de los valores eléctricos y respuestas del motor.

En efecto, esta reducción del par debido a la inclusión de anillos centrales es precisamente lo que intentaremos cuantificar. Para ello nos basaremos en los resultados experimentales obtenidos mediante un rotor que se probó con y sin anillos (rotor *A*), y comparando los rotores *A* y *F*.

La incorporación de los anillos laterales representa un incremento medio del par teórico del 20% (ver capítulo V), en cambio experimentalmente se observó que este incremento ascendía al 15% de promedio, aunque era variable a lo largo de una prueba de carga (cabe recordar que sin anillos no se logro hacer funcionar correctamente al motor ya que las chapas a partir de un cierto voltaje rozaban la superficie del estator). La siguiente tabla y gráfica muestra los resultados experimentales obtenidos.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A

f Hz	n rpm	Texp-sin aros	Texp-con aros	Tteó-sin aros	Tteó-con aros
		N·m	N·m	N·m	N·m
1,00	2940	0,09	0,10	0,09	0,105
3,33	2800	0,82	0,94	0,88	0,987
8,33	2500	2,24	2,58	2,45	2,709
16,66	2000	3,50	4,20	3,80	4,320
25,00	1500	4,40	5,30	4,80	5,400
33,33	1000	5,00	5,80	5,24	5,900
41,66	500	5,32	5,90	5,55	6,195
46,66	200	5,45	5,90	5,70	6,195

Tabla IX.VIII. Resultados experimentales y teóricos obtenidos para el motor con rotor de chapas-A.

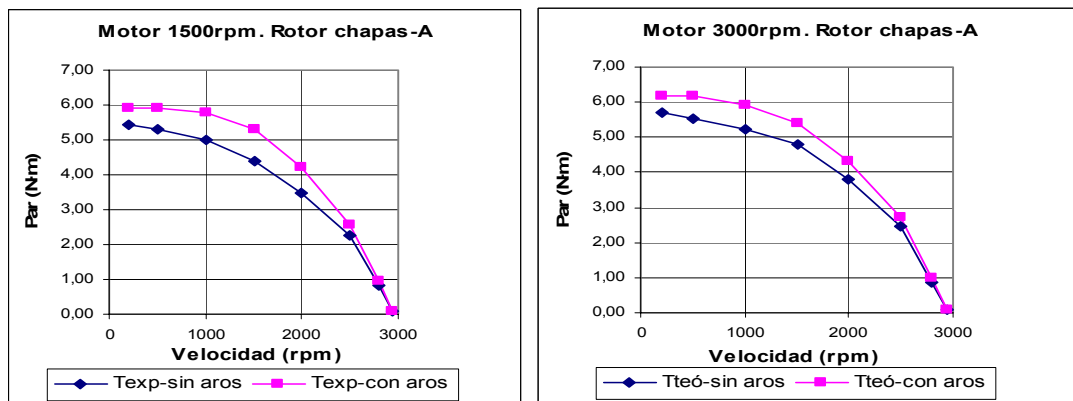


Figura 9.27. Evolución del par experimental y teórico para el motor de chapas tipo-A.

Se aprecia que tanto de forma teórica como de forma práctica existe un aumento del par cuando en rotor incorpora los aros laterales, estando desarrolladas en el capítulo V, las ecuaciones que permiten hallar este incremento de par de forma teórica.

Una vez expuestas las consecuencias de los anillos laterales interesa saber cómo influye el anillo central en la respuesta de estos rotores. Ya se ha indicado que este anillo central representa una disminución en la longitud efectiva de las chapas. Esta disminución provoca también una disminución del par obtenido perjudicando al conjunto de las respuestas eléctricas.

Concretamente, y siempre siguiendo los resultados del único rotor de chapas construidos con el anillo central, el par ha disminuido en un 27%, la intensidad ha disminuido en un 5% y la potencia absorbida ha disminuido en un 6%, dando como resultado una disminución del rendimiento del 12%.

Todos estos valores deben adoptarse de forma muy relativa ya que las curvas de las magnitudes eléctricas no siguen una pauta constante, es decir, que los valores dados son promedios de todos los valores obtenidos en cada magnitud. Aparte recordar que estamos trabajando con un solo rotor, y por tanto la muestra es muy pequeña.

Con todo, y considerando que el anillo central del rotor *F*, ocupa 17 mm sobre los 72 mm totales de chapa, lo que representa una disminución efectiva de la longitud de las chapas del 24%, y considerando también que el decremento de par esta alrededor del 27% podemos pensar en una relación bastante lineal entre la reducción de la longitud efectiva de las chapas y la reducción del par.

Corroborar esta hipótesis la circunstancia de que con aros laterales también coincide la relación dada para el aro central. En este caso, entre los dos anillos laterales existe una longitud efectiva de 14 mm (7 mm de espesor por anillo), y como se ha indicado, el aumento de par experimentado por el rotor equipado con anillos laterales respecto al mismo rotor cuando carece de éstos es del orden del 15%.

De forma que las expresiones anteriores dadas en el capítulo V, pueden considerarse aproximadamente válidas en la mayor parte de rotores de chapas (cabe recordar que sólo se ha validado para dos rotores). Es importante notar no obstante que existe una diferencia fundamental entre los aros laterales y el aro central, ya que si los aros son laterales, se produce un incremento de par, en cambio cuando los aros son centrales el resultado es un decremento del mismo debido a la disminución de la longitud efectiva de las chapas. Intensidad y potencia absorbida, cuando existen aros centrales, experimentan asimismo disminuciones respecto al mismo rotor sin aros centrales.

Las siguientes tablas y gráficas expresan estos valores de forma resumida para dos de los motores construidos, el rotor de chapas tipo *A*, y el rotor de chapas tipo *F*.

Motor 3000rpm. Rotor chapas-A. Ensayo carga					Motor 3000rpm. Rotor chapas-F. Ensayo carga				
Ub (V)	IL (A)	Pabs. total (w)	Par (N·m)	rpm	Ub (V)	IL (A)	Pabs. total (w)	Par (N·m)	rpm
380	1,352	310	0,2	2920	380	1,224	237	0,0	2900
380	1,408	480	0,9	2800	380	1,275	397	0,6	2800
380	1,536	622	1,4	2680	380	1,391	537	1,1	2675
380	1,692	804	2,1	2520	380	1,532	686	1,6	2515
380	1,828	935	2,6	2390	380	1,656	815	2,1	2380
380	2,046	1110	3,3	2190	380	1,853	987	2,6	2180
380	2,282	1265	3,9	1930	380	2,067	1160	3,1	1920
380	2,580	1437	4,5	1560	380	2,337	1353	3,6	1550
380	2,831	1608	5,2	1170	380	2,564	1521	4,1	1160
380	3,128	1790	5,7	610	380	2,834	1705	4,5	600

Tabla IX.IX. Valores eléctricos del ensayo en carga para los rotores de chapas tipo *A* y tipo *F*.

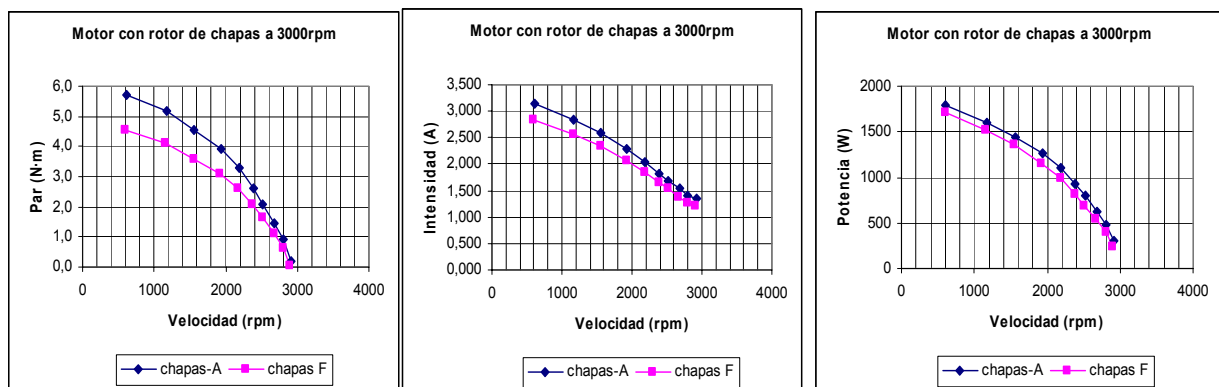


Figura 9.28. Evolución de diferentes magnitudes eléctricas en el motor con rotor de chapas *A*, y *F*.

9.2.2.2 Efecto de la curvatura de las chapas

En el estudio y comparación del modelo *E*, surge la característica de la curvatura de las chapas, aunque se sigue manteniendo el material y el número de chapas, pero con este modelo queríamos dar respuesta a unas cuantas hipótesis: ¿qué sucedería si en vez de seguir las chapas la curva diferencial del resto de los modelos, optáramos por una curva parabólica de tercer grado? Esta curva resulta más

abierta, con lo que ha 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.

Para realizar el análisis, aparte de los rotores experimentales, se han simulado tres rotores de chapas con las mismas características eléctricas pero con diferente curvatura. En concreto se han realizado cuatro series de simulaciones para las permeabilidades relativas de 2500, 4000, 8000 y 15000. El motor escogido a sido el de 3000 rpm con una frecuencia de deslizamiento de 3.33 Hz en carga.

A priori la comparación teórica con la real resulta sumamente difícil ya que simplemente en la real, y para un mismo rotor, todas las chapas no estarán igualmente dobladas, existiendo entre ellas puntos de contacto y, posiblemente será difícil conseguir la curva prescrita. En cambio teóricamente es posible conseguir un rotor perfecto con todas las chapas dispuestas de forma simétrica y con la curva escogida. Por tanto, se ha creído conveniente simular tres rotores con las mismas características pero con tres curvas diferentes, no sabemos si los resultados serán exactamente los reales pero si que nos permitirá una buena comparación entre modelos considerando este efecto por separado.

Así, y para este ensayo, se muestran tres modelos con sus correspondientes curvas a las que hemos denominado con los números 1º, 2º y 3º. La curva número uno, corresponde a la curva ideal deducida en el capítulo II, siendo la única curva que permite un apilado perfecto de las chapas sin que éstas tengan que abrirse por la parte superior del rotor. En el otro extremo encontramos la curva tres, que resulta ser la más abierta y que por tanto en su parte superior, las chapas estarán más separadas. Prácticamente a mitad de camino entre éstas se encuentra la curva dos que representa un equilibrio entre las anteriores.

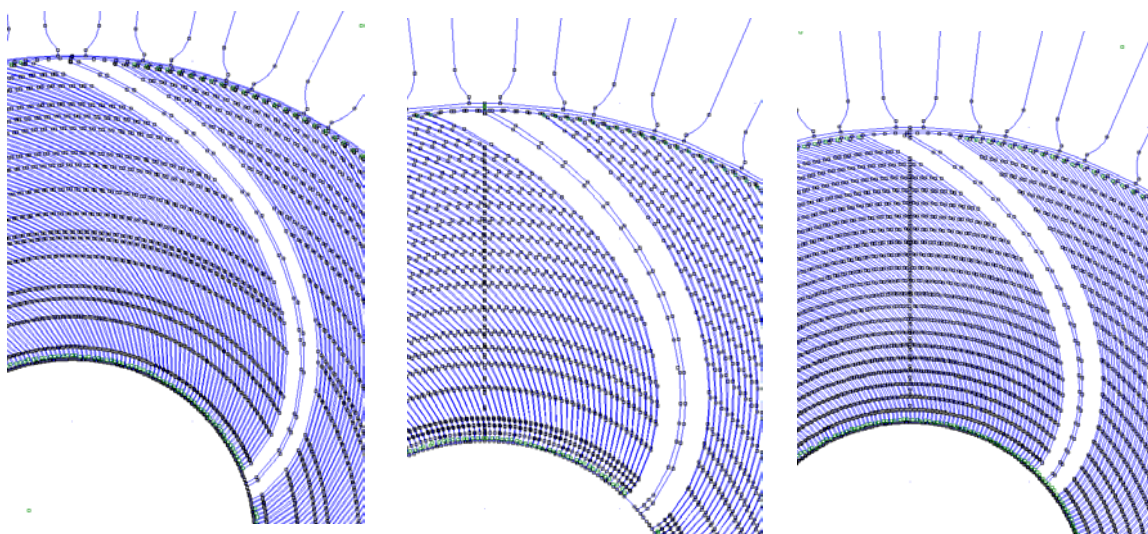
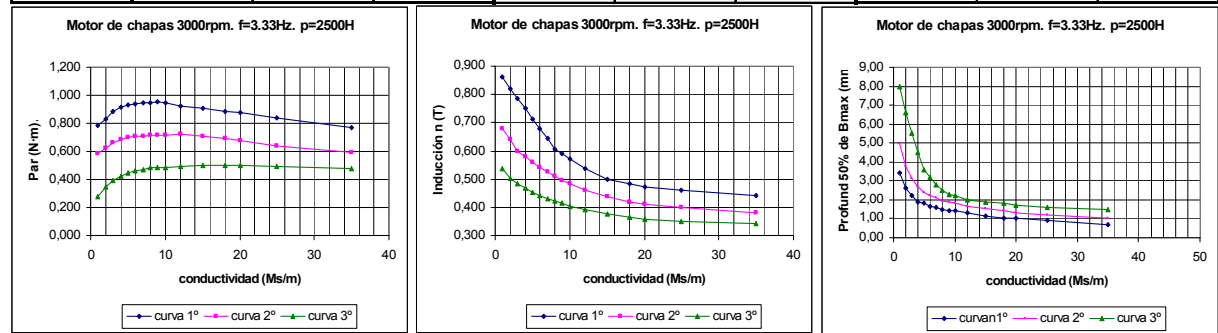


Figura 9.29. Curvas proporcionadas a la chapas. a) curva 1º, b) curva 2º, c) curva 3º.

A priori se puede prever que los resultados electromagnéticos a medida que la curva va en aumento serán peores, principalmente por la mayor separación entre chapas y por tanto por la mayor presencia de aire en el recorrido del flujo magnético, pero era necesario cuantificar esta variación, la cual queda plasmada en las siguientes tablas y gráficas para las cuatro permeabilidades relativas analizadas.

Antes de mostrar las tablas y gráficas obtenidas con estas simulaciones, hay que recordar que este análisis para ser completo debería de haber considerado muchos más radios de curvatura, y quizás más series de permeabilidades, lo cual habría permitido unas relaciones entre los grados de variación de los radios de curvatura y la evolución de las magnitudes eléctricas, pero este extremo sale por completo de las perspectivas de esta tesis dejándose para trabajos futuros. En esta ocasión se presentan tres chapas y cuatro permeabilidades, sacándose las conclusiones que nos permiten la interpretación de estos datos

Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación curva chapa. f=3,33Hz. p=2500H									
conductiv c (Ms/m)	Curva chapas 1°			Curva chapas 2°			Curva chapas 3°		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,782	0,860	3,40	0,586	0,680	4,93	0,275	0,536	8,00
2	0,830	0,821	2,60	0,622	0,640	3,77	0,347	0,504	6,60
3	0,887	0,786	2,20	0,665	0,600	3,15	0,396	0,482	5,50
4	0,917	0,750	1,90	0,687	0,580	2,68	0,424	0,468	4,50
5	0,932	0,714	1,80	0,699	0,560	2,40	0,443	0,454	3,60
6	0,940	0,679	1,65	0,705	0,540	2,25	0,463	0,443	3,20
7	0,945	0,643	1,60	0,710	0,526	2,11	0,468	0,429	2,80
8	0,950	0,607	1,50	0,712	0,510	1,95	0,481	0,421	2,50
9	0,955	0,589	1,45	0,714	0,496	1,90	0,483	0,414	2,30
10	0,943	0,571	1,40	0,715	0,485	1,80	0,487	0,404	2,20
12	0,926	0,536	1,30	0,720	0,460	1,65	0,494	0,393	2,00
15	0,906	0,500	1,15	0,707	0,436	1,52	0,497	0,375	1,90
18	0,886	0,482	1,05	0,694	0,420	1,40	0,497	0,364	1,80
20	0,877	0,471	1,00	0,680	0,410	1,32	0,496	0,357	1,70
25	0,841	0,460	0,90	0,640	0,400	1,20	0,492	0,350	1,60
35	0,771	0,440	0,70	0,590	0,380	1,02	0,478	0,343	1,50



Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación curva chapa. f=3,33Hz. p=4000H									
conductiv c (Ms/m)	Curva chapas 1°			Curva chapas 2°			Curva chapas 3°		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,844	0,804	4,20	0,633	0,680	5,00	0,242	0,554	6,50
2	0,884	0,786	3,10	0,663	0,650	3,88	0,321	0,536	4,80
3	0,910	0,750	2,50	0,683	0,620	3,13	0,364	0,518	3,70
4	0,930	0,714	2,20	0,702	0,600	2,75	0,393	0,500	3,30
5	0,950	0,679	2,00	0,715	0,568	2,50	0,417	0,482	3,00
6	0,951	0,643	1,80	0,720	0,540	2,25	0,437	0,464	2,80
7	0,952	0,607	1,70	0,725	0,516	2,13	0,448	0,446	2,60
8	0,953	0,589	1,60	0,730	0,501	2,00	0,463	0,436	2,45
9	0,954	0,571	1,53	0,736	0,486	1,91	0,470	0,429	2,30
10	0,956	0,554	1,48	0,738	0,471	1,85	0,481	0,421	2,20
12	0,957	0,518	1,38	0,740	0,452	1,73	0,488	0,407	2,00
15	0,920	0,482	1,25	0,746	0,432	1,56	0,495	0,393	1,90
18	0,880	0,457	1,15	0,750	0,416	1,44	0,500	0,386	1,75
20	0,860	0,446	1,10	0,740	0,406	1,38	0,502	0,375	1,70
22	0,835	0,435	1,05	0,730	0,395	1,31	0,503	0,368	1,65
25	0,800	0,429	1,00	0,700	0,385	1,25	0,503	0,361	1,60
35	0,694	0,393	0,93	0,620	0,365	1,16	0,497	0,350	1,50

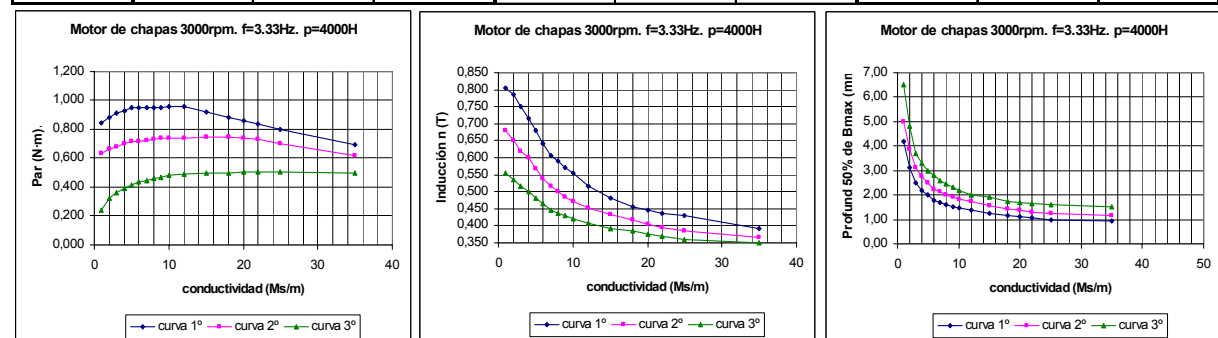
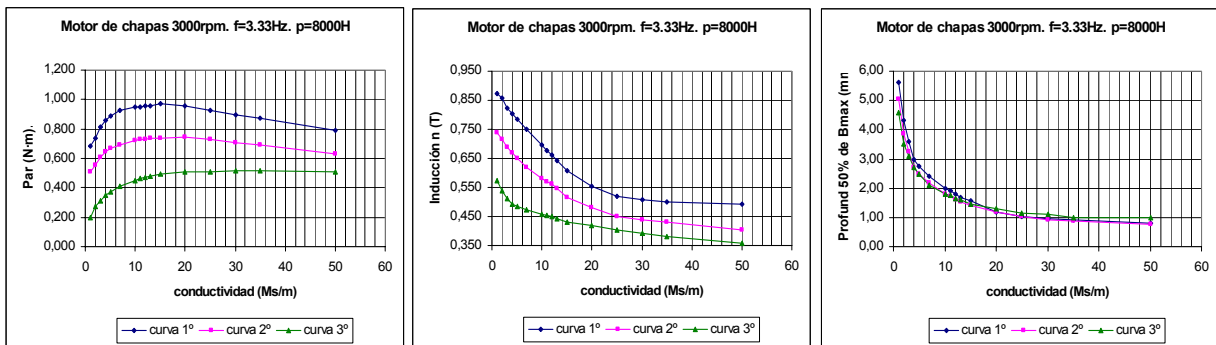


Figura 9.30. Evolución de diversas magnitudes a unas permeabilidades relativas de 2500 y 4000, en función de la conductividad para los tres radios de curvatura elegidos.

Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación curva chapa. f=3,33Hz. p=8000H									
conductiv c (Ms/m)	Curva chapas 1°			Curva chapas 2°			Curva chapas 3°		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,681	0,875	5,60	0,511	0,740	5,04	0,200	0,571	4,60
2	0,737	0,857	4,30	0,553	0,715	3,87	0,270	0,540	3,50
3	0,811	0,821	3,60	0,608	0,690	3,24	0,314	0,510	3,10
4	0,857	0,804	3,00	0,643	0,670	2,70	0,347	0,493	2,70
5	0,888	0,786	2,75	0,666	0,650	2,48	0,376	0,486	2,50
7	0,930	0,750	2,40	0,690	0,620	2,16	0,413	0,471	2,10
10	0,950	0,696	2,00	0,720	0,580	1,80	0,450	0,457	1,80
11	0,953	0,679	1,90	0,730	0,570	1,71	0,460	0,454	1,76
12	0,954	0,661	1,80	0,732	0,560	1,62	0,470	0,450	1,65
13	0,960	0,643	1,70	0,734	0,546	1,53	0,476	0,443	1,60
15	0,970	0,607	1,55	0,738	0,516	1,40	0,491	0,432	1,45
20	0,960	0,554	1,20	0,742	0,480	1,20	0,506	0,418	1,30
25	0,930	0,518	1,05	0,730	0,450	1,05	0,510	0,404	1,15
30	0,895	0,507	0,95	0,710	0,440	0,90	0,516	0,393	1,10
35	0,870	0,500	0,90	0,690	0,430	0,86	0,515	0,382	1,00
50	0,792	0,493	0,82	0,630	0,405	0,76	0,510	0,357	0,98



Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación curva chapa. f=3,33Hz. p=15000H									
conductiv c (Ms/m)	Curva chapas 1°			Curva chapas 2°			Curva chapas 3°		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,520	0,920	4,00	0,390	0,750	3,92	0,170	0,589	4,20
2	0,655	0,875	3,00	0,470	0,720	2,94	0,239	0,557	3,50
3	0,736	0,839	2,45	0,530	0,700	2,40	0,282	0,536	2,80
4	0,792	0,821	2,00	0,570	0,680	2,10	0,321	0,518	2,30
5	0,832	0,786	1,75	0,610	0,660	1,90	0,343	0,500	2,00
7	0,886	0,750	1,50	0,660	0,630	1,65	0,384	0,475	1,80
10	0,931	0,700	1,35	0,698	0,585	1,46	0,425	0,450	1,60
12	0,947	0,670	1,26	0,710	0,560	1,38	0,450	0,439	1,50
15	0,959	0,630	1,18	0,720	0,530	1,28	0,468	0,425	1,40
16	0,962	0,620	1,15	0,721	0,527	1,25	0,478	0,421	1,38
20	0,965	0,590	1,09	0,735	0,502	1,18	0,493	0,407	1,33
25	0,980	0,564	1,04	0,742	0,480	1,10	0,508	0,393	1,25
35	0,990	0,536	0,95	0,755	0,455	1,05	0,522	0,379	1,20
45	0,980	0,520	0,90	0,760	0,442	0,96	0,526	0,368	1,15
50	0,970	0,513	0,87	0,760	0,436	0,92	0,526	0,364	1,14

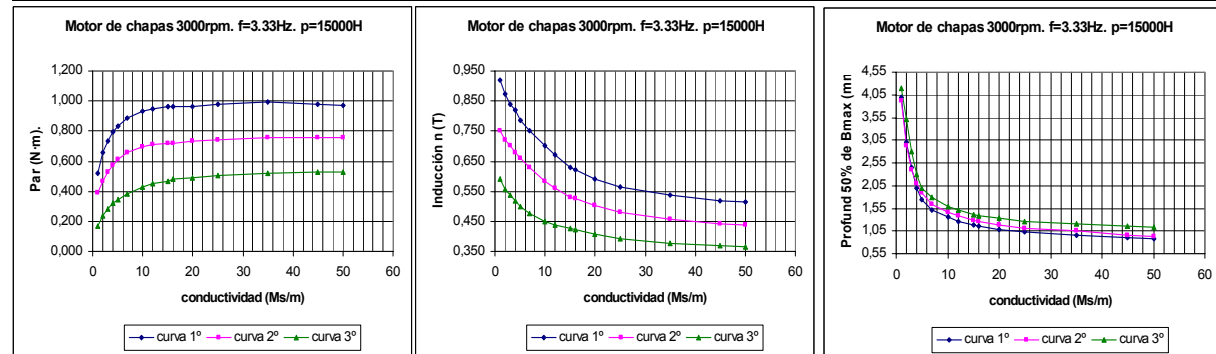


Figura 9.31. Evolución de diversas magnitudes a una permeabilidad relativa de 8000 y 15000, en función de la conductividad para los tres radios de curvatura elegidos.

De las gráficas y figuras anteriores puede apreciarse que al disminuir el radio de curvatura de las chapas también disminuye el par generado. Esta disminución no es constante para cada uno de los valores de la conductividad no pudiéndose por tanto dar una media, aunque si es posible definir que esta variación seguirá una respuesta lineal como puede apreciarse en la figura 9.32.

El punto de conductividad óptima para una determinada permeabilidad relativa, también varía en función del radio de curvatura de las chapas. Así para la permeabilidad de 2500, las conductividades óptimas para las curvas 1°, 2°, y 3° son respectivamente: 9, 12 y 16 MS/m. Para la permeabilidad de 4000 estos valores son: 12, 18 y 23 MS/m. Para la permeabilidad de 8000 son: 15, 20 y 28 MS/m y, finalmente, para una permeabilidad de 15000 tendremos como conductividades óptimas para las tres chapas: 35, 48 y mayor que 50 MS/m.

Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=2500H					Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=4000H				
c=1Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)	c=1Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
c=1Ms/m	1	0,728	0,860	3,40	c=1Ms/m	1	0,844	0,804	4,20
	2	0,586	0,68	4,93		2	0,633	0,680	5,00
	3	0,350	0,536	7,00		3	0,350	0,554	6,50
c=5Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)	c=5Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
	1	0,932	0,714	1,80		1	0,950	0,679	2,00
	2	0,699	0,56	2,40		2	0,715	0,568	2,5
c=10Ms/m	3	0,433	0,454	2,60	c=10Ms/m	3	0,417	0,482	3,00
	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)		curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
	1	0,943	0,571	1,40		1	0,956	0,554	1,48
c=20Ms/m	2	0,715	0,485	1,80	c=20Ms/m	2	0,738	0,471	1,85
	3	0,487	0,404	2,20		3	0,481	0,421	2,20
	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)		curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
c=35Ms/m	1	0,877	0,471	1,00	c=35Ms/m	1	0,860	0,446	1,10
	2	0,680	0,410	1,32		2	0,740	0,406	1,38
	3	0,496	0,357	1,70		3	0,502	0,375	1,70
c=35Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)	c=35Ms/m	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
	1	0,771	0,440	0,70		1	0,694	0,393	0,93
	2	0,590	0,380	1,02		2	0,620	0,365	1,16
c=35Ms/m	3	0,478	0,343	1,50	c=35Ms/m	3	0,497	0,350	1,50

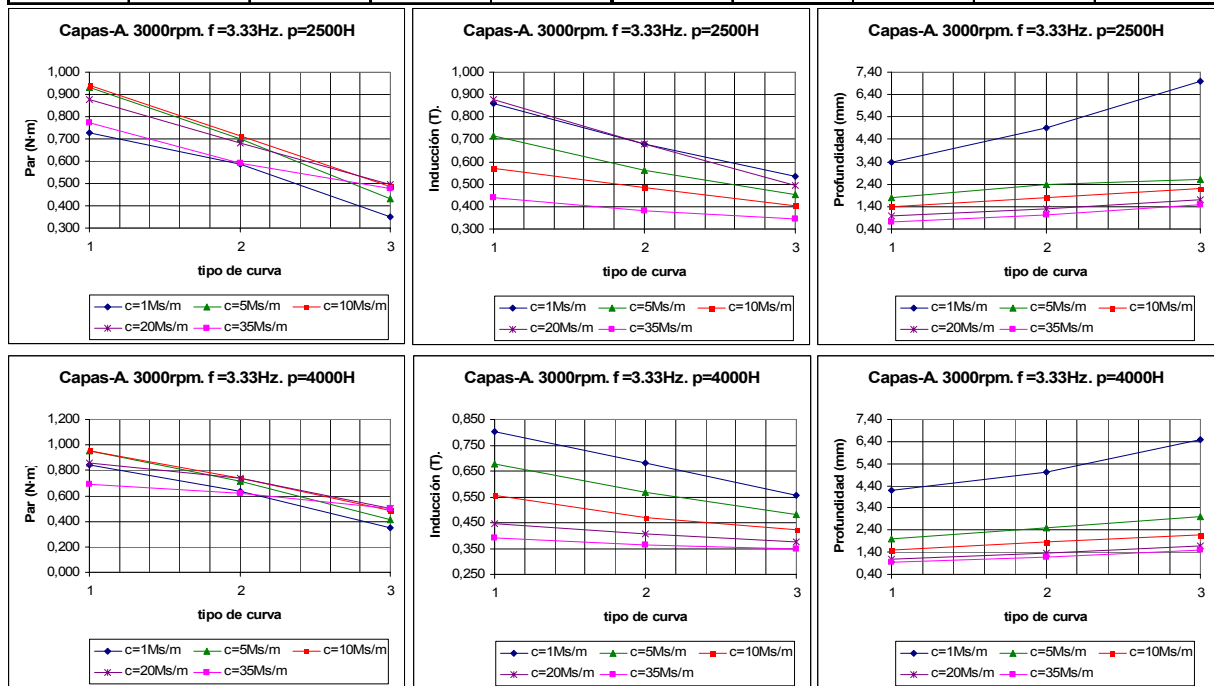


Figura 9.32. Variación de las magnitudes eléctricas al cambiar la curva de las chapas en función de la conductividad y para las permeabilidades relativas de 2500 y 4000.

Al aumentar la permeabilidad relativa, la diferencia entre el par hallado con las diferentes curvas aumenta, aunque de forma ligera. Como datos promedios (considerando las pocas series de las que se disponen) entre las dos chapas con curvas extremas (la 1º y la 3º), podemos indicar que la diferencia entre los valores del par son para las permeabilidades de 2500, 4000, 8000 y 1500 del 49.4%, 51%, 53.2% y 56.5% respectivamente. Es decir, en todo caso las diferencias son menores al 8% considerando una amplia variación de la permeabilidad desde 2500 hasta 15000.

Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=8000H					Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=15000H				
c	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)	c	curva chap	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
c=1Ms/m	1	0,681	0,875	5,60	c=1Ms/m	1	0,520	0,920	4,00
	2	0,511	0,740	5,04		2	0,390	0,750	3,92
	3	0,300	0,571	4,60		3	0,220	0,589	4,10
c=5Ms/m	1	0,888	0,786	2,75	c=5Ms/m	1	0,832	0,786	1,75
	2	0,666	0,650	2,48		2	0,610	0,660	1,90
	3	0,376	0,486	2,50		3	0,343	0,500	2,00
c=10Ms/m	1	0,950	0,696	2,00	c=10Ms/m	1	0,931	0,700	1,35
	2	0,720	0,580	1,80		2	0,698	0,585	1,46
	3	0,450	0,457	1,70		3	0,425	0,450	1,60
c=20Ms/m	1	0,960	0,554	1,20	c=20Ms/m	1	0,965	0,590	1,09
	2	0,742	0,480	1,25		2	0,735	0,502	1,18
	3	0,506	0,418	1,30		3	0,493	0,407	1,33
c=35Ms/m	1	0,870	0,500	0,90	c=35Ms/m	1	0,990	0,536	0,95
	2	0,690	0,430	0,95		2	0,755	0,455	1,05
	3	0,515	0,382	1,00		3	0,522	0,379	1,20

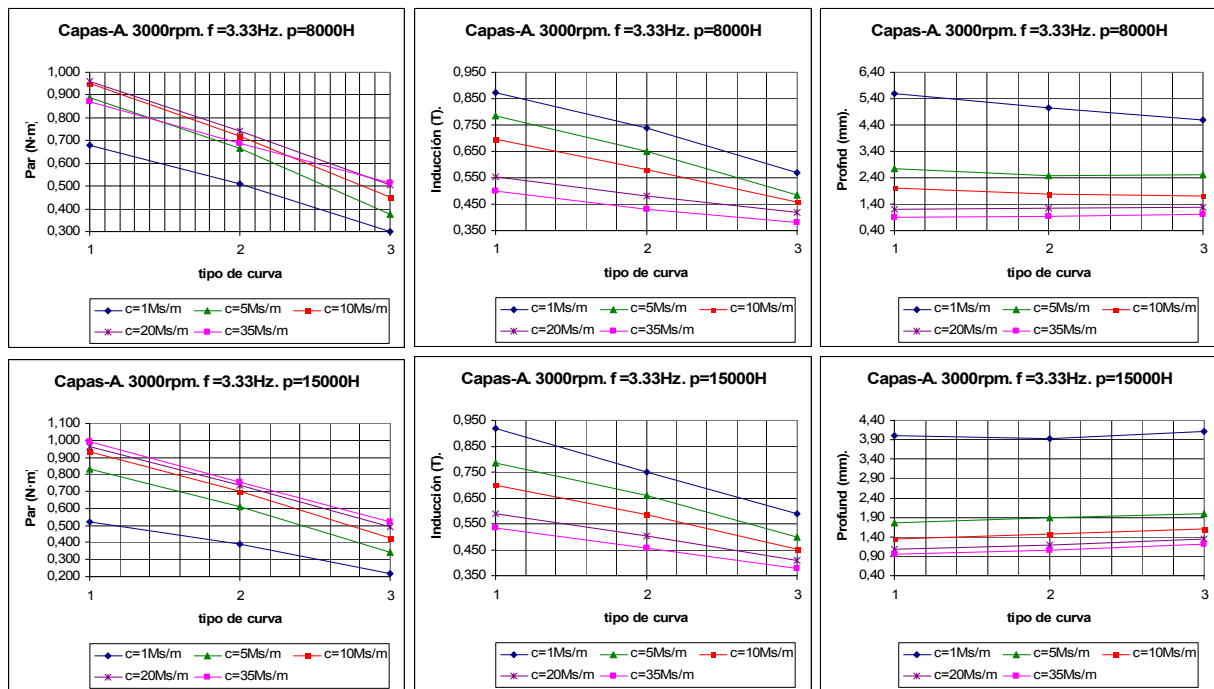


Figura 9.33. Variación de las magnitudes eléctricas al cambiar la curva de las chapas en función de la conductividad y para las permeabilidades relativas de 8000 y 15000.

De la figura 9.32 pueden extraerse unas ecuaciones empíricas sólo válidas para estos tres radios de curvatura y para el rango de los materiales analizados, las cuales expresan la variación que sufre el par al cambiar el radio de curvatura de las chapas (se ha tomado como valor de referencia para la conductividad los 10 MS/m). En estas ecuaciones ρ , representa la curvatura de las chapas (1º, 2º o 3º)

$$\text{Para una permeabilidad de 2500: } T_{m\acute{a}x} = -0.228 \cdot \rho + 1.171 \text{ (N}\cdot\text{m)} \quad [9.13]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 4000: } T_{\text{máx}} = -0.2375 \cdot \rho + 1.200 \text{ (N}\cdot\text{m)} \quad [9.14]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 8000: } T_{\text{máx}} = -0.250 \cdot \rho + 1.2067 \text{ (N}\cdot\text{m)} \quad [9.15]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 15000: } T_{\text{máx}} = -0.253 \cdot \rho + 1.1902 \text{ (N}\cdot\text{m)} \quad [9.16]$$

En cuanto a la variación de la conductividad para una misma permeabilidad relativa, la diferencia entre los valores de par para chapas con curvatura distinta disminuye de forma rápida con conductividades bajas. Así la figura 9.33 muestra la diferencia entre los valores del par (entre las chapas con radios de curvatura 1° y 3°) en función de la conductividad y permeabilidad.

Para permeabilidades relativas bajas, la curva es prácticamente una recta con pendiente negativa, es decir, las variaciones de conductividad hacen variar las diferencias de par que se dan entre dos chapas con diferente curvatura. En cambio con permeabilidades altas, la conductividad prácticamente no influye en los cambios que puedan experimentar el par debido a la curvatura de las chapas. Serían necesarios más series de simulaciones, pero podemos atrevernos a dar unas ecuaciones empíricas para estas series en concreto y este rango de permeabilidades.

$$v_{(\%)} = 0.0148 \cdot c^2 - 1.5515 \cdot c + 61.183 \quad [9.17]$$

$$v_{(\%)} = 0.0234 \cdot c^2 - 1.7705 \cdot c + 66.148 \quad [9.18]$$

$$v_{(\%)} = 0.0132 \cdot c^2 - 1.215 \cdot c + 65.214 \quad [9.19]$$

$$v_{(\%)} = 0.0150 \cdot c^2 - 1.0973 \cdot c + 64.84 \quad [9.20]$$

Donde c , es la conductividad de las chapas del rotor en MS/m, y v , es la variación del par en tanto por ciento. La figura 9.34, ilustra de forma gráfica estas ecuaciones del comportamiento de la variación del par en función de la conductividad.

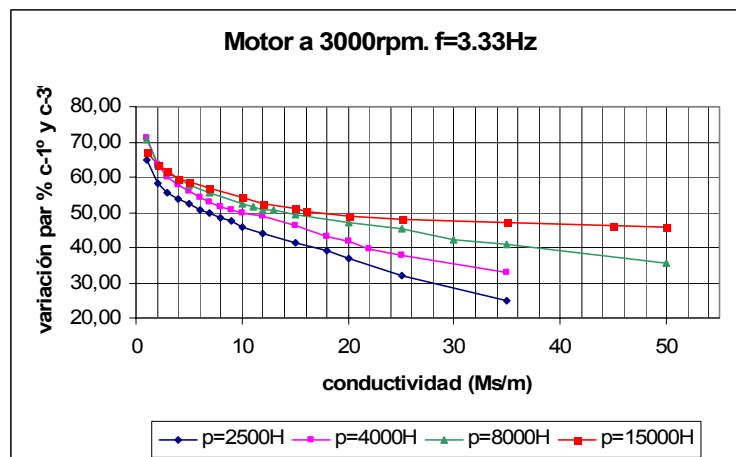


Figura 9.34. Variación del par entre las chapas con curva 1° y 3° en función de la conductividad.

En cuanto a la inducción, el comportamiento es similar al del par, detectándose una disminución progresiva de la misma a medida que disminuye el radio de curvatura de las chapas. Concretamente al variar la permeabilidad se observa que las desviaciones existentes en el campo magnético neto entre los dos motores equipados con rotor de chapas tipo 1° y 3°, aumentan al aumentar la permeabilidad. Así para las permeabilidades relativas analizadas, y de menor a mayor, tendremos respectivamente los siguientes valores promedio de la desviación de la inducción máxima en el entrehierro entre los motores citados de: 27.8%, 30.5%, 33.2% y 35.9%.

Podemos apreciar en las figuras 9.32 y 9.34, dadas para las permeabilidades analizadas, que el comportamiento de la inducción en la mayor parte de las ocasiones es lineal y con pendiente negativa. Para un valor de conductividad estándar de 10 MS/m las ecuaciones que representan estos cambios en el valor de la inducción al variar la curvatura de las chapas ρ , son:

$$\text{Para una permeabilidad de 2500: } B_{\text{máx}} = -0.0835 \cdot \rho + 0.654 \text{ (T)} \quad [9.21]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 4000: } B_{\text{máx}} = -0.0665 \cdot \rho + 0.615 \text{ (T)} \quad [9.22]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 8000: } B_{\text{máx}} = -0.1195 \cdot \rho + 0.816 \text{ (T)} \quad [9.23]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 15000: } B_{\text{máx}} = -0.1250 \cdot \rho + 0.828 \text{ (T)} \quad [9.24]$$

Por su parte la profundidad donde se alcanza el 50% de la inducción máxima, medida esta distancia en forma radial desde el entrehierro hasta el eje del rotor, sufre menos variaciones de las que a priori podríamos pensar, denotándose que con una disminución del radio de curvatura de las chapas existe un aumento de la profundidad de las líneas de campo lo que repercute en un menor aprovechamiento para la generación del par neto.

Así, y mientras que a 2500 de permeabilidad relativa, existen todavía diferencias (en promedio del 51.8%) a medida que aumentamos la permeabilidad estas diferencias decrecen (36% a 4000, 22% a 8000 y 12% a 15000). Además como puede apreciarse en las figuras 9.32 y 9.34, la variación de esta profundidad puede ser equiparada a unas rectas que para las curvas y materiales analizados podemos expresar de la siguiente forma (se toma también la conductividad de referencia los 10 MS/m).

$$\text{Para una permeabilidad de 2500: } P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.40 \cdot \rho + 1.002 \text{ (mm)} \quad [9.25]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 4000: } P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.36 \cdot \rho + 1.123 \text{ (mm)} \quad [9.26]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 8000: } P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.15 \cdot \rho + 2.133 \text{ (mm)} \quad [9.27]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 15000: } P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.125 \cdot \rho + 0.213 \text{ (mm)} \quad [9.28]$$

Finalmente en las figuras 9.35 a 9.42 se muestra el campo magnético generado y la densidad de corriente en los motores equipados con rotores de chapas con radios de curvatura tipo 1° y tipo 3°, para algunos valores de la conductividad.

Notar que en los motores con curva 1°, el campo magnético es más superficial alcanzándose profundidades menores lo que repercute en la menor creación de par neto, mientras que el motor de chapas con curva tipo 3°, el campo magnético es más profundo originando estas líneas un par antagonista que debilita el par total.

En cuanto a la densidad de corriente ocurre algo parecido, en los motores con curva de las chapas tipo 1°, la densidad es mayor que no en los motores con curvas tipo 3°, pero en este caso las diferencias son mínimas.

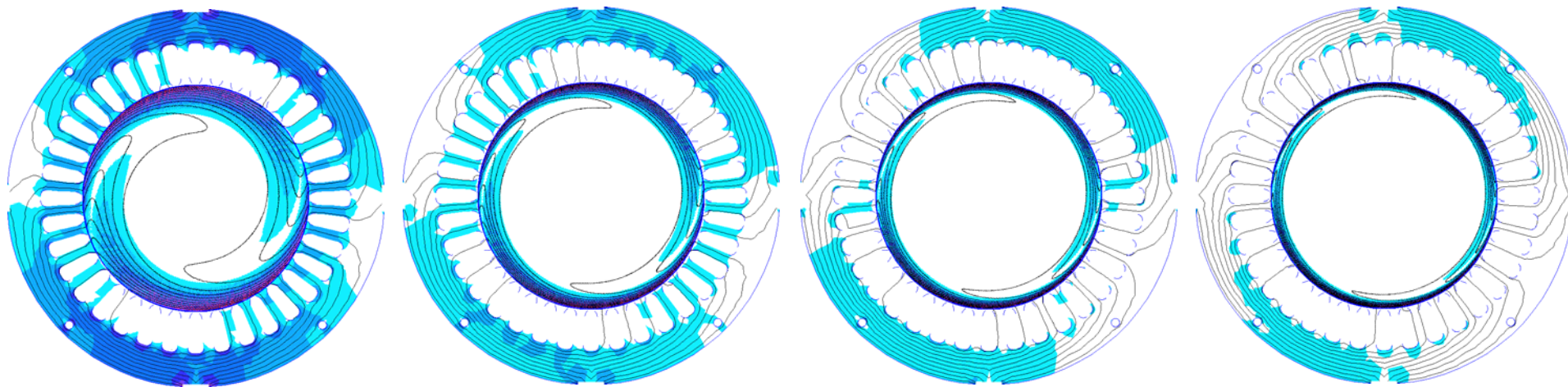


Figura 9.35. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 1°. Permeabilidad relativa 2500.

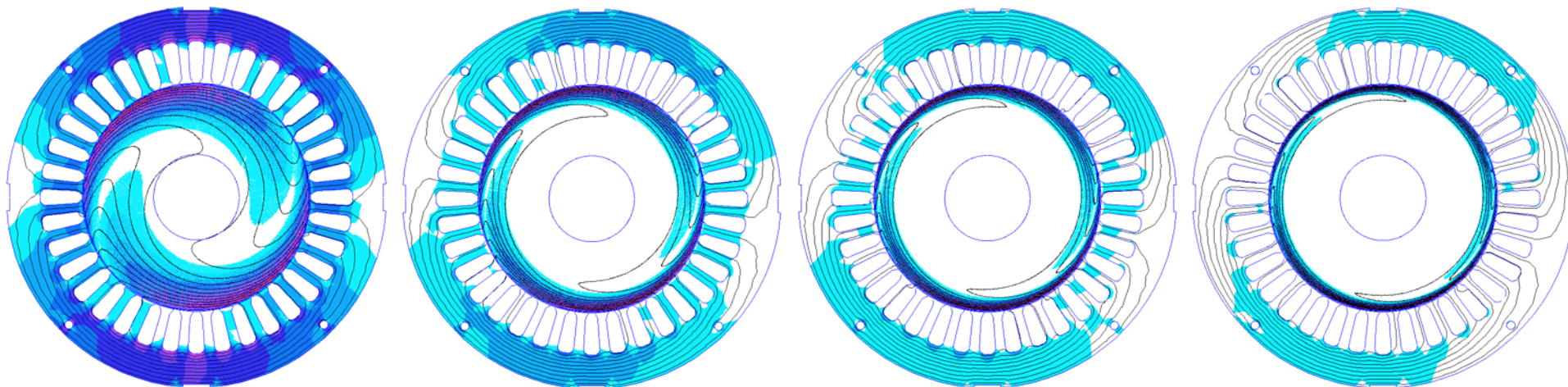


Figura 9.36. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 3°. Permeabilidad relativa 2500.

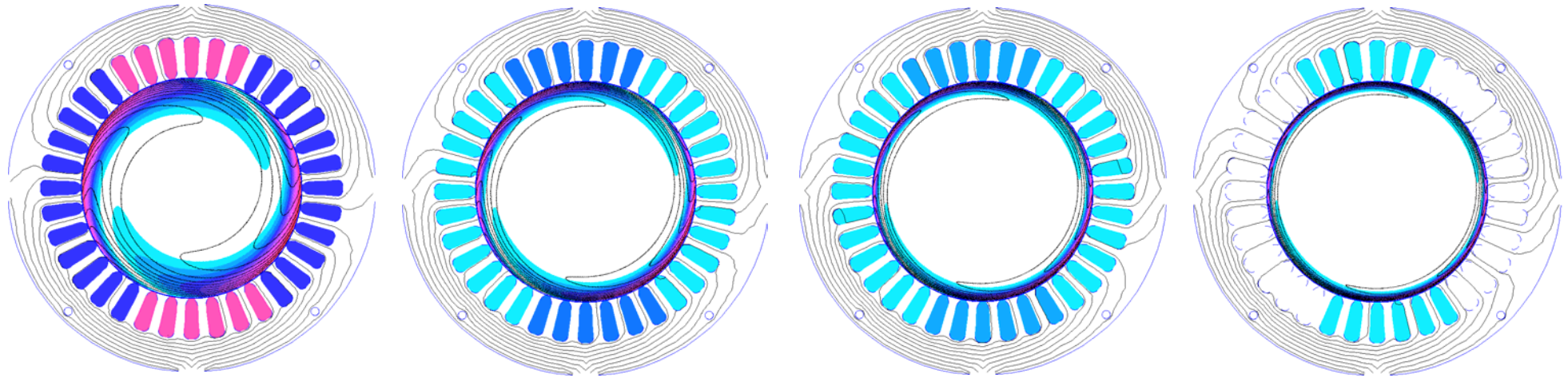


Figura 9.37. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 1°. Permeabilidad relativa 2500.

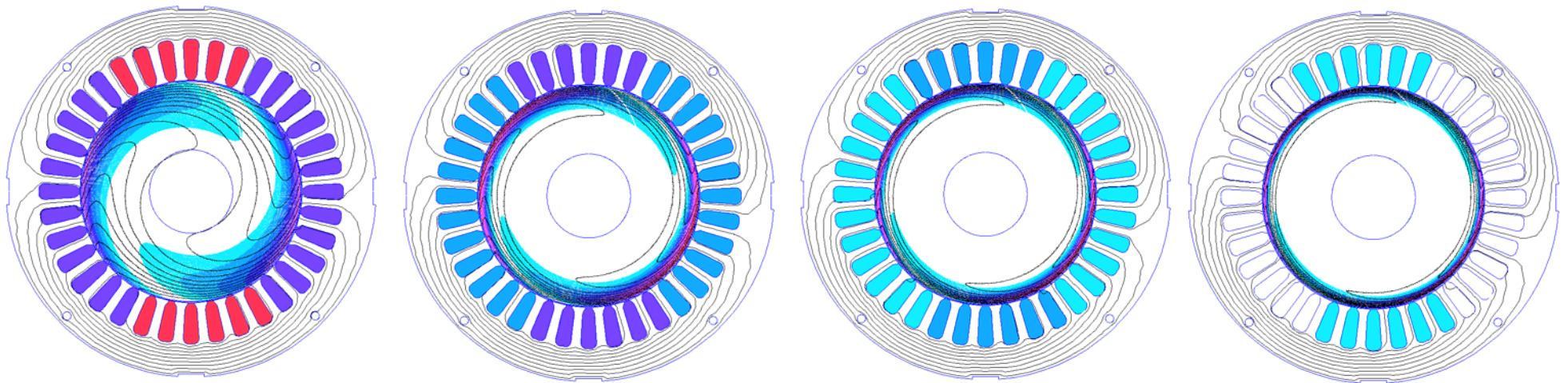


Figura 9.38. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 3°. Permeabilidad relativa 2500.

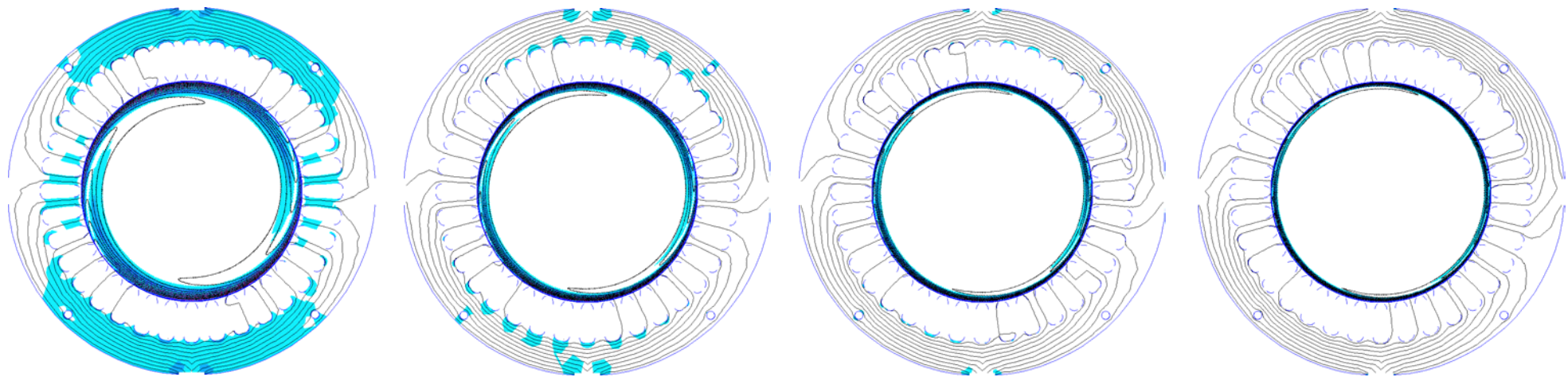


Figura 9.39. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 1°. Permeabilidad relativa 15000.

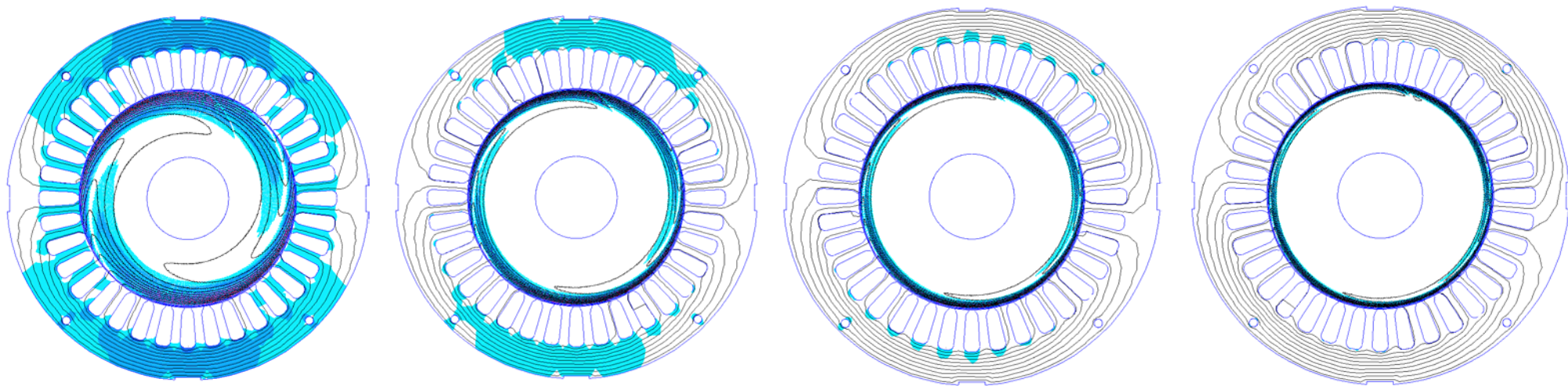


Figura 9.40. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 3°. Permeabilidad relativa 15000.

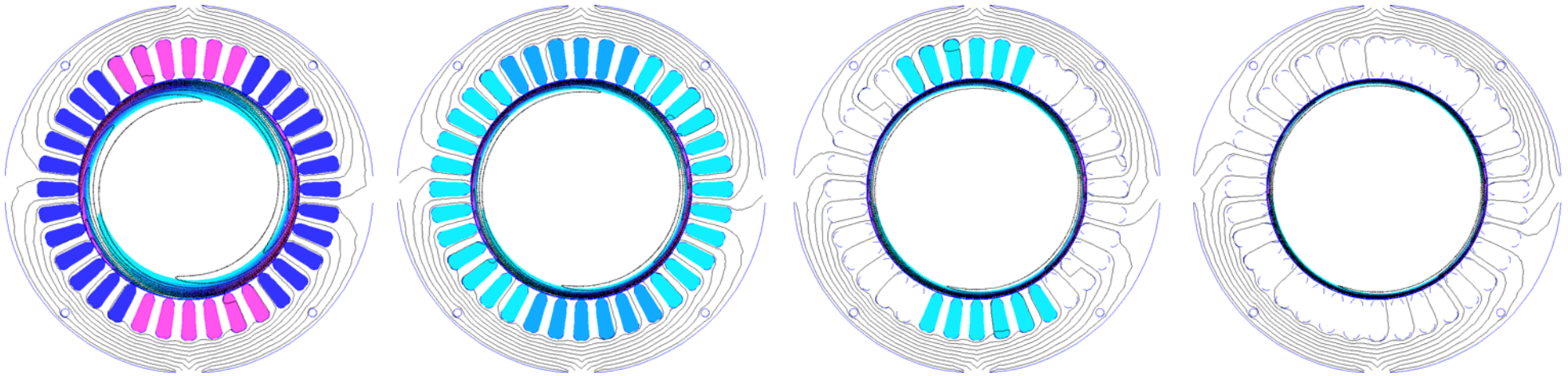


Figura 9.41. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 1°. Permeabilidad relativa 15000.

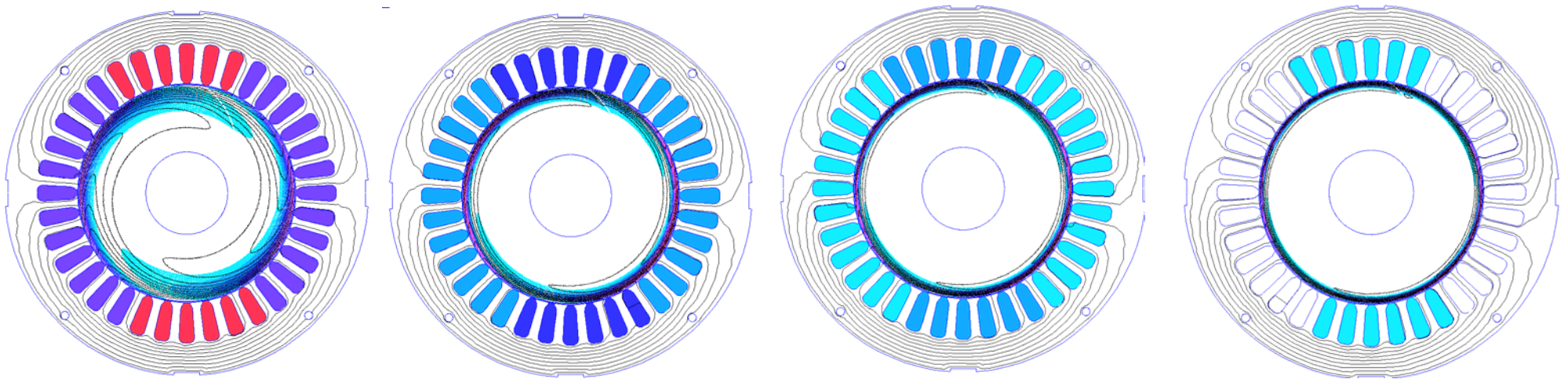


Figura 9.42. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Curva chapas 3°. Permeabilidad relativa 15000.

9.2.2.3 Motor con rotor de chapas en espiral tipo C

Finalmente nos falta comparar los modelos construidos con el prototipo C. Siendo el método empleado para la fabricación de este rotor sustancialmente diferente del resto de los 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 sin aislar de 0.35 mm de espesor con unas pérdidas de 0.45 W/kg a 1 T y de 0.94 W/kg a 1.5 T. El acabado final asimismo se realizó 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 al modelo A.

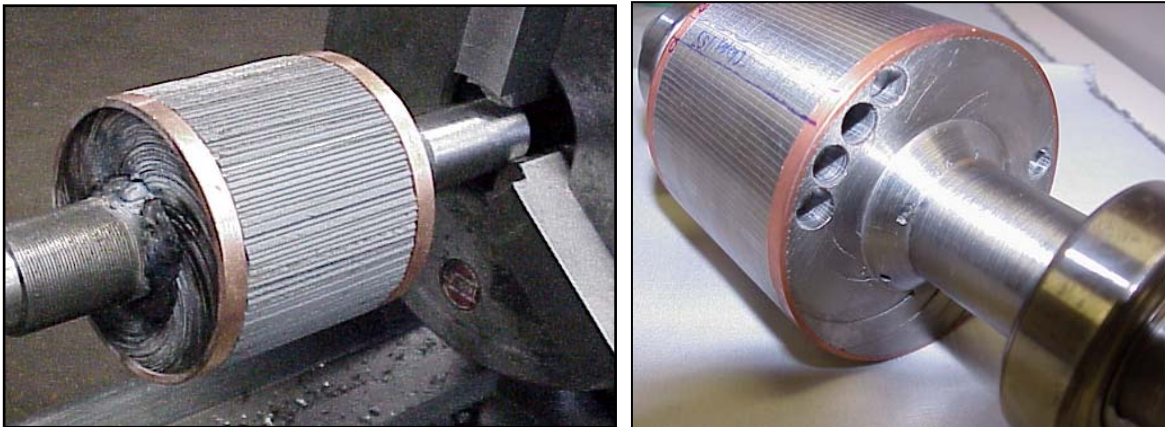


Figura 9.43. Rotor de chapas tipo C. Detalles del rotor antes y después de ser mecanizado.

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, ¿variarían los resultados por este concepto?, etc.

Eran pues muchas las preguntas a las que deberíamos dar respuesta, ya que aunque parecido al resto de los rotores, en él se habían dispuesto una serie de modificaciones que nos permitirían estudiar materiales, formas constructivas, separación de las chapas, etc.

Dejar el núcleo sin mecanizar, con aristas, ya ha sido analizado en este capítulo, siendo este rotor, junto con el Z, y con un prototipo, en los que nos basamos para obtener conclusiones sobre este punto. Por tanto, ahora vamos a entrar en el estudio de los materiales y formas constructivas.

9.2.2.3.1 Efecto del material de las chapas del rotor en las magnitudes electromagnéticas

Para realizar este análisis nos basaremos en simulaciones que después intentaremos contrastar con los valores obtenidos mediante los ensayos experimentales. Se ha optado por simular el modelo que mejores características presentaba, el modelo A, para dar respuesta a mejoras futuras del mismo.

Así se han confeccionado una serie de simulaciones encaminadas en principio a obtener el mejor material posible dadas: la configuración de las chapas, su número (150), su espesor (0.5 mm) y realizadas las pruebas con una frecuencia de deslizamiento de 3.33 Hz, que equivale para el motor ensayado de 3000 rpm a una velocidad de 2800 rpm.

En primer lugar, se escogieron unas permeabilidades relativas, y para cada una de ellas se realizó un análisis de conductividad, dejando los restantes parámetros inalterables. Posteriormente se eligió de cada una de las anteriores series la conductividad que presentaba un par más elevado, realizándose una tabla de de valores óptimos.

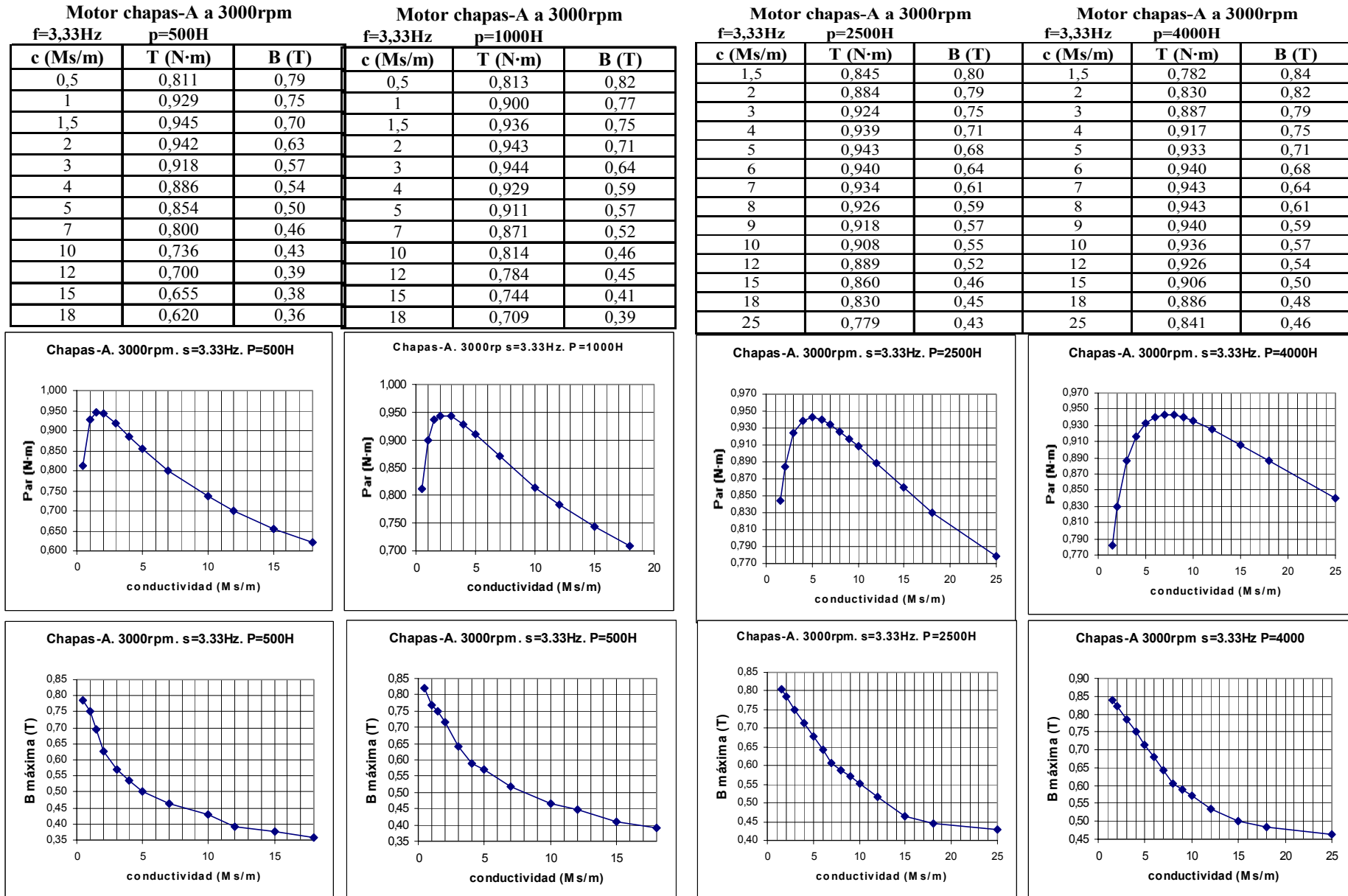


Figura 9.44. Tablas y gráficas correspondientes a permeabilidades relativas de 500, 1000, 2500 y 4000.

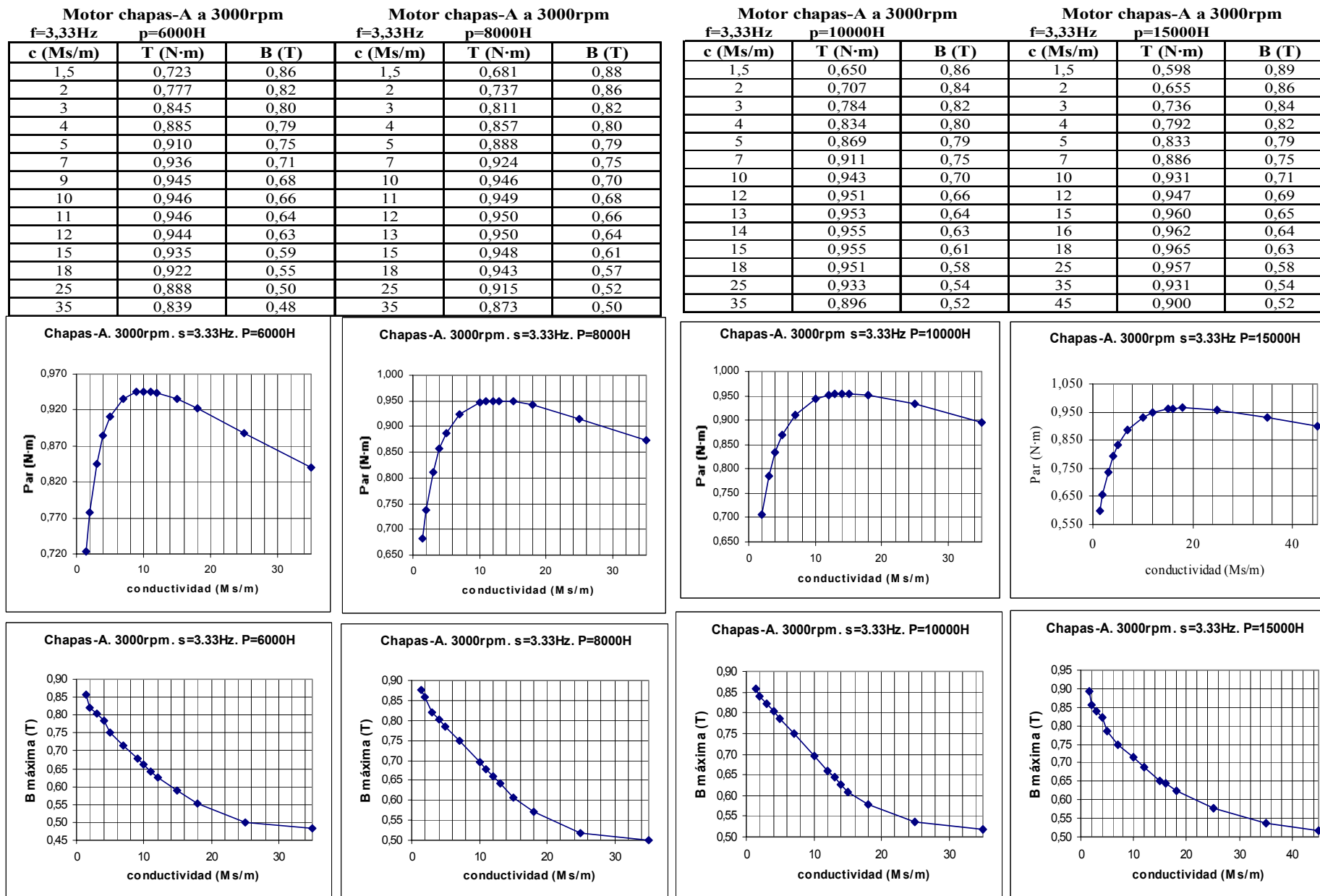


Figura 9.45. Tablas y gráficas correspondientes a permeabilidades relativas de 6000, 8000, 10000 y 15000.

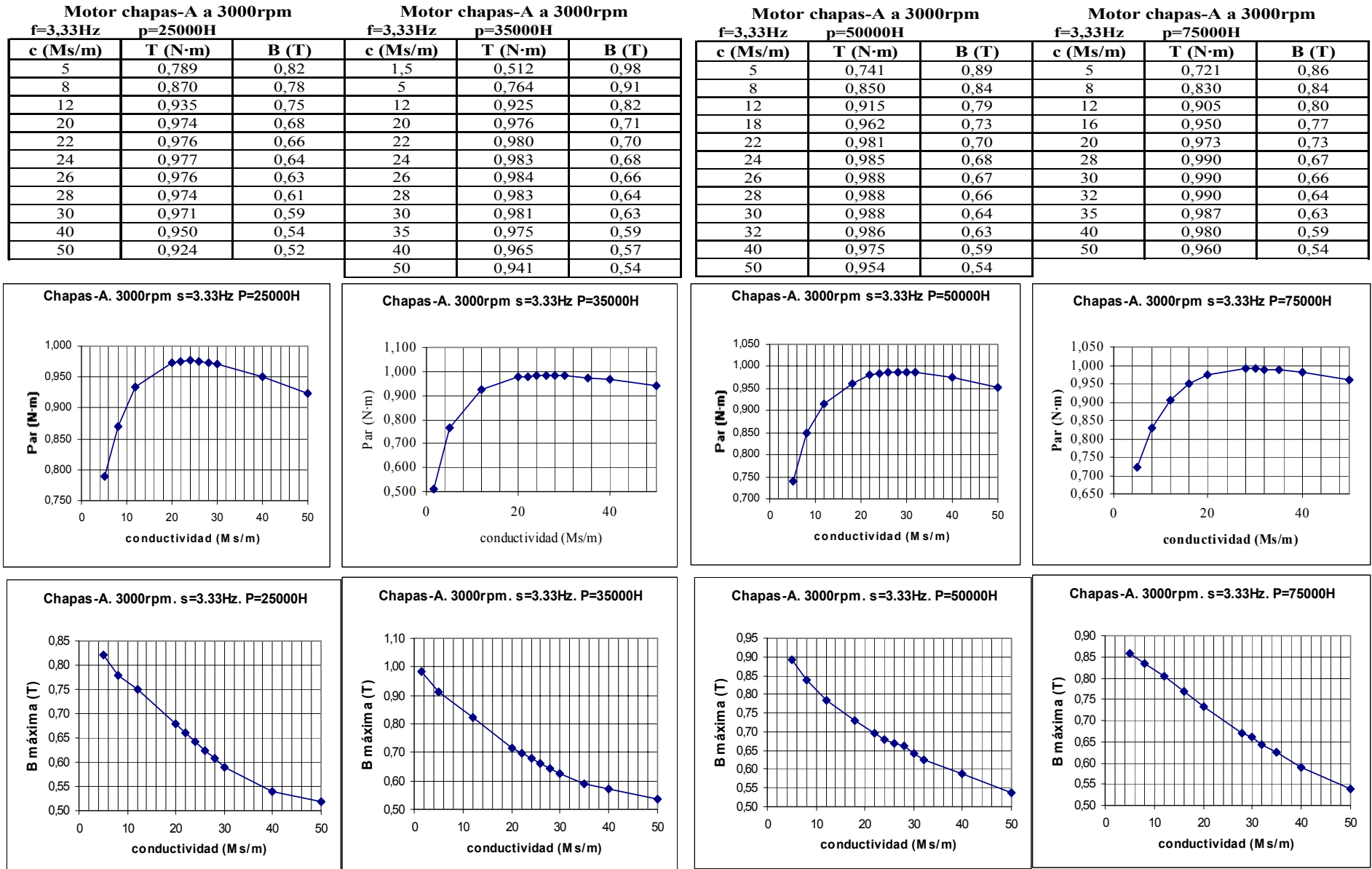


Figura 9.46. Tablas y gráficas correspondientes a permeabilidades relativas de 25000, 35000, 50000 y 75000.

De las figuras y tablas de las conductividades anteriores (figuras 9.44 a 9.46), se extrae una serie de valores de par e inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad, realizándose una serie para cada permeabilidad relativa. De entre todas las conductividades de cada serie se escogió la que daba un par máximo más elevado, pudiéndose apreciar los resultados en la siguiente figura.

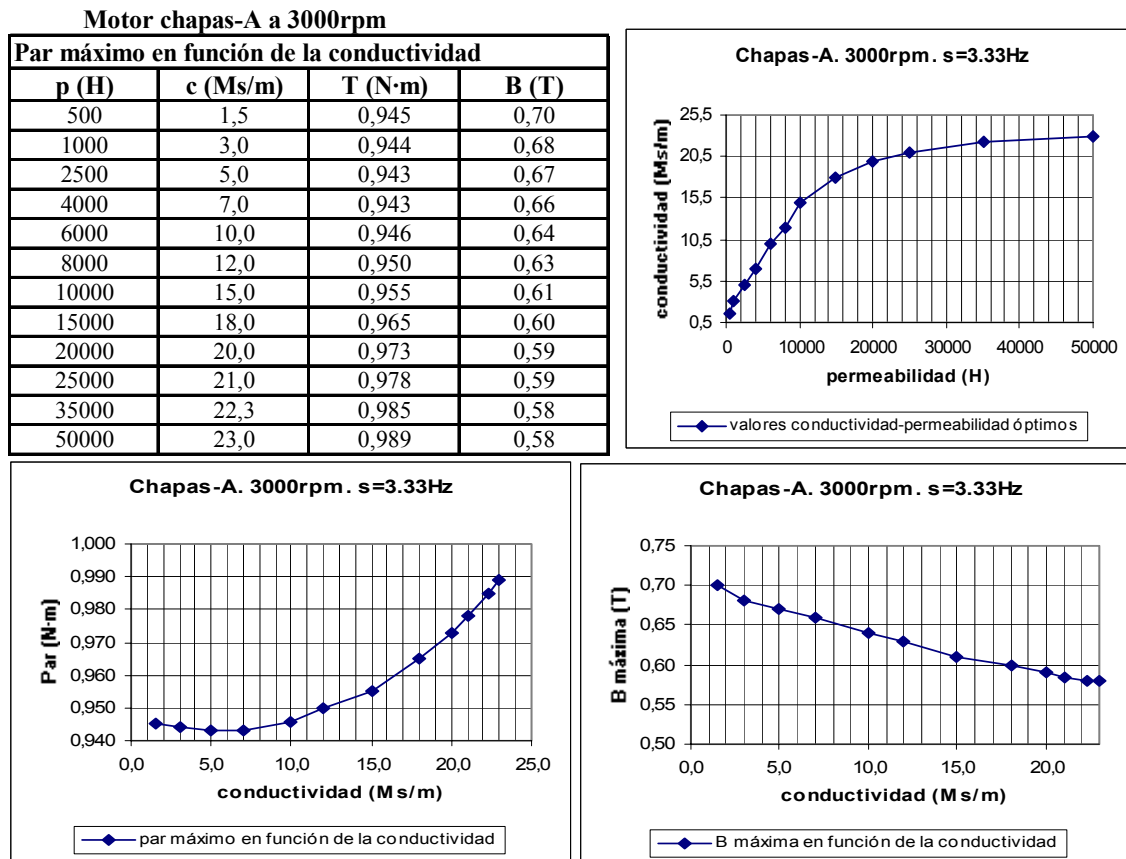


Figura 9.47. Resumen de par e inducción máxima en el entrehierro a diferentes conductividades.

Se extraen algunas primeras consecuencias de estos valores. En primer lugar se aprecia que a medida que aumenta la permeabilidad relativa del material utilizado en las chapas del rotor, el par máximo se obtiene con conductividades de material mayores.

Asimismo, vemos que hasta una conductividad del orden de unos 10 MS/m los valores de par hallados son prácticamente constantes. Es a partir de esta conductividad cuando el par empieza a aumentar, aunque de forma muy tímida. Por tanto, no es tan importante el material de las chapas que utilicemos, siempre que sepamos buscar la relación óptima permeabilidad-conductividad.

La ecuación que nos define la conductividad óptima (en función de la permeabilidad de la chapa que utilicemos) para hallar el par máximo viene definida por la siguiente ecuación (*c*, en MS/m).

$$c_{par\ máximo} = -6 \cdot 10^{-18} \cdot \mu_r^4 + 1 \cdot 10^{-12} \cdot \mu_r^3 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_r^2 + 0.0019 \cdot \mu_r + 0.6642 \quad [9.29]$$

Siendo la ecuación del par máximo en función de la conductividad (MS/m):

$$T_{par\ máximo} = 0.0002 \cdot c^2 - 0.0017 \cdot c + 0.9478 \quad [9.30]$$

Por su parte, la inducción máxima en el entrehierro vendrá definida en función de la conductividad por

$$B_{máxima} = 9 \cdot 10^{-5} \cdot c^2 - 0.0077 \cdot c + 0.7074 \quad [9.31]$$

Si ahora representamos todas las series de datos en un mismo gráfico vemos que se cumple la evolución del par máximo y la inducción máxima dada en la figura 9.47.

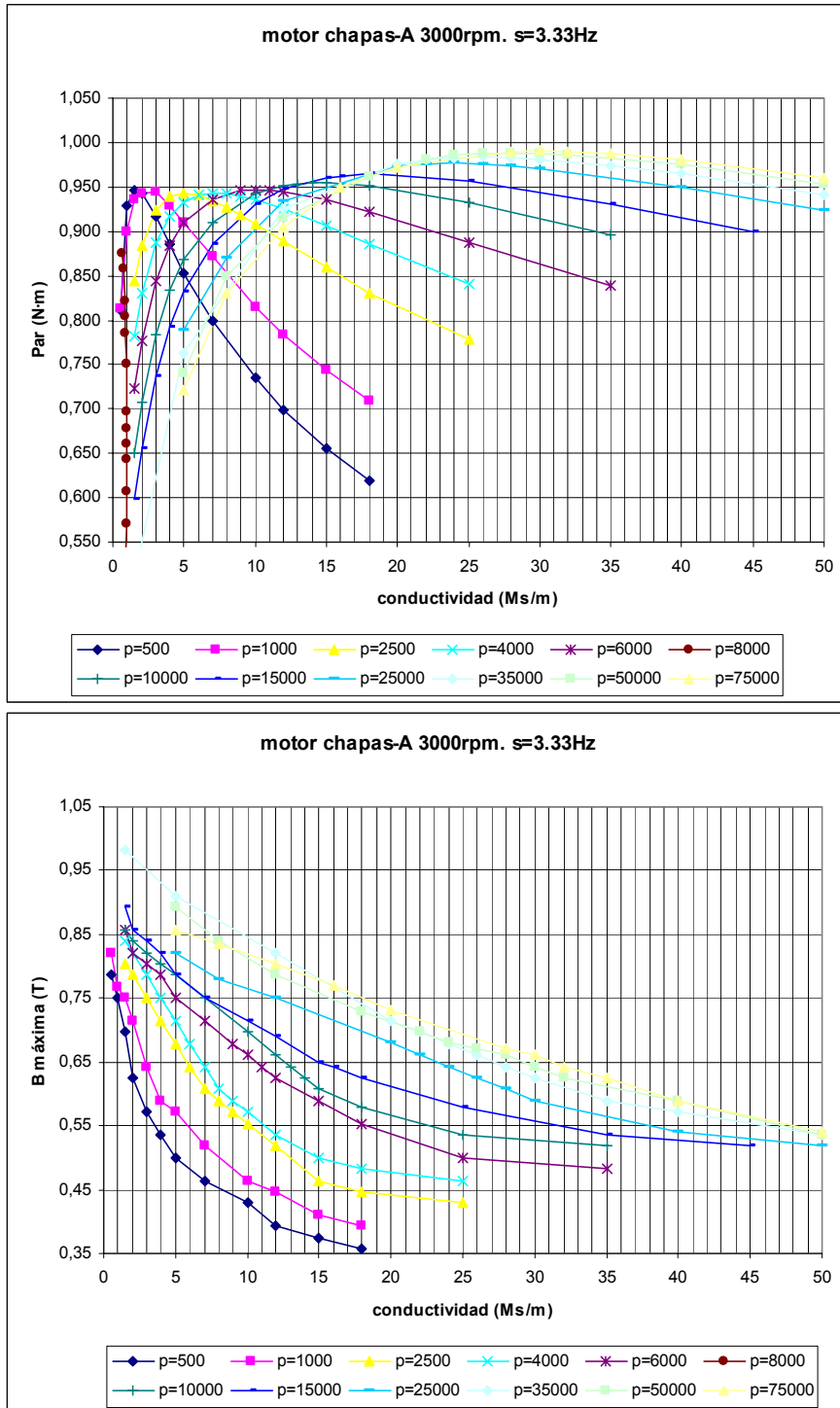


Figura 9.48. Evolución del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para cada una de las permeabilidades relativas analizadas.

Una vez hallada la conductividad óptima para una determinada permeabilidad, cabe preguntarnos: ¿si con cada una de estas conductividades óptimas variamos la permeabilidad de las chapas alcanzaremos valores de par mayores? Para responder a esta hipótesis, volvimos a realizar unas series de simulaciones pero ahora manteniendo las conductividades óptimas y variando las permeabilidades.

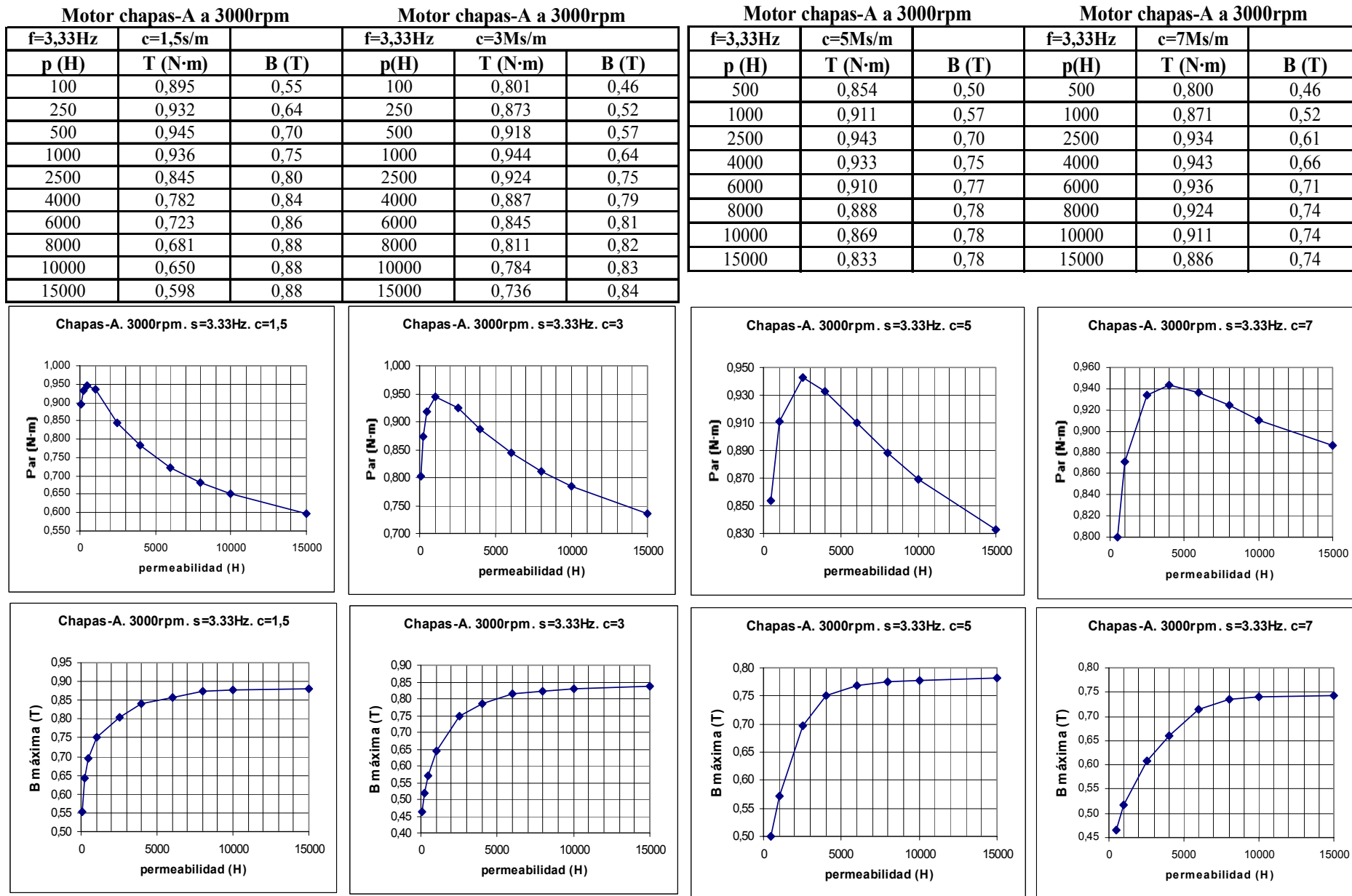


Figura 9.49. Tablas y gráficas correspondientes a conductividades de 1.5 MS/m, 3 MS/m, 5 MS/m, y 7 MS/m.

Motor chapas-A a 3000rpm			Motor chapas-A a 3000rpm			Motor chapas-A a 3000rpm			Motor chapas-A a 3000rpm		
f=3,33Hz	c=10Ms/m		f=3,33Hz	c=12Ms/m		f=3,33Hz	c=15Ms/m		f=3,33Hz	c=18Ms/m	
p (H)	T (N·m)	B (T)	p(H)	T (N·m)	B (T)	p (H)	T (N·m)	B (T)	p(H)	T (N·m)	B (T)
500	0,736	0,43	500	0,700	0,39	500	0,655	0,38	500	0,620	0,36
1000	0,814	0,46	1000	0,784	0,45	1000	0,744	0,41	1000	0,709	0,39
2500	0,908	0,57	2500	0,889	0,52	2500	0,860	0,46	2500	0,830	0,45
4000	0,936	0,63	4000	0,926	0,59	4000	0,906	0,50	4000	0,886	0,50
6000	0,946	0,66	6000	0,944	0,63	6000	0,935	0,55	6000	0,921	0,54
8000	0,946	0,70	8000	0,950	0,66	8000	0,948	0,59	8000	0,941	0,57
10000	0,943	0,71	10000	0,951	0,68	10000	0,955	0,61	10000	0,951	0,59
15000	0,931	0,73	15000	0,947	0,72	15000	0,960	0,66	15000	0,965	0,64
20000	0,920	0,73	20000	0,941	0,74	20000	0,959	0,70	20000	0,968	0,68
30000	0,904	0,74	30000	0,930	0,74	30000	0,955	0,73	30000	0,970	0,71
						40000	0,951	0,74	40000	0,969	0,73

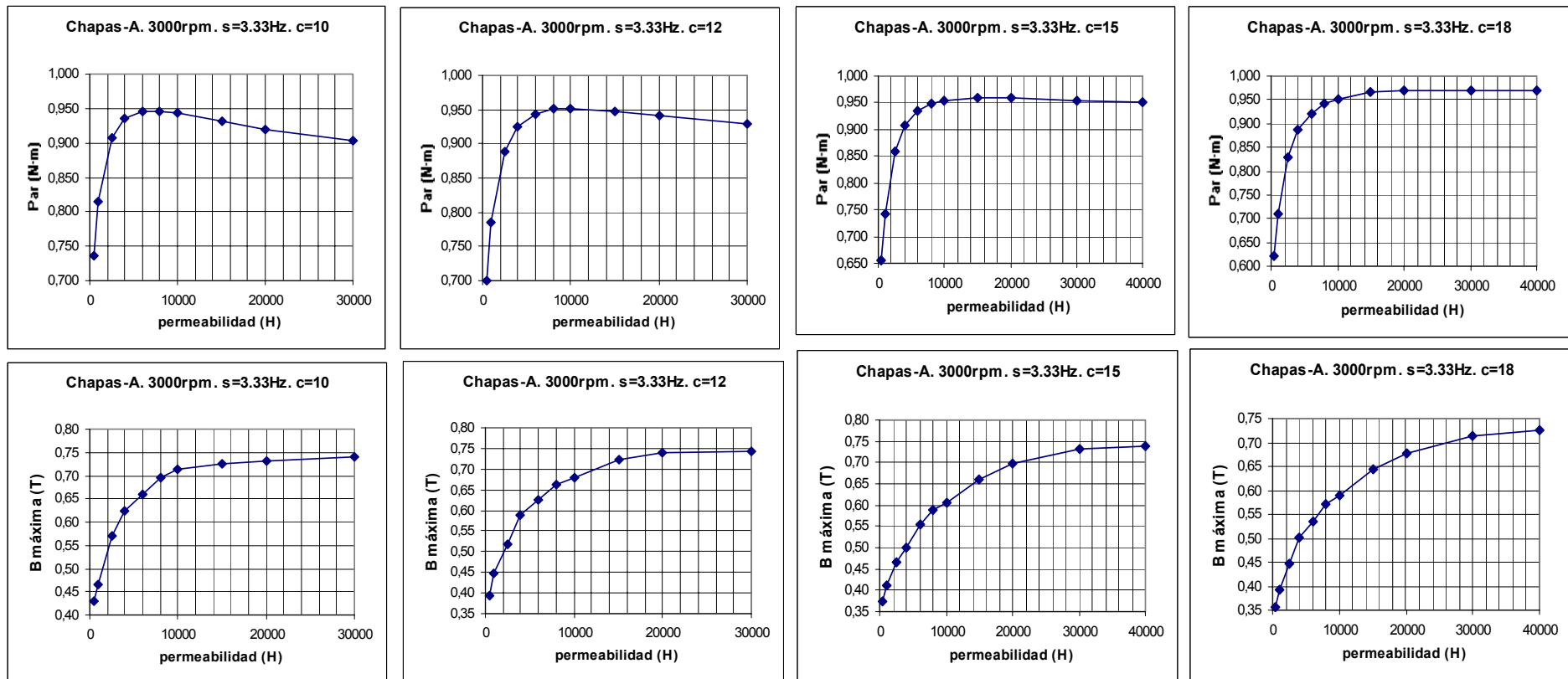


Figura 9.50. Tablas y gráficas correspondientes a conductividades de 10 MS/m, 12 MS/m, 15 MS/m, y 18 MS/m.

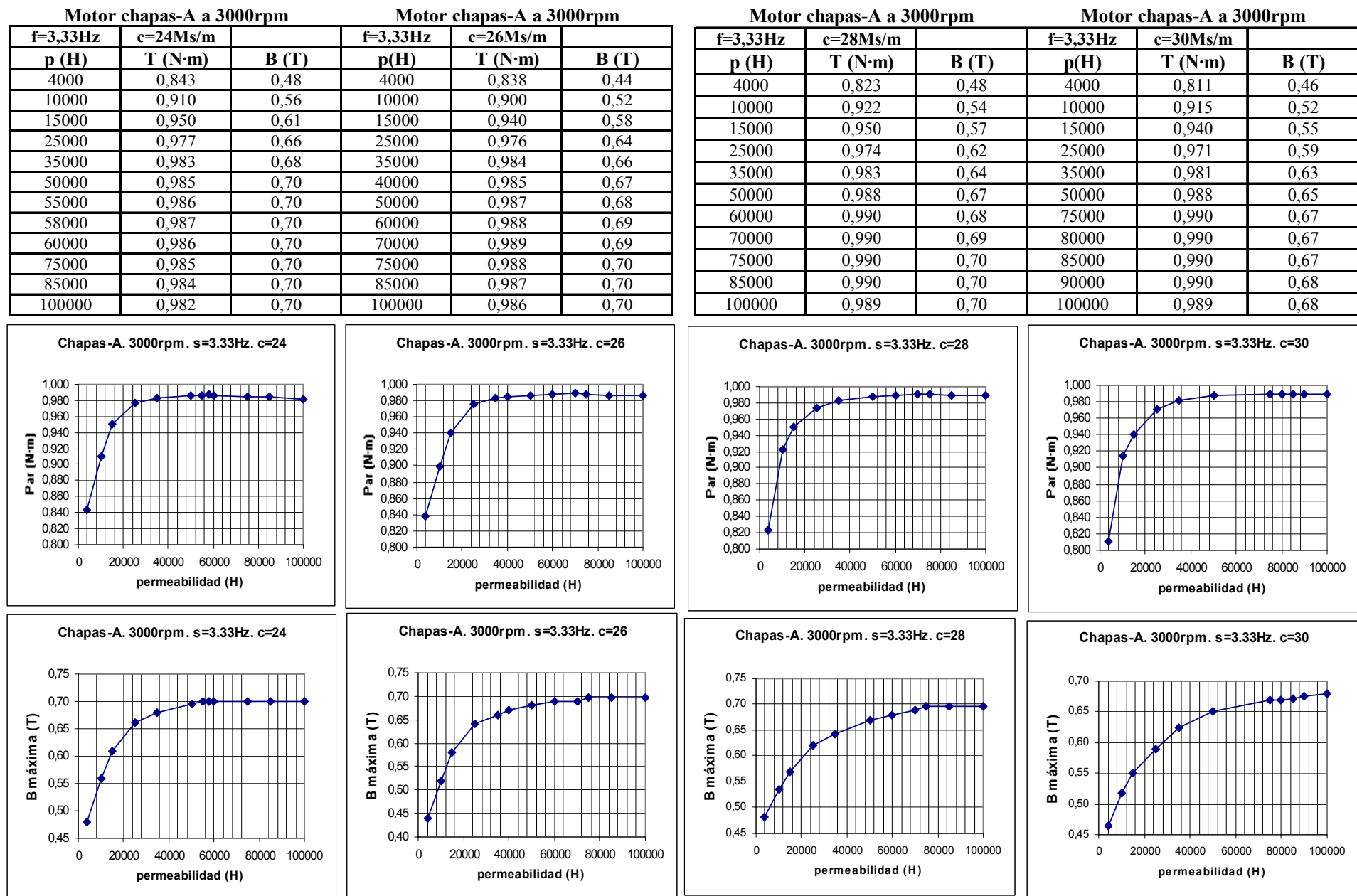


Figura 9.51. Tablas y gráficas correspondientes a conductividades de 24 MS/m, 26 MS/m, 28 MS/m, y 30 MS/m.

De las figuras y tablas de las permeabilidades (figuras 9.49, a 9.51), se extraen los resultados parciales del par e inducción máxima en el entrehierro variando permeabilidades para cada conductividad óptima. De entre todas las permeabilidades relativas se escogió la que ofrecía un par máximo más elevado, pudiéndose apreciar los resultados en las siguientes figuras.

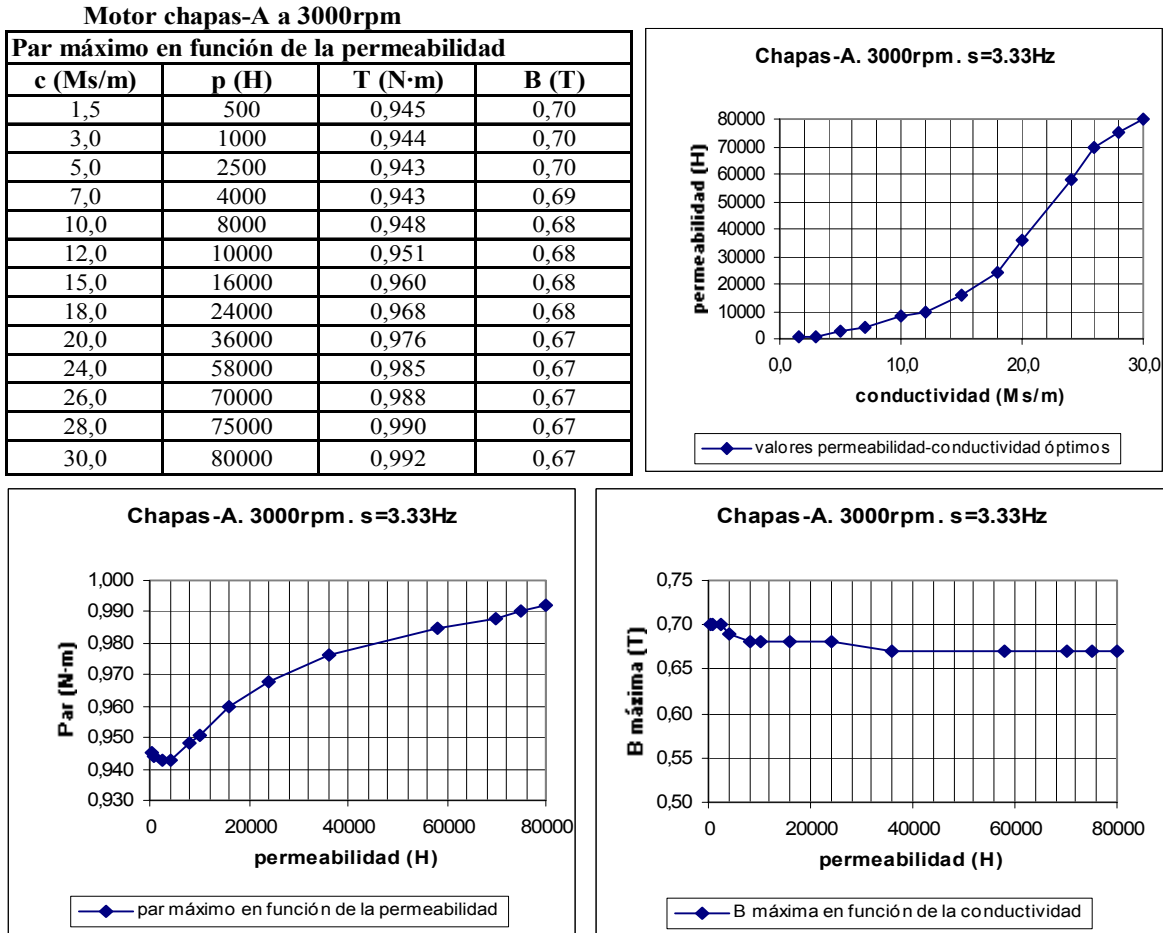


Figura 9.52. Resumen de par e inducción máxima en el entrehierro a diferentes permeabilidades.

También en esta ocasión a medida que aumenta la permeabilidad del material utilizado en las chapas del rotor, el punto óptimo de rendimiento máximo se obtiene con conductividades de material mayores.

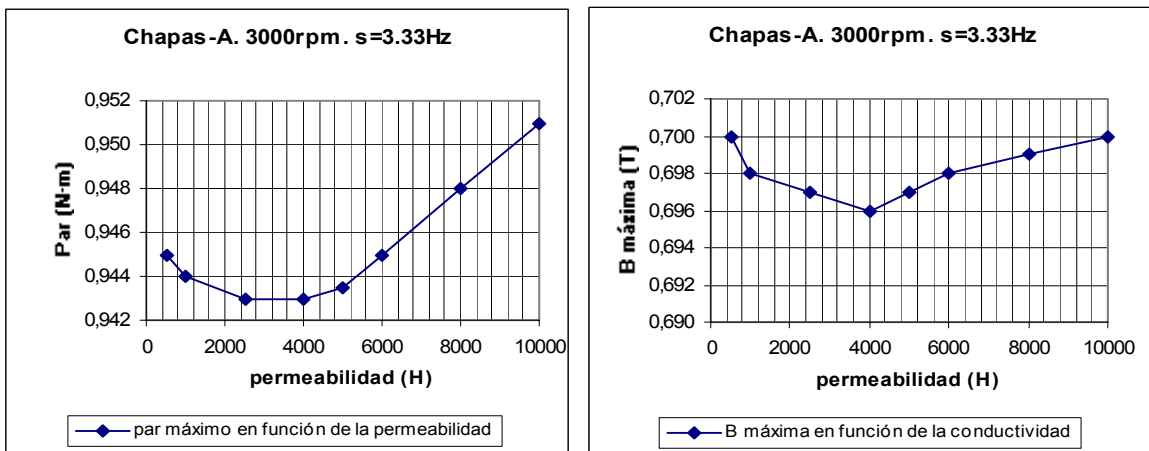


Figura 9.53. Ampliación del primer tramo de la curva de par e inducción máxima en el entrehierro a diferentes permeabilidades relativas.

Si realizamos una ampliación (figura 9.52) del primer tramo de la curva del par y de la inducción en el entrehierro, observamos que el comportamiento del par y la inducción siguen una evolución diferencial respecto al resto de la curva. Hasta una permeabilidad relativa de 4000, un aumento de la permeabilidad significa un decremento del par y de la inducción. Aunque como puede apreciarse las variaciones son insignificantes.

En el resto de la curva el comportamiento es normal, a más permeabilidad más par. En esta ocasión también vemos que no es necesario preocuparse excesivamente en obtener chapas de permeabilidades elevadas, ya que de 1000 hasta 80000 el par sólo aumenta en un 5%. Esto es cierto siempre que para cada permeabilidad escogida se adopte la conductividad óptima (figura 9.52).

De la gráfica obtenemos la expresión que nos define la permeabilidad óptima, en función de la conductividad de la chapa que utilizemos para hallar el par máximo.

$$\mu_r \text{ par máximo} = -0.0336 \cdot c^5 + 2.001 \cdot 10^{-4} \cdot c^4 - 36.708 \cdot c^3 + 309.41 \cdot c^2 - 398.61 \cdot c + 356.33 \quad [9.32]$$

Siendo la ecuación del par máximo en función de la permeabilidad relativa:

$$T_{\text{máximo}} = 1 \cdot 10^{-29} \cdot \mu_r^6 - 3 \cdot 10^{-24} \cdot \mu_r^5 + 3 \cdot 10^{-19} \cdot \mu_r^4 - 1 \cdot 10^{-14} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-10} \cdot \mu_r^2 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot \mu_r + 0.9448 \quad [9.33]$$

Por su parte la inducción máxima en el entrehierro vendrá definida en función de la permeabilidad por:

$$B_{\text{máxima}} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot \mu_r^2 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot \mu_r + 0.6968 \quad [9.34]$$

Si representamos todas las series de datos (para una determinada conductividad, como evoluciona el par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la permeabilidad) en una misma gráfica vemos que se cumple la evolución del par máximo dada en la figura 9.52.

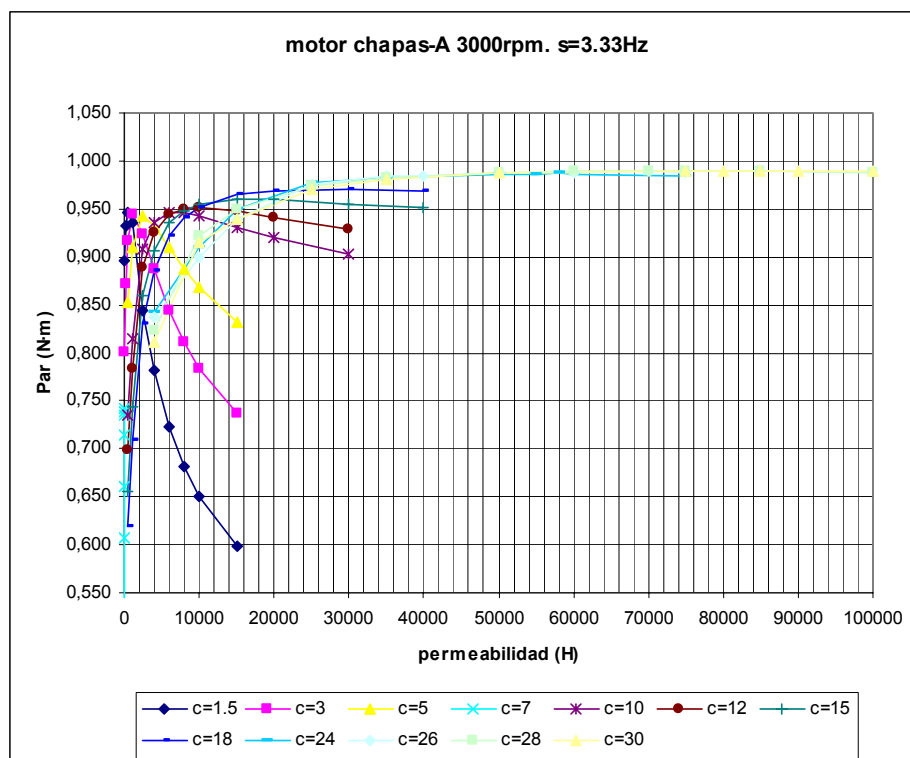


Figura 9.54. Evolución del par en función de la permeabilidad relativa para cada una de las conductividades simuladas.

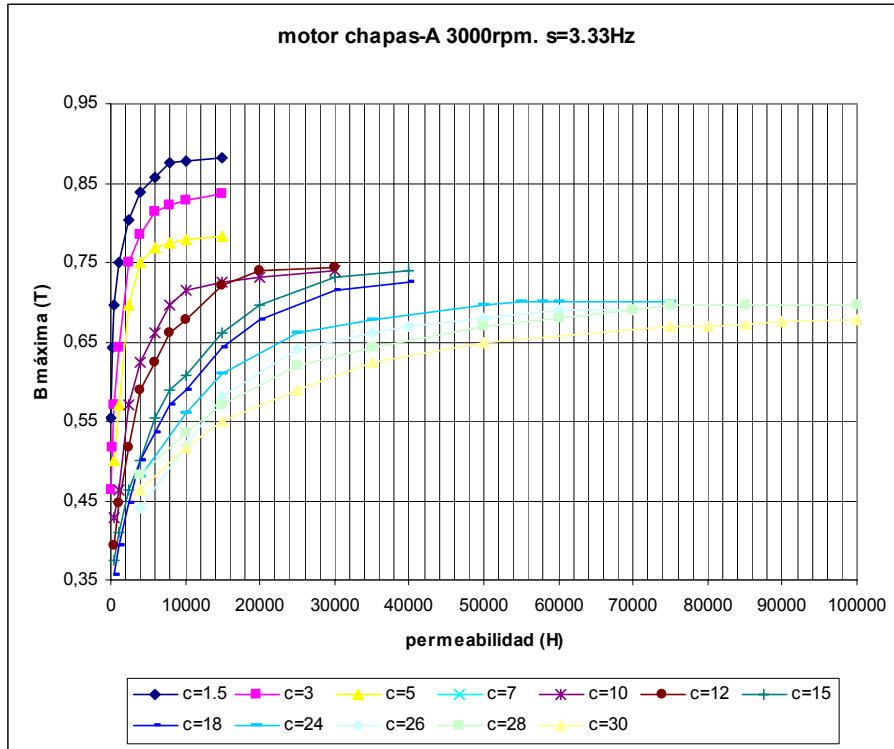


Figura 9.55. Evolución de la inducción máxima en el entrehierro en función de la permeabilidad relativa para cada una de las conductividades simuladas.

Una ampliación del primer tramo de la curva resumen (figura 9.54) nos ofrece con más detalle como evoluciona el par máximo en función de los diversos valores de la permeabilidad, aunque estas variaciones son mínimas.

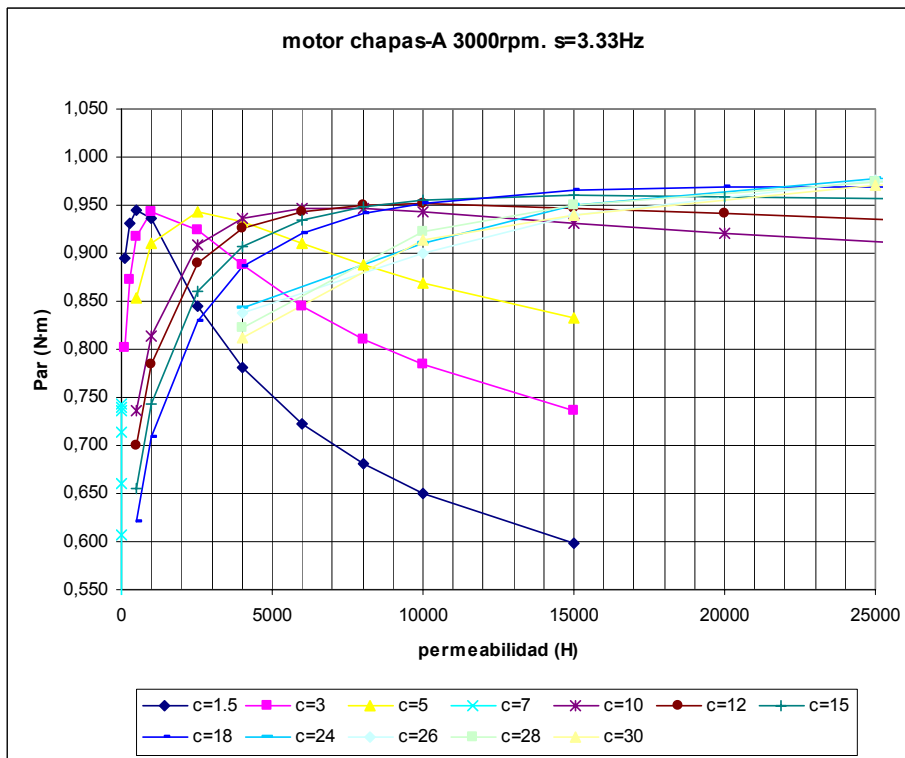


Figura 9.56. Ampliación de la evolución del par máximo en el entrehierro en función de la permeabilidad relativa para cada una de las conductividades simuladas.

9.2.2.3.2 Efecto del material de las chapas del rotor sobre el campo magnético

Ya sabemos, para un determinado tipo de rotor (en este estudio el *A*), como se modifican sus resultados electromagnéticos si las chapas tienen diferentes características eléctricas y magnéticas. Pero en la forma del campo magnético ¿cómo influyen estos cambios?

Vayamos por partes, en primer lugar se muestran cuatro series de motores equipados con rotores de chapas de permeabilidades relativas de 4000, 8000, 15000 y 35000. De cada serie se ofrece asimismo, cuatro imágenes con motores equipados con rotores de chapas con conductividades diversas (1.5, 4, 10 y 25 MS/m).

Para una misma permeabilidad relativa se ha aumentado la conductividad de las chapas del rotor, observándose dos efectos: por una parte, las corrientes son más superficiales, demostrándose asimismo que al aumentar la conductividad, el campo creado por el rotor se incrementa lo se traduce en un campo neto más débil. Este fenómeno sólo es posible si existe un gran desfase entre el campo creado por el estator y el campo creado por el rotor de chapas, originando este desfase un cambio en los valores de la resistencia y reactancia del rotor

La variación del campo neto respecto a la conductividad es una medida importante a tener presente. Así una conductividad más elevada implica una carga más inductiva, la cual generará más potencia reactiva. La optimización en la selección de los materiales pasa por evaluar el producto de la intensidad primaria por el factor de potencia del motor, siendo este parámetro de suma importancia ya que es aplicable a todos los componentes del motor lo que permite optimizar los materiales constructivos dependiendo de los usos finales a los que vaya destinado dicho motor.

Suponiendo una pequeña variación de reactancia en el rotor, como ocurre cuando la frecuencia de deslizamiento es de bajo valor, podemos aproximar la variación del ángulo de fase entre la intensidad del rotor y la fuerza electromotriz mediante la siguiente ecuación:

$$|I| \propto \frac{1}{X_{rotor}} - \frac{1}{2 \cdot X_{rotor}^3} \cdot R_{rotor}^2 \quad [9.35]$$

Las secciones entre las chapas del rotor que contienen aire resultan decisivas en la creación de la reluctancia característica del motor. Este fenómeno facilita una rápida respuesta en los transitorios lo que resulta de sumo interés. Por su parte, la alta reluctancia viene acompañada por una baja inercia que supone una constante eléctrica y mecánica de bajo valor.

Si ahora analizamos la repercusión de construir el rotor con chapas de mayores permeabilidades para un mismo valor de conductividad, el proceso es parecido. Si el circuito magnético presenta una alta permeabilidad, la reluctancia será baja y en consecuencia el flujo magnético será mayor, quedándose estas líneas de flujo más cerca de la superficie.

En las figuras 9.57-9.60, se observa este proceso para unos valores de permeabilidad relativa de 4000, 8000, 15000 y 35000. Para cada una de estas permeabilidades se ofrecen las imágenes correspondientes a los rotores de chapas con conductividades de 1.5, 4, 10 y 25 MS/m.

Seguidamente, en las figuras 9.61-9.64, se observa el mismo proceso pero ahora con unas chapas de conductividades de valor 3, 7, 15 y 35 MS/m. Para cada una de estas conductividades se ofrece las imágenes correspondientes a los rotores con chapas de permeabilidades relativas de 1000, 2500, 6000 y 10000.

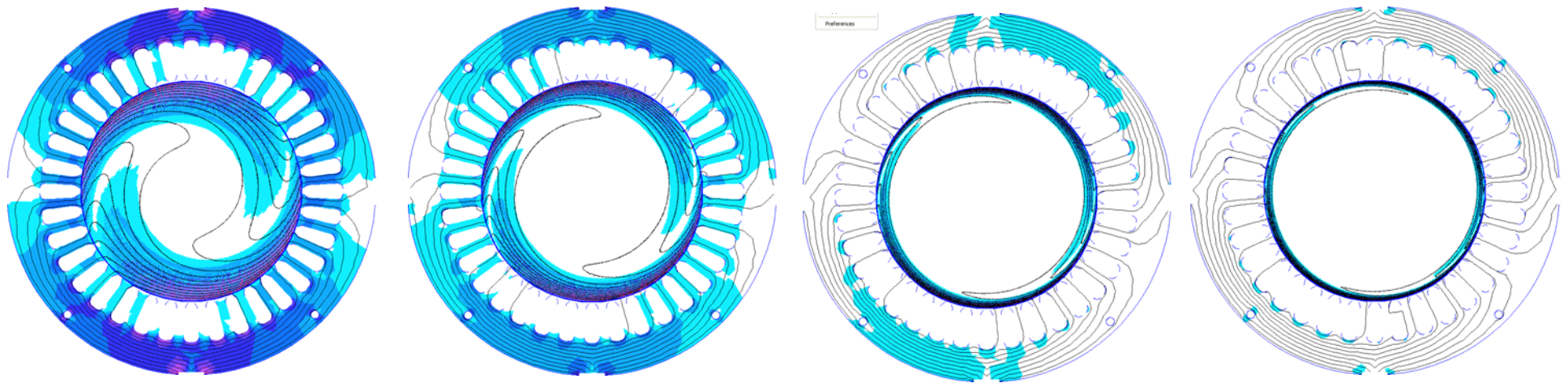


Figura 9.57. Campos magnéticos para permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 0.5 MS/m, 1.5 MS/m, 10 MS/m y 25MS/m

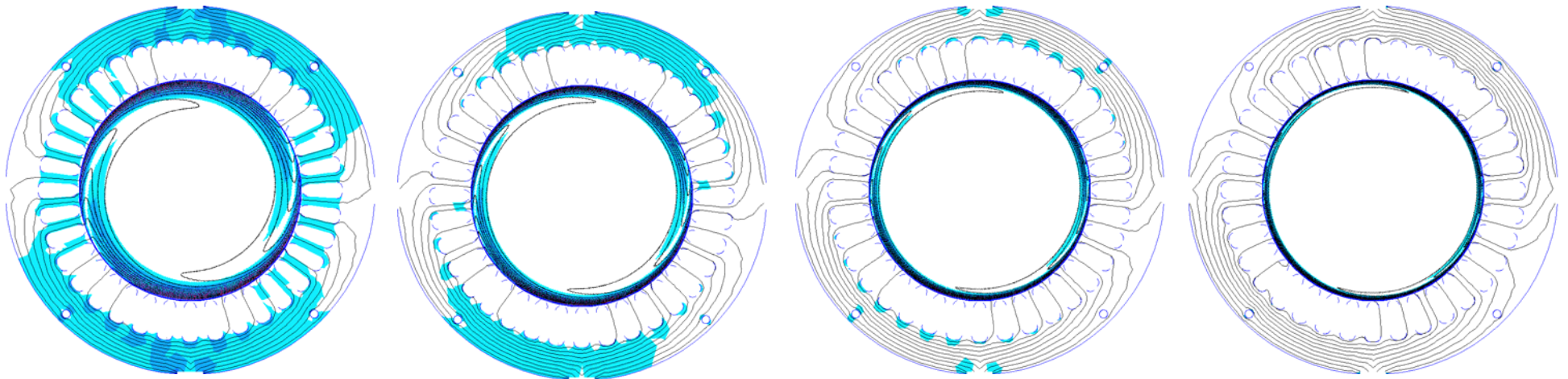


Figura 9.58. Campos magnéticos para permeabilidad relativa de 8000 y conductividades de 1.5 MS/m, 4 MS/m, 10 MS/m y 25 MS/m

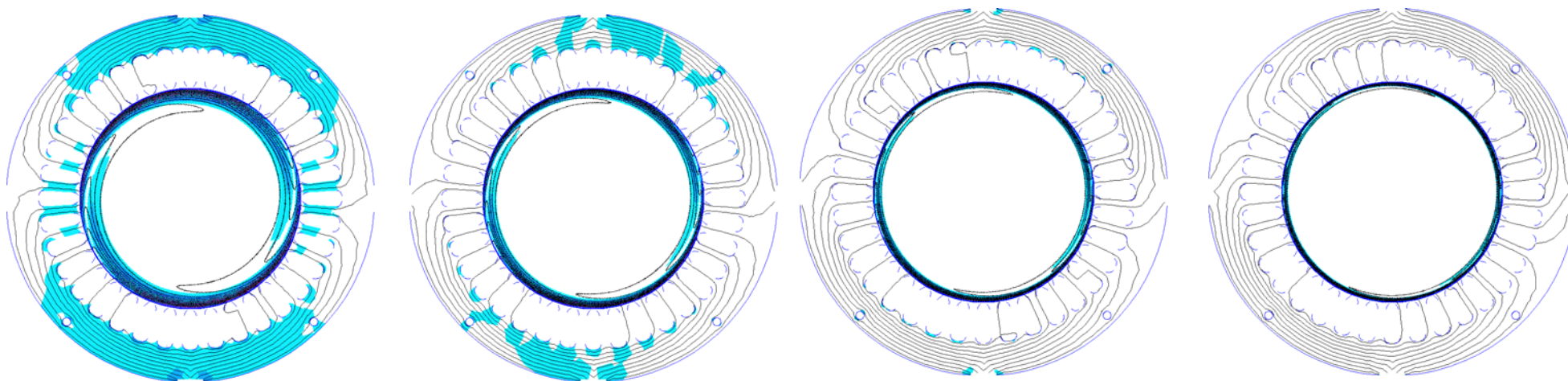


Figura 9.59. Campos magnéticos para permeabilidad relativa de 15000 y conductividades de 1.5 MS/m, 4 MS/m, 10 MS/m y 25 MS/m

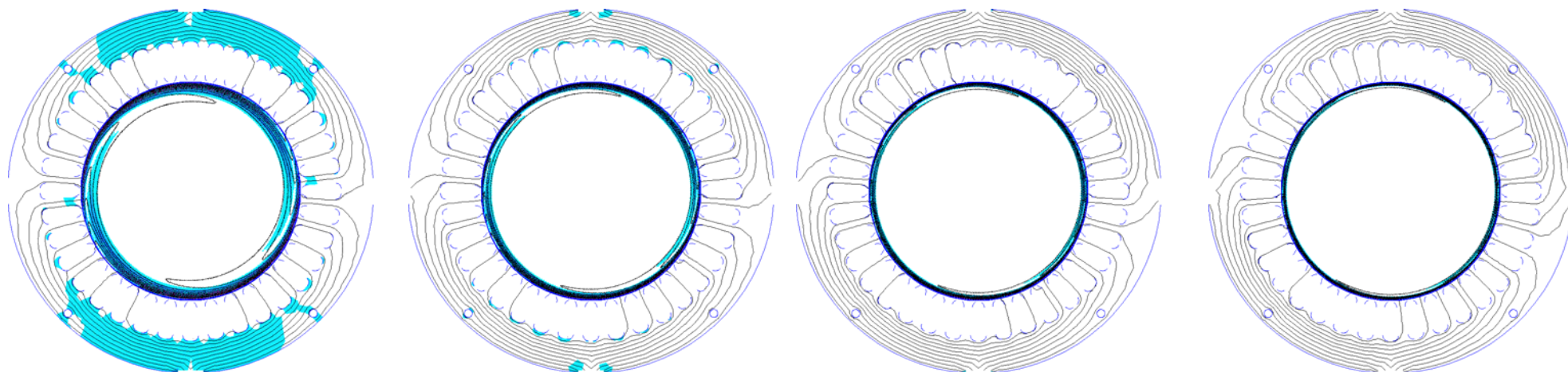


Figura 9.60. Campos magnéticos para permeabilidad relativa de 35000 y conductividades de 1.5 MS/m, 4 MS/m, 10 MS/m y 25 MS/m

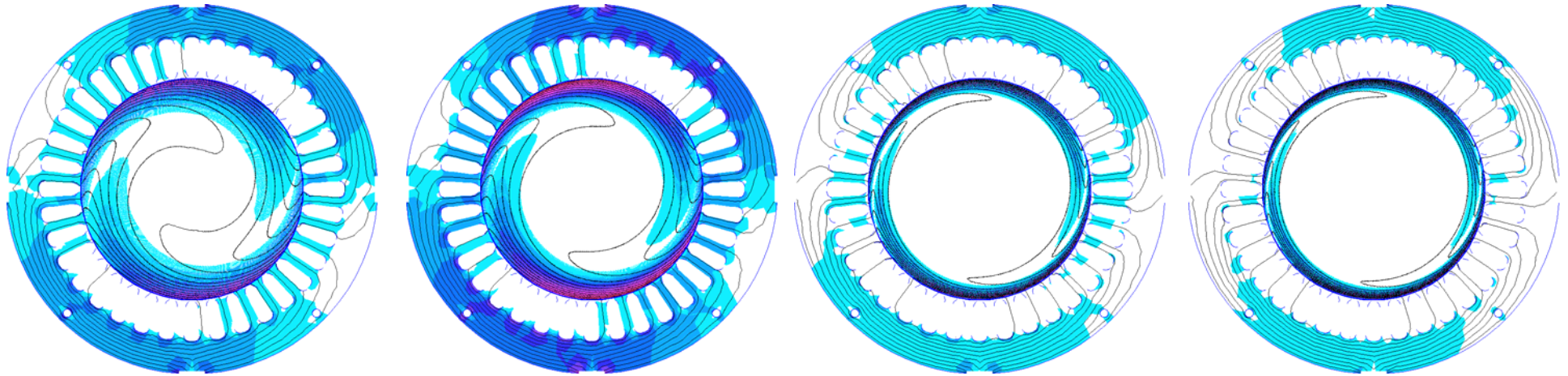


Figura 9.61. Campos magnéticos para conductividad de 3 MS/m y permeabilidades relativas de 500, 1000, 6000 y 10000.

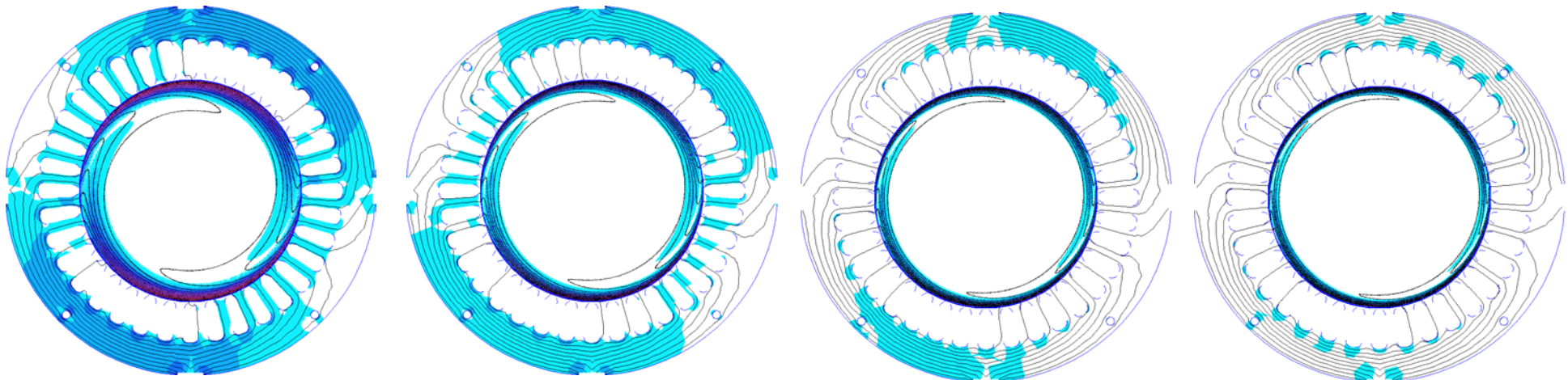


Figura 9.62. Campos magnéticos para conductividad de 7 MS/m y permeabilidades relativas de 1000, 2500, 6000 y 10000.

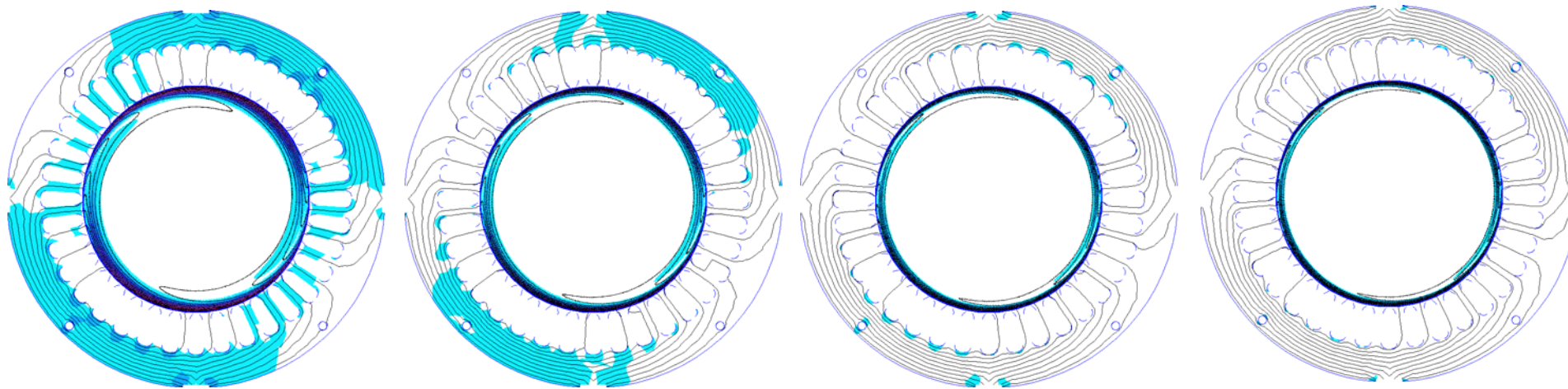


Figura 9.63. Campos magnéticos para conductividad de 15 MS/m y permeabilidades relativas de 1000, 2500, 6000 y 10000.

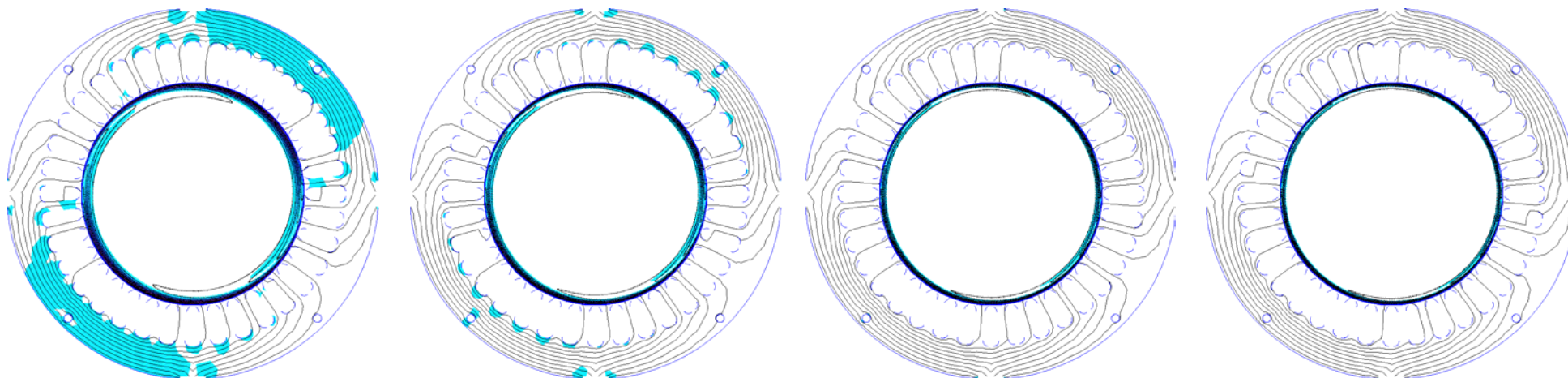


Figura 9.64. Campos magnéticos para conductividad de 35 MS/m y permeabilidades relativas de 1000, 2500, 6000 y 10000.

En cuanto a las figuras 9.57-9.64 dedicadas a los cambios de permeabilidad en las chapas, se aprecia que a medida que la permeabilidad aumenta (para un mismo valor de conductividad) la profundidad que alcanzan las líneas de campo en las chapas del rotor disminuye. Es interesante poder cuantificar esta variación, la cual puede resumirse en la siguiente tabla.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz

p=4000H	profundidad	p=8000H	profundidad	p=15000H	profundidad	p=35000H	profundidad
c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm
0,5	8,00	0,5	5,30	0,5	4,30	0,5	3,80
1,5	4,00	1,5	3,20	1,50	2,50	1,50	2,25
2,0	3,10	2,0	2,60	2,00	2,25	2,00	2,00
3,0	2,50	3,0	2,10	3,00	1,90	3,00	1,70
4,0	2,20	4,0	1,90	4,00	1,65	4,00	1,60
5,0	2,05	5,0	1,80	5,00	1,50	5,00	1,45
7,0	1,75	7,0	1,60	7,00	1,35	7,00	1,25
10,0	1,50	10,0	1,40	10,00	1,20	10,00	1,12
15,0	1,25	15,0	1,20	15,00	1,10	15,00	1,02
25,0	1,00	25,0	1,10	25,00	1,00	25,00	0,90

Tabla IX.X. Profundidad alcanzada al 50% del valor de la inducción máxima en la corona del rotor

Debe comentarse que la corona del rotor representa una línea que va desde el eje del rotor, hasta su radio exterior. En esta línea se ha valorado la inducción máxima alcanzada, y buscando el 50% de este valor, se ha comprobado a cuantos mm, del radio exterior se producía. Es por tanto una medida axial, no siguiendo la curvatura de las chapas. Algunos resultados pueden ser observados en la siguiente figura.

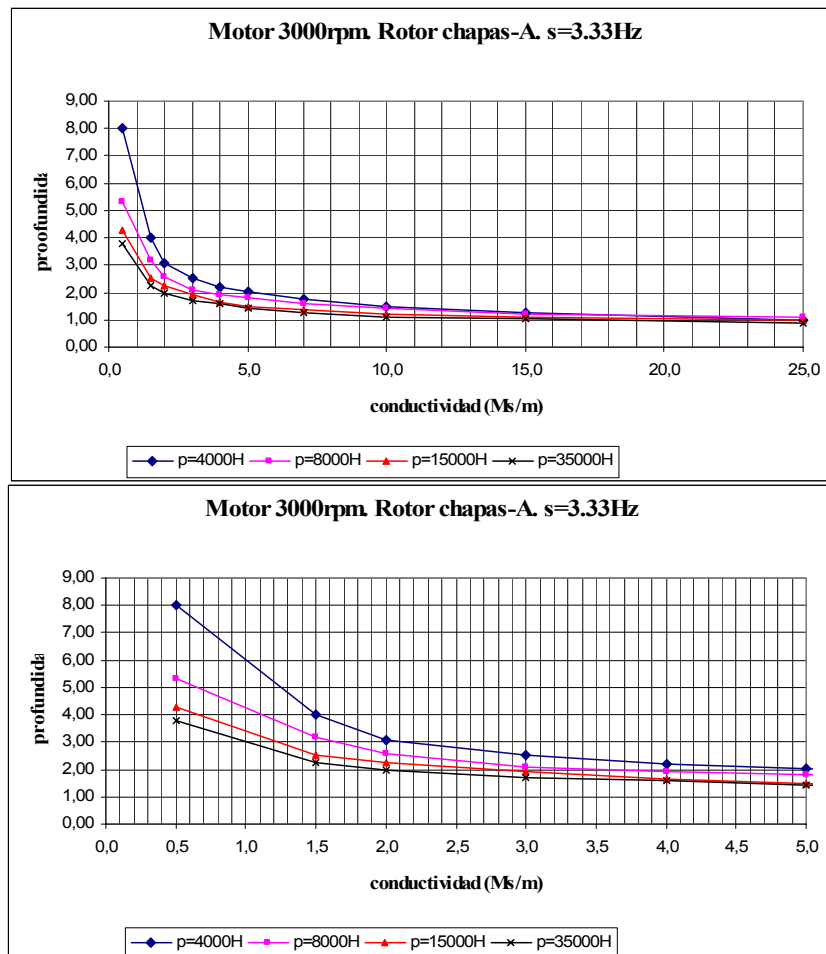


Figura 9.65. Evolución de la profundidad que alcanza el campo magnético en un corte axial del rotor en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades analizadas.

De forma empírica podemos aproximar estas curvas a las siguientes ecuaciones, en el buen entendido que están realizadas para este motor y rotor en concreto.

$$\text{Para } \mu_r = 4000 \quad h = 4.8569 \cdot c^{-0.5176} \quad (\text{mm}) \quad [9.36]$$

$$\text{Para } \mu_r = 8000 \quad h = 3.6024 \cdot c^{-0.4071} \quad (\text{mm}) \quad [9.37]$$

$$\text{Para } \mu_r = 15000 \quad h = 2.9578 \cdot c^{-0.3777} \quad (\text{mm}) \quad [9.38]$$

$$\text{Para } \mu_r = 35000 \quad h = 26723 \cdot c^{-0.3657} \quad (\text{mm}) \quad [9.39]$$

Donde h , representa la profundidad axial desde el entrehierro a la que penetran las líneas de campo magnético en el rotor (mm) y c , la conductividad del material de las chapas del rotor (MS/m).

También resulta interesante cuantificar la distorsión en grados que sufre el campo neto total en función de la conductividad, para ello y siguiendo con los mismos rotores y permeabilidades dadas tendremos la siguiente distribución.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz							
p=4000H	Distorsión	p=8000H	Distorsión	p=15000H	Distorsión	p=35000H	Distorsión
c (Ms/m)	grados	c (Ms/m)	grados	c (Ms/m)	grados	c (Ms/m)	grados
0,5	4,00	0,5	4,50	0,5	5,00	0,5	6,50
1,5	4,78	1,5	5,30	1,50	6,00	1,50	7,66
2,0	5,00	2,0	5,60	2,00	6,50	2,00	8,00
3,0	5,50	3,0	6,40	3,00	7,30	3,00	8,90
4,0	5,80	4,0	7,00	4,00	8,00	4,00	9,59
5,0	6,30	5,0	7,60	5,00	8,60	5,00	10,50
7,0	7,20	7,0	8,60	7,00	10,00	7,00	12,00
10,0	8,30	10,0	9,80	10,00	11,53	10,00	13,49
15,0	9,80	15,0	11,30	15,00	13,20	15,00	15,60
25,0	11,53	25,0	13,10	25,00	14,47	25,00	17,45

Tabla IX.XI. Grados distorsión del campo magnético neto en función de la conductividad.

Si graficamos estos valores se intuye que al aumentar la conductividad, disminuye el valor del ángulo medido respecto a la vertical que representa la distorsión del campo magnético neto.

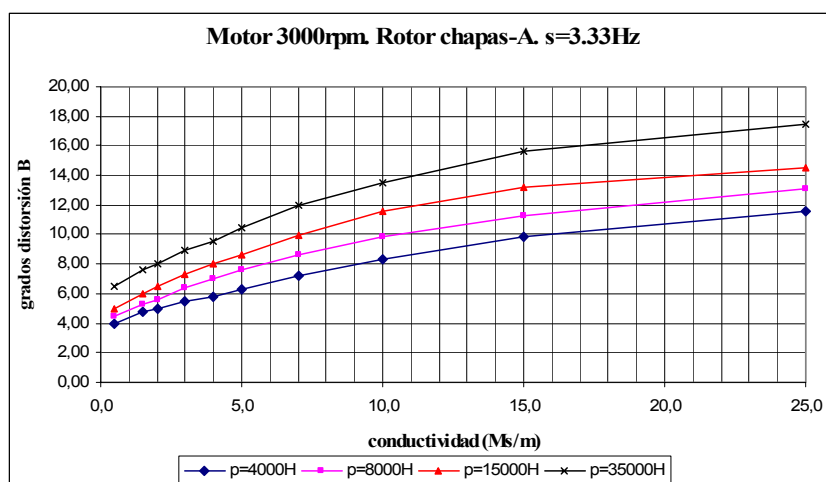


Figura 9.66. Evolución de la distorsión del campo magnético neto en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades analizadas.

A estas curvas, y para nuestro motor en particular, les corresponden las siguientes ecuaciones empíricas que representan esta variación del campo magnético en función de la conductividad.

Para $\mu_r = 4000 \quad \Theta_{\text{grados}} = 0.0004 \cdot c^3 - 0.0328 \cdot c^2 + 1.0435 \cdot c + 6.0472 \text{ (grados)} \quad [9.40]$

Para $\mu_r = 8000 \quad \Theta_{\text{grados}} = 0.0004 \cdot c^3 - 0.0326 \cdot c^2 + 0.9814 \cdot c + 4.5828 \text{ (grados)} \quad [9.41]$

Para $\mu_r = 15000 \quad \Theta_{\text{grados}} = 0.0005 \cdot c^3 - 0.0317 \cdot c^2 + 0.8428 \cdot c + 4.0936 \text{ (grados)} \quad [9.42]$

Para $\mu_r = 35000 \quad \Theta_{\text{grados}} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot c^3 - 0.0118 \cdot c^2 + 0.5553 \cdot c + 3.8596 \text{ (grados)} \quad [9.43]$

Finalmente, podemos realizar el mismo estudio, pero ahora fijando las conductividades y variando las permeabilidades relativas. La profundidad que alcanza el 50% de la inducción máxima en un corte axial del rotor fijando las conductividades y variamos las permeabilidades puede ser observada en la siguiente tabla.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz

c=3 Ms/m	profundidad	c=7 Ms/m	profundidad	c=15 Ms/m	profundidad	c=35 Ms/m	profundidad
p (H)	mm	p (H)	mm	p (H)	mm	p (H)	mm
500	5,80	500	4,00	500	3,20	500	1,7
1000	4,30	1000	3,10	1000	2,40	1000	1,35
2500	3,30	2500	2,40	2500	1,65	2500	1,05
4000	2,80	4000	2,00	4000	1,40	4000	0,95
6000	2,35	6000	1,60	6000	1,30	6000	0,85
8000	2,10	8000	1,50	8000	1,20	8000	0,8
10000	1,90	10000	1,40	10000	1,10	10000	0,75
15000	1,75	15000	1,25	15000	1,05	15000	0,7
25000	1,60	25000	1,30	25000	1,03	25000	0,6
35000	1,40	35000	1,20	35000	1,01	35000	0,55

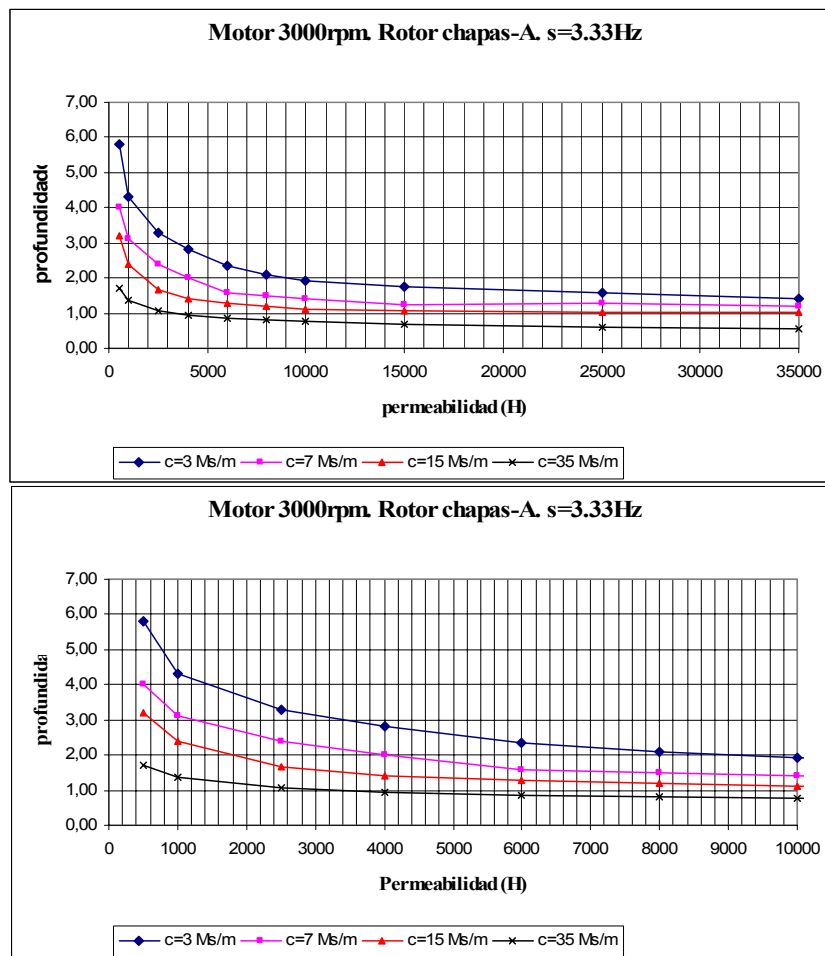


Figura 9.67. Evolución de la profundidad que alcanza el campo magnético en un corte axial del rotor en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades analizadas.

También en esta ocasión vamos a cuantificar de forma empírica la profundidad que alcanza el campo magnético axialmente en el rotor en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades analizadas.

$$\text{Para } c = 3 \text{ MS/m} \quad h = 43.967 \cdot \mu_r^{-0.3334} \text{ (mm)} \quad [9.44]$$

$$\text{Para } c = 7 \text{ MS/m} \quad h = 23.72 \cdot \mu_r^{-0.2976} \text{ (mm)} \quad [9.45]$$

$$\text{Para } c = 15 \text{ MS/m} \quad h = 15.524 \cdot \mu_r^{-0.2770} \text{ (mm)} \quad [9.46]$$

$$\text{Para } c = 35 \text{ MS/m} \quad h = 8.1436 \cdot \mu_r^{-0.2579} \text{ (mm)} \quad [9.47]$$

Aunque resulta más complejo de calcular y menos exacto, daremos los resultados obtenidos por simulación de la desviación del campo magnético total en función de la permeabilidad relativa.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz

c=3 Ms/m	Distorsión	c=7 Ms/m	Distorsión	c=15 Ms/m	Distorsión	c=35 Ms/m	Distorsión
p (H)	grados	p (H)	grados	p (H)	grados	p (H)	grados
500	8,00	500	10,00	500	12,30	500	14,00
1000	7,00	1000	9,00	1000	11,53	1000	12,80
1500	6,30	1500	8,20	1500	10,60	1500	12,15
2500	5,60	2500	7,66	2500	9,59	2500	11,20
4000	4,70	4000	6,80	4000	8,70	4000	10,05
5000	4,20	5000	6,40	5000	8,15	5000	9,60
6000	3,82	6000	6,21	6000	7,80	6000	9,65
8000	3,80	8000	5,80	8000	8,30	8000	9,80
10000	4,05	10000	5,73	10000	8,40	10000	9,90
15000	4,10	15000	6,00	15000	8,60	15000	9,82

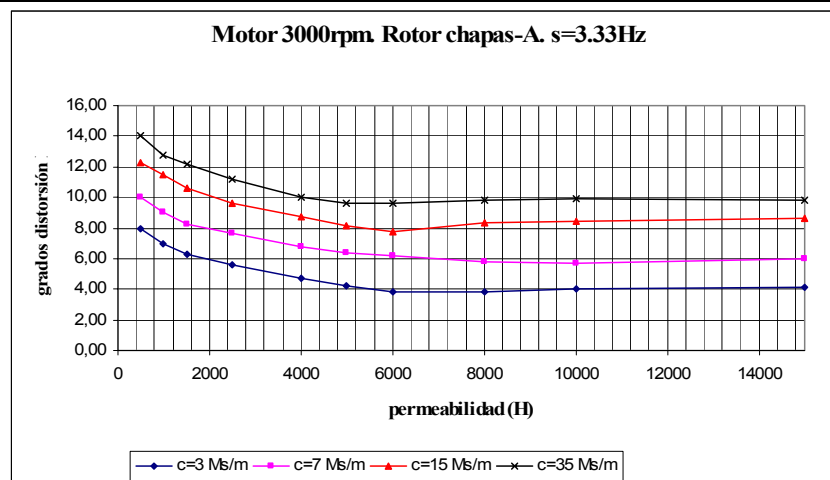


Figura 9.68. Evolución de la desviación del campo magnético neto en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades analizadas.

De forma empírica podemos aproximar estas curvas a las siguientes ecuaciones.

$$\text{Para } c = 3 \text{ MS/m} \quad \Theta = 5 \cdot 10^{-16} \cdot \mu_r^4 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot \mu_r^3 + 4 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r^2 - 0.0024 \cdot \mu_r + 14.98 \text{ (grados)} \quad [9.48]$$

$$\text{Para } c = 7 \text{ MS/m} \quad \Theta = 2 \cdot 10^{-16} \cdot \mu_r^4 - 1 \cdot 10^{-11} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r^2 - 0.0021 \cdot \mu_r + 13.279 \text{ (grados)} \quad [9.49]$$

$$\text{Para } c = 15 \text{ MS/m} \quad \Theta = 7 \cdot 10^{-16} \cdot \mu_r^4 - 3 \cdot 10^{-11} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r^2 - 0.0019 \cdot \mu_r + 10.729 \text{ (grados)} \quad [9.50]$$

$$\text{Para } c = 35 \text{ MS/m} \quad \Theta = 1 \cdot 10^{-16} \cdot \mu_r^4 - 9 \cdot 10^{-11} \cdot \mu_r^3 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r^2 - 0.0017 \cdot \mu_r + 8.6209 \text{ (grados)} \quad [9.51]$$

9.2.2.3.3 Efecto del aislante magnético de las chapas

A lo largo de las pruebas experimentales se han ensayado varios tipos de chapas, desde chapa normal de la utilizada en automoción, hasta chapas con buenas características magnéticas (grano orientado). Pero también la superficie que cubre la chapa debía ser importante, y así algunos prototipos con chapa de buena calidad pero aislada por las dos caras no llegaron a funcionar. Es decir, que si en transformadores y otras máquinas eléctricas lo que interesa es chapa aislada para evitar corrientes parásitas, en esta ocasión estas chapas resultaron del todo ineficaces.

La razón hay que buscarla en que las chapas de estos rotores están dispuestas, al contrario de la mayor parte de las máquinas eléctricas actuales, de forma longitudinal siguiendo el eje del rotor. De forma que no es tan importante aislarlas entre ellas ya que estas corrientes no influirán prácticamente en las respuestas electromagnéticas.

Pero vamos a estudiar con más detalle este efecto. Para ello, aparte de los valores experimentales, se han simulado una serie de motores cambiando la superficie exterior de la chapas y comparándose con el motor de chapas tipo A, considerado como el mejor modelo en esta investigación. Las condiciones de simulación han sido.

- Frecuencia de deslizamiento 3.33 Hz
- Permeabilidad relativa de las chapas del rotor: 5000.
- Conductividad de las chapas del rotor: 3 MS/m
- Aislamiento entre chapas: sin aislamiento.

Los otros modelos simulados, se corresponden con estas características, excepto con la última ya que el aislamiento entre las chapas es precisamente la variable que se ha modificado.

Concretamente, se han considerado las chapas sin aislar magnéticamente a partir de un valor de la permeabilidad relativa de 1, que es el valor estándar del aire. Vemos que existen valores de 0.0001 de permeabilidad que permite simular chapas completamente aisladas (no reales), hasta valores de 15, que representan que aparte de no estar aisladas las chapas, entre ellas no existiría aire sino un material 15 veces más permeable. De esta forma, puede verse la evolución de la inducción y del par medidos en el entrehierro, cuando cambiamos el material (permeabilidad) que separa las chapas.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz

Chapas rotor	p=5000 H	c=1 Ms/m	Chapas rotor	p=5000 H	c=1 Ms/m
p (H)	T (N·m)	B (T)	p (H)	T (N·m)	B (T)
0,0001	0,63	0,21	0,25	0,90	0,73
0,0005	0,64	0,27	0,50	0,89	0,77
0,0010	0,64	0,30	1,00	0,86	0,79
0,0020	0,65	0,32	1,50	0,85	0,80
0,0050	0,67	0,34	2,00	0,81	0,82
0,0100	0,70	0,41	5,00	0,75	0,84
0,0250	0,79	0,54	8,00	0,71	0,86
0,0500	0,87	0,61	10,00	0,67	0,88
0,1000	0,90	0,66	15,00	0,62	0,89

Tabla IX.XII Par e inducción máxima en el entrehierro en función de la permeabilidad del material que separa las chapas del rotor.

Las siguientes gráficas muestran más claramente esta evolución. Notar que hasta el valor teórico de la permeabilidad de 0.25, (un cuarto de la permeabilidad del aire) el par crece bruscamente. Es a partir de este valor cuando empieza un descenso del par obtenido, aunque este es moderado.

Por su parte la inducción sigue un comportamiento más homogéneo, con un incremento desde el inicio, pero en esta ocasión también se aprecia un cambio de ritmo. Hasta permeabilidades relativas del orden de la unidad (aire) el ascenso de los valores de la inducción máxima medida en el entrehierro

es rápido, en cambio a partir de estos valores, prosigue el incremento pero de forma más moderada. En ningún caso se superan los 0.9 T lo que indica un núcleo saturado, aunque no en exceso.

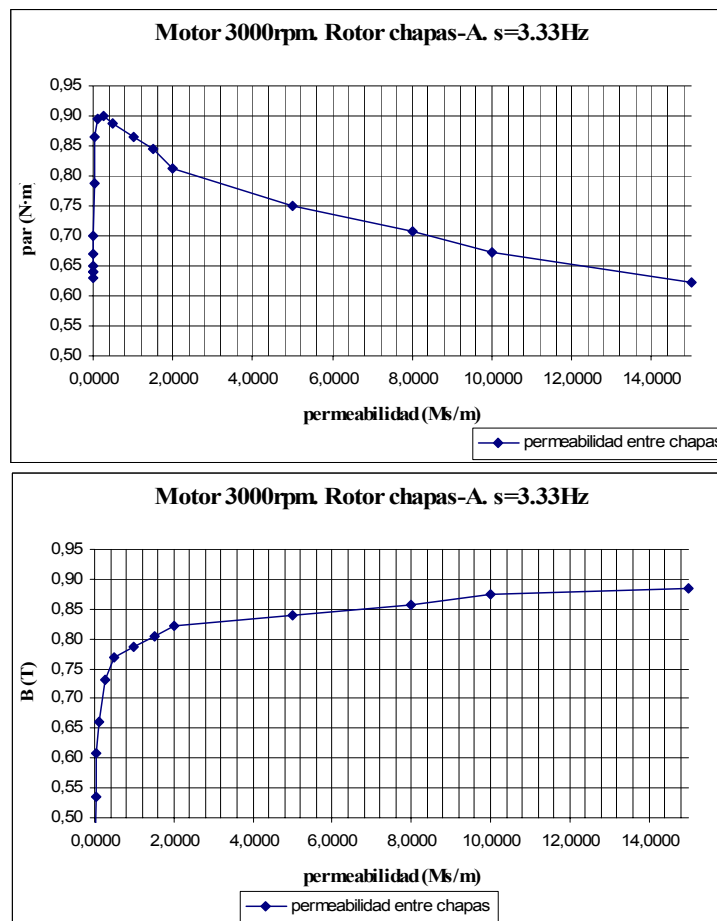


Figura 9.69. Evolución del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la permeabilidad del material que existe entre las chapas del rotor.

Una ampliación de la primera parte de la gráfica del par de la figura 9.69, permite comprobar con más detalle el incremento que experimenta el par cuando las chapas están completamente aisladas.

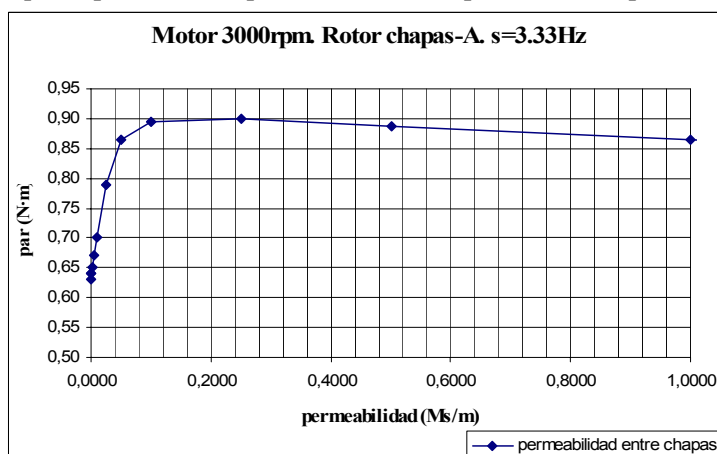


Figura 9.70. Par en el entrehierro en función de la permeabilidad del material aislante de las chapas.

Las siguientes figuras muestran al motor al completo con la distribución de la inducción en función de estos cambios de permeabilidad del material entre las chapas. Es interesante notar que mientras entre las chapas existe aislamiento (hasta unos 0.050) las líneas de campo magnético se cierran a través del rotor, lo que repercute en la no creación de par óptimo para permitir el giro del mismo.

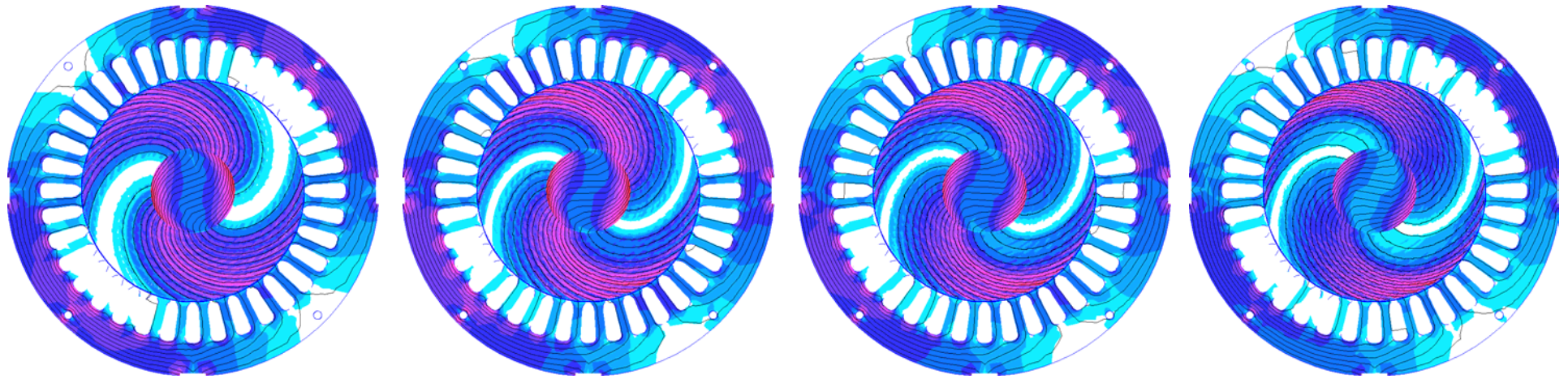


Figura 9.71. Campos magnéticos para permeabilidades del material aislante entre las chapas del rotor de valor: a) 0.0001, b) 0.0005, c) 0.001 y d) 0.002.

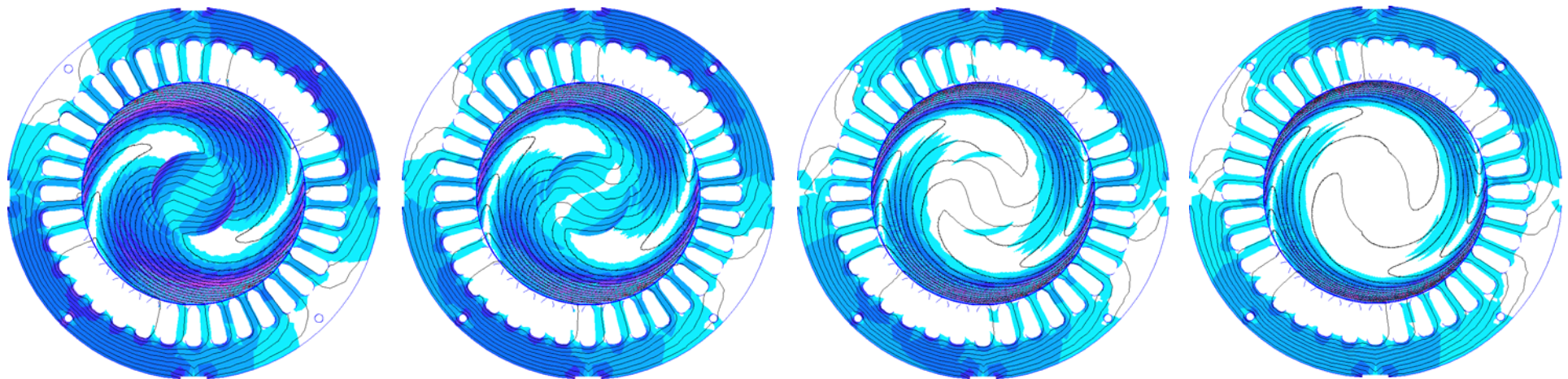


Figura 9.72. Campos magnéticos para permeabilidades del material aislante entre las chapas del rotor de valor: a) 0.005, b) 0.010, c) 0.025 y d) 0.050.

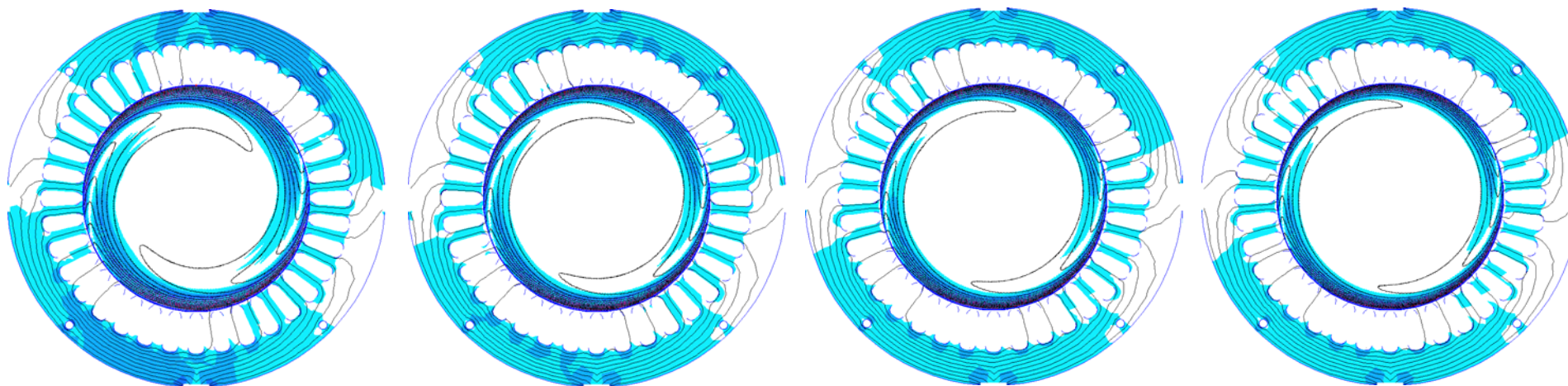


Figura 9.73. Campos magnéticos para permeabilidades del material aislante entre las chapas del rotor de valor: a) 0.10, b) 0.25, c) 0.50 y d) 1.00.

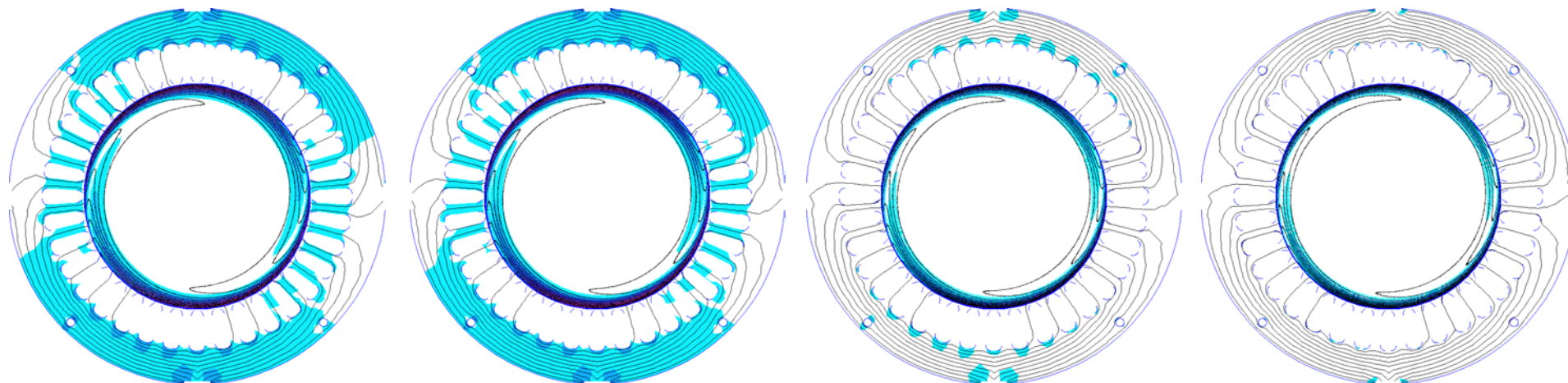


Figura 9.74. Campos magnéticos para permeabilidades del material aislante entre las chapas del rotor de valor: a) 2.50, b) 5.0, c) 10.0 y d) 15.0.

9.2.2.3.4 Efecto del número de chapas que forman el rotor

Finalmente, en este estudio del comportamiento del motor con rotor de chapas intentaremos cuantificar cómo influye el número y espesor de las chapas que forman el rotor.

A priori se han construido varios rotores con diferente espesor y por tanto con diferente número de chapas que han servido mediante los resultados experimentales para la comparación entre ellos. Pero siempre existía alguna diferencia, como por ejemplo el material o el acabado del motor, que hacen que resulte difícil discernir cuál de los efectos influye en cada resultado. Así pues, la única forma de comparar diferentes motores comprobando exclusivamente el efecto de la variación del espesor de la chapa era mediante simulación.

Para realizar la simulación, optamos por crear tres modelos nuevos los cuales simularían tres chapas de diferente espesor pero con las mismas características eléctricas. Así para la chapa de 0.25 mm se han dibujado 270 chapas, para la chapa de 0.5 mm se han dibujado 160 unidades y para la chapa de 0.7 mm se han dibujado un total de 118 chapas. Esta distribución obedece a unos criterios de diseño en los cuales deliberadamente se ha aumentado la separación entre las chapas de forma leve, para estar más cerca de la realidad (es más difícil compactar una chapa a medida que su espesor aumenta). Por tanto, la separación entre las chapas es de 0.08, 0.09 y 0.10 mm para las chapas de 0.25, 0.5 y 0.7 mm de espesor respectivamente.

Las pruebas se han realizado variando la conductividad de las chapas para cuatro series de permeabilidades relativas estándar, 2500, 4000, 8000 y 15000. Recordando que el motor escogido es el de 3000 rpm, con una frecuencia de deslizamiento de 3.33 Hz en carga, siendo las siguientes tablas y gráficas las muestras de los datos obtenidos mediante las simulaciones realizadas.

Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación espesor chapa. f=3,33Hz. p=2500H									
conductiv	Espesor chapa 0,25 mm			Espesor chapa 0,50 mm			Espesor chapa 0,70 mm		
c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)
1	1,040	1,140	2,89	0,782	0,860	3,40	0,412	0,718	3,89
2	1,104	1,080	2,21	0,830	0,821	2,60	0,509	0,668	2,92
3	1,180	1,030	1,87	0,887	0,786	2,20	0,564	0,620	2,27
4	1,219	0,980	1,62	0,917	0,750	1,90	0,598	0,600	2,03
5	1,240	0,910	1,53	0,932	0,714	1,80	0,618	0,586	1,90
6	1,250	0,870	1,40	0,940	0,679	1,65	0,636	0,562	1,74
7	1,254	0,826	1,36	0,945	0,643	1,60	0,642	0,542	1,62
8	1,253	0,764	1,28	0,950	0,607	1,50	0,650	0,523	1,56
9	1,250	0,736	1,23	0,955	0,589	1,45	0,651	0,510	1,50
10	1,244	0,702	1,19	0,943	0,571	1,40	0,656	0,496	1,46
12	1,231	0,660	1,11	0,926	0,536	1,30	0,658	0,474	1,38
15	1,205	0,610	0,98	0,906	0,500	1,15	0,655	0,450	1,23
18	1,178	0,596	0,89	0,886	0,482	1,05	0,650	0,438	1,17
20	1,166	0,593	0,85	0,877	0,471	1,00	0,645	0,427	1,13
25	1,118	0,570	0,77	0,841	0,460	0,90	0,631	0,415	0,97
35	1,026	0,560	0,60	0,771	0,440	0,70	0,603	0,405	0,93

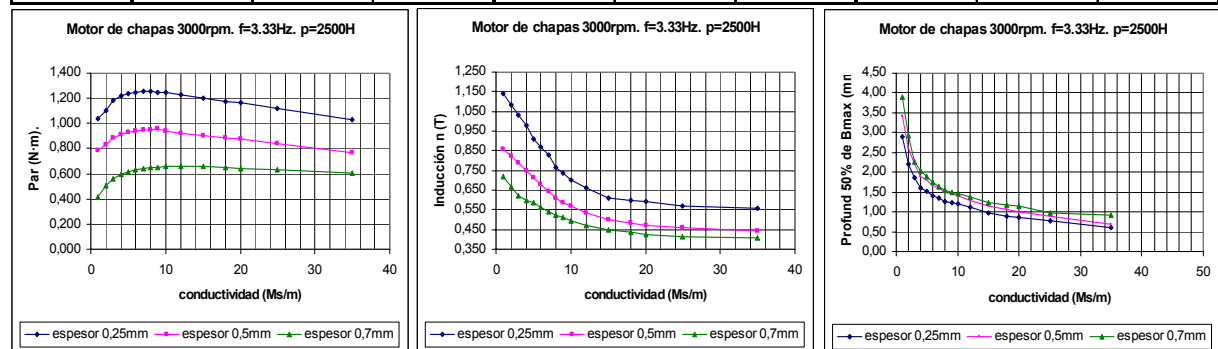
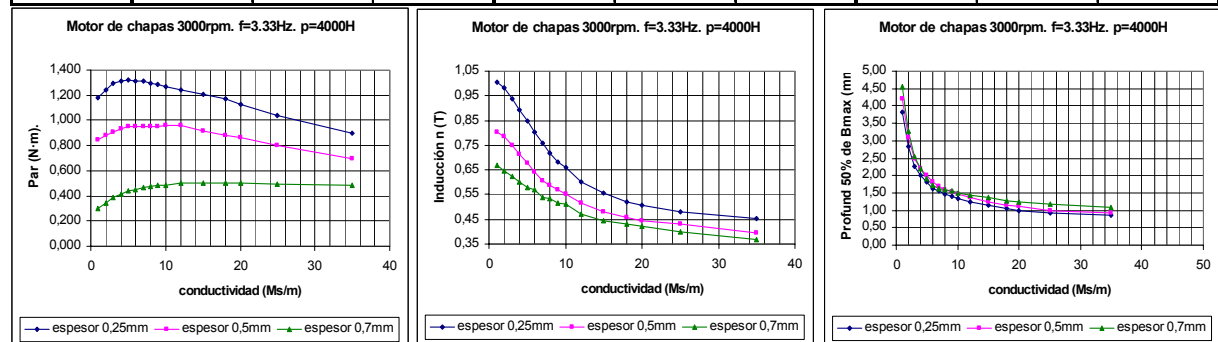


Figura 9.75. Evolución de algunas magnitudes eléctricas con la variación del espesor de la chapa para una permeabilidad relativa de 2500 y varias conductividades.

Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación espesor chapa. f=3,33Hz. p=4000									
conductiv c (Ms/m)	Espesor chapa 0,25 mm			Espesor chapa 0,50 mm			Espesor chapa 0,70 mm		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	1,182	1,00	3,82	0,844	0,804	4,20	0,300	0,670	4,55
2	1,238	0,98	2,82	0,884	0,786	3,10	0,339	0,648	3,28
3	1,293	0,94	2,28	0,910	0,750	2,50	0,388	0,623	2,55
4	1,315	0,89	2,00	0,930	0,714	2,20	0,414	0,603	2,18
5	1,320	0,85	1,82	0,950	0,679	2,00	0,439	0,580	1,91
6	1,316	0,80	1,64	0,951	0,643	1,80	0,452	0,572	1,73
7	1,308	0,76	1,55	0,952	0,607	1,70	0,466	0,540	1,64
8	1,297	0,72	1,46	0,953	0,589	1,60	0,476	0,532	1,59
9	1,285	0,68	1,39	0,954	0,571	1,53	0,483	0,518	1,55
10	1,271	0,66	1,35	0,956	0,554	1,48	0,487	0,510	1,50
12	1,244	0,60	1,26	0,957	0,518	1,38	0,499	0,470	1,44
15	1,204	0,56	1,14	0,920	0,482	1,25	0,499	0,445	1,37
18	1,170	0,52	1,05	0,880	0,457	1,15	0,500	0,430	1,27
20	1,130	0,51	1,00	0,860	0,446	1,10	0,499	0,423	1,23
25	1,043	0,48	0,91	0,800	0,429	1,00	0,495	0,400	1,16
35	0,895	0,45	0,85	0,694	0,393	0,93	0,480	0,370	1,09



Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación espesor chapa. f=3,33Hz. p=8000H									
conductiv c (Ms/m)	Espesor chapa 0,25 mm			Espesor chapa 0,50 mm			Espesor chapa 0,70 mm		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,974	1,094	6,61	0,681	0,875	5,60	0,306	0,710	4,47
2	1,054	1,071	5,07	0,737	0,857	4,30	0,404	0,670	3,53
3	1,159	1,027	4,25	0,811	0,821	3,60	0,477	0,645	2,82
4	1,225	1,004	3,54	0,857	0,804	3,00	0,533	0,630	2,35
5	1,269	0,982	3,25	0,888	0,786	2,75	0,562	0,610	2,06
7	1,321	0,938	2,83	0,930	0,750	2,40	0,614	0,580	1,82
10	1,353	0,871	2,36	0,950	0,696	2,00	0,663	0,540	1,65
11	1,357	0,848	2,24	0,953	0,679	1,90	0,676	0,530	1,59
12	1,359	0,826	2,12	0,954	0,661	1,80	0,691	0,530	1,53
13	1,359	0,804	2,01	0,960	0,643	1,70	0,699	0,510	1,48
15	1,356	0,759	1,83	0,970	0,607	1,55	0,703	0,500	1,39
20	1,340	0,692	1,42	0,960	0,554	1,20	0,719	0,460	1,27
25	1,288	0,625	1,24	0,930	0,518	1,05	0,724	0,450	1,18
30	1,260	0,610	1,12	0,895	0,507	0,95	0,723	0,440	1,12
35	1,220	0,608	1,06	0,870	0,500	0,90	0,718	0,435	0,80
50	1,080	0,605	0,97	0,792	0,493	0,82	0,680	0,418	0,70

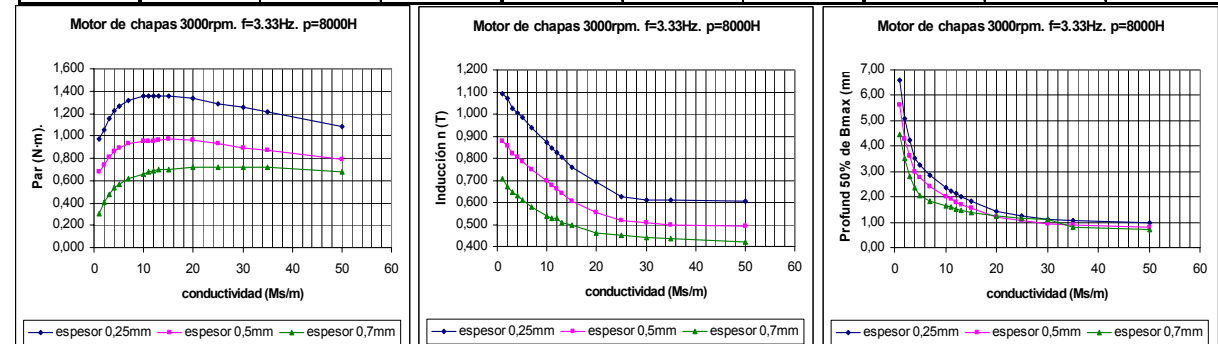


Figura 9.76. Evolución de algunas magnitudes eléctricas con la variación del espesor de la chapa para unas permeabilidades relativas de 4000 y 8000 y varias conductividades.

Motor chapas-A. con 3000rpm. Variación espesor chapa. f=3,33Hz. p=15000H									
conductiv c (Ms/m)	Espesor chapa 0,35 mm			Espesor chapa 0,50 mm			Espesor chapa 0,70 mm		
	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun (mm)	T (N·m)	B (T)	Profun(mm)
1	0,743	1,150	4,46	0,520	0,920	4,00	0,249	0,720	3,55
2	0,937	1,094	3,35	0,655	0,875	3,00	0,343	0,699	2,44
3	1,053	1,049	2,73	0,736	0,839	2,45	0,413	0,675	2,00
4	1,133	1,027	2,23	0,792	0,821	2,00	0,472	0,660	1,67
5	1,190	0,982	1,95	0,832	0,786	1,75	0,502	0,645	1,55
7	1,267	0,938	1,67	0,886	0,750	1,50	0,560	0,608	1,39
10	1,331	0,870	1,51	0,931	0,700	1,35	0,617	0,585	1,28
12	1,354	0,840	1,40	0,947	0,670	1,26	0,640	0,570	1,22
15	1,372	0,800	1,32	0,959	0,630	1,18	0,654	0,546	1,13
16	1,376	0,780	1,28	0,962	0,620	1,15	0,662	0,540	1,11
20	1,380	0,740	1,22	0,965	0,590	1,09	0,688	0,520	1,05
25	1,368	0,705	1,16	0,980	0,564	1,04	0,708	0,510	1,00
35	1,312	0,670	1,06	0,990	0,536	0,95	0,707	0,495	0,94
50	1,256	0,647	0,95	0,970	0,518	0,85	0,720	0,486	0,89

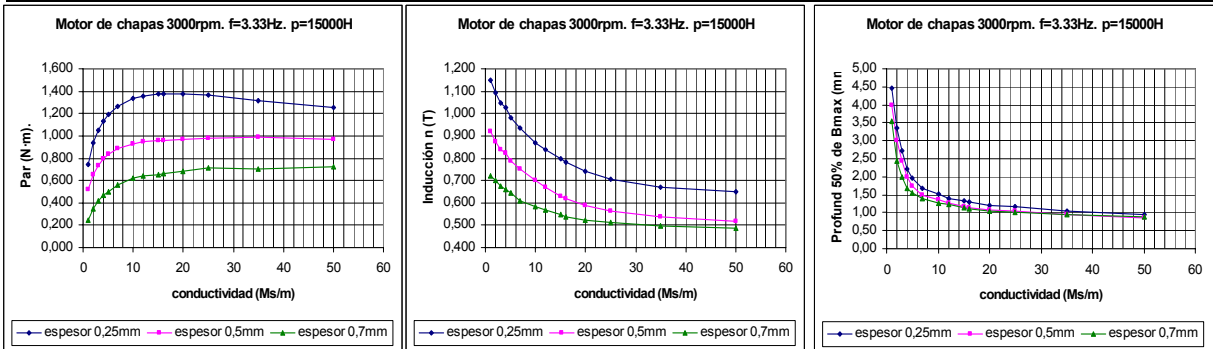


Figura 9.77. Evolución de algunas magnitudes eléctricas con la variación del espesor de la chapa para una permeabilidad relativa de 15000 y varias conductividades.

Este análisis para ser completo debería haber considerado muchos más espesores, y quizás más series de permeabilidades, con lo cual habría podido darse unas relaciones más fiables, pero este extremo sale por completo de las perspectivas de esta tesis dejándose para trabajos futuros. En esta ocasión se presentan tres chapas y cuatro permeabilidades, sacándose las conclusiones que nos permiten la interpretación de estos datos.

De las gráficas y figuras anteriores puede apreciarse que al aumentar el espesor de las chapas disminuye el par generado. Esta disminución no es constante para cada uno de los valores de la conductividad no pudiéndose por tanto dar una media, aunque si es posible definir que esta variación seguirá una respuesta lineal como puede apreciarse en las figuras 9.78 y 9.79. Se pueden extraer unas ecuaciones empíricas, sólo válidas para estos espesores y para el rango de los materiales analizados (se ha tomado como valor de referencia para la conductividad los 10 MS/m). En estas ecuaciones e , representa el espesor de la chapa en mm.

Para una permeabilidad de 2500: $T_{m\acute{a}x} = -1.3025 \cdot e + 1.5772$ (N·m) [9.52]

Para una permeabilidad de 4000: $T_{m\acute{a}x} = -1.423 \cdot e + 1.2628$ (N·m) [9.53]

Para una permeabilidad de 8000: $T_{m\acute{a}x} = -1.536 \cdot e + 1.731$ (N·m) [9.54]

Para una permeabilidad de 15000: $T_{m\acute{a}x} = -1.587 \cdot e + 1.7268$ (N·m) [9.55]

Otro efecto destacable es que el punto de conductividad óptima para una determinada permeabilidad, también varía en función del espesor de la chapa. Así para la permeabilidad de 2500, las conductividades óptimas para los espesores de 0.25, 0.5 y 0.7 mm son respectivamente: 7, 9 y 12 MS/m. Para la permeabilidad de 4000, estos valores son: 5, 12 y 18 MS/m. Para la permeabilidad de 8000 son: 12, 15 y 25 MS/m y, finalmente para una permeabilidad de 15000, tendremos como conductividades óptimas para las tres chapas: 20, 35 y mayor que 50 MS/m.

Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=2500H					Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=4000H				
c	esp. Chapas	T(N·m)	B(T)	prof (mm)	c	esp. Chapas	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
	1Ms/m	0,25	1,040	1,140		2,89	1Ms/m	0,25	1,182
	0,50	0,728	0,860	3,40		0,50	0,844	0,804	4,20
	0,70	0,412	0,718	3,89		0,70	0,500	0,670	4,55
5Ms/m	0,25	1,240	0,910	1,53	5Ms/m	0,25	1,320	0,850	1,82
	0,50	0,932	0,714	1,80		0,50	0,950	0,679	2,00
	0,70	0,618	0,586	1,90		0,70	0,439	0,580	2,10
10Ms/m	0,25	1,244	0,702	1,19	10Ms/m	0,25	1,271	0,660	1,35
	0,50	0,943	0,571	1,40		0,50	0,956	0,554	1,48
	0,70	0,656	0,496	1,46		0,70	0,487	0,510	1,50
20Ms/m	0,25	1,166	0,593	0,85	20Ms/m	0,25	1,130	0,510	1,00
	0,50	0,877	0,471	1,00		0,50	0,860	0,446	1,10
	0,70	0,645	0,427	1,13		0,70	0,500	0,423	1,23
35Ms/m	0,25	1,026	0,560	0,60	35Ms/m	0,25	0,895	0,450	0,85
	0,50	0,771	0,440	0,70		0,50	0,694	0,393	0,93
	0,70	0,603	0,400	0,93		0,70	0,480	0,370	1,09

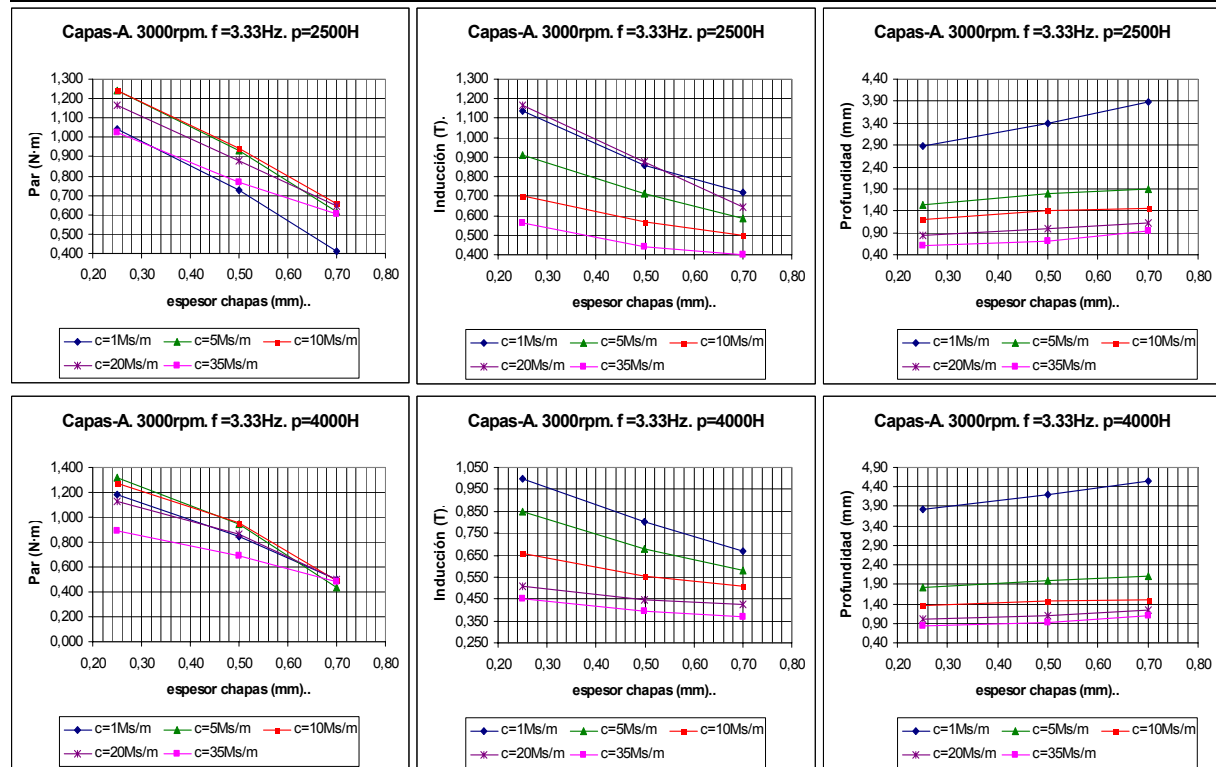


Figura 9.78. Evolución de algunas magnitudes eléctricas con la variación del espesor de la chapa para unas permeabilidades relativas de 2500 y 4000 y conductividades óptimas.

Al aumentar la permeabilidad, la diferencia entre el par hallado con los diferentes espesores aumenta. Como datos promedios (considerando las pocas series de las que se disponen) entre las dos chapas con espesores extremos (la de 0.25 mm y la de 0.7 mm), podemos indicar que la diferencia entre los valores del par son para las permeabilidades de 2500, 4000, 8000 y 1500 del 50.77%, 60.50%, 62.84% y 66.5% respectivamente. Es decir, las diferencias son del orden del 16% considerando una variación de la permeabilidad relativa desde 2500 hasta 15000.

Si variamos la conductividad manteniendo la permeabilidad relativa, la diferencia entre los valores de par para chapas con diversos espesores disminuye de forma rápida con conductividades bajas. Así la figura 9.79 muestra la diferencia entre los valores del par (entre las chapas con espesores extremos) en función de la conductividad y para diversas permeabilidades relativas.

Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=8000H					Motor a 3000rpm chapas A. f=3,33Hz. p=15000H				
	esp. Chapas	T(N·m)	B(T)	prof (mm)		esp. Chapas	T(N·m)	B(T)	prof (mm)
c=1Ms/m	0,25	0,974	1,094	6,60	c=1Ms/m	0,25	0,743	1,150	4,46
	0,50	0,681	0,875	5,60		0,50	0,520	0,920	4,00
	0,70	0,306	0,710	4,47		0,70	0,249	0,720	3,55
c=5Ms/m	0,25	1,269	0,982	3,25	c=5Ms/m	0,25	1,190	0,982	1,95
	0,50	0,888	0,786	2,75		0,50	0,832	0,786	1,75
	0,70	0,562	0,610	2,06		0,70	0,502	0,645	1,55
c=10Ms/m	0,25	1,353	0,871	2,36	c=10Ms/m	0,25	1,331	0,870	1,51
	0,50	0,950	0,696	2,00		0,50	0,931	0,700	1,35
	0,70	0,663	0,540	1,65		0,70	0,617	0,585	1,28
c=20Ms/m	0,25	1,350	0,692	1,42	c=20Ms/m	0,25	1,380	0,740	1,22
	0,50	0,960	0,554	1,20		0,50	0,965	0,590	1,09
	0,70	0,719	0,460	1,10		0,70	0,688	0,520	1,05
c=35Ms/m	0,25	1,220	0,608	1,06	c=35Ms/m	0,25	1,312	0,670	1,06
	0,50	0,870	0,500	0,90		0,50	0,990	0,536	0,95
	0,70	0,718	0,435	0,80		0,70	0,707	0,470	0,90

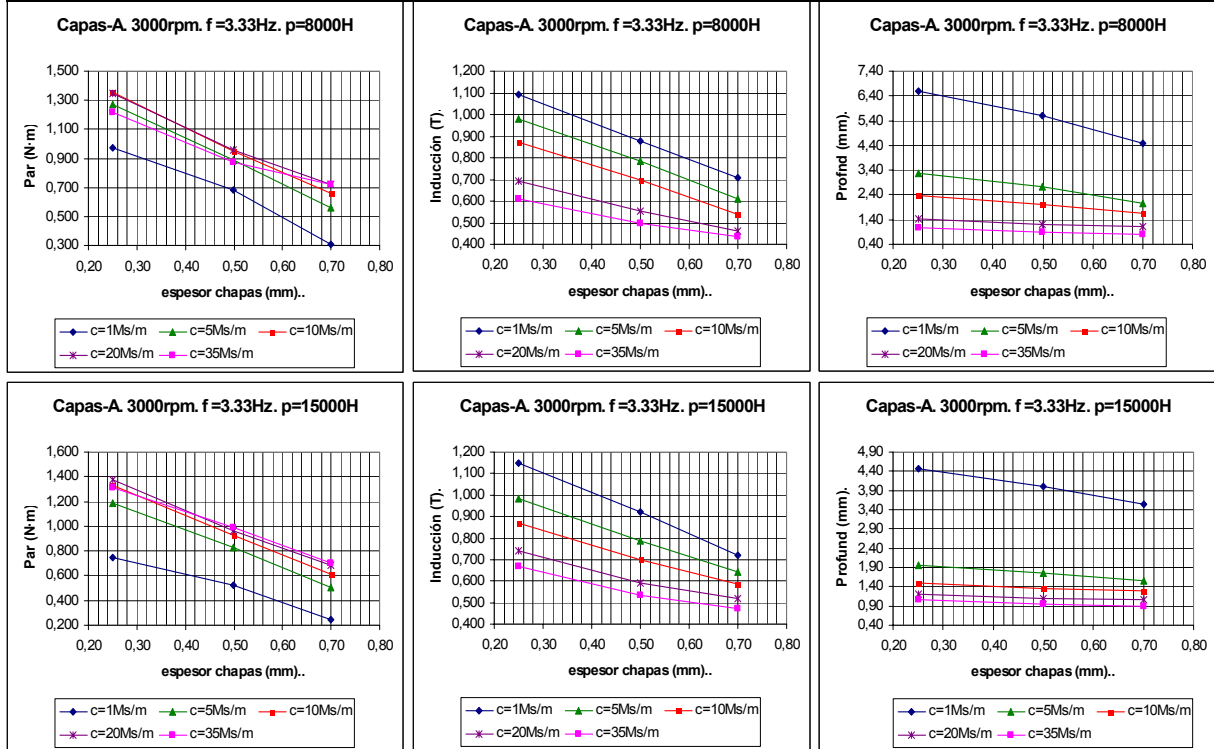


Figura 9.79. Evolución de algunas magnitudes eléctricas con la variación del espesor de la chapa para unas permeabilidades relativas de 8000 y 15000 y conductividades óptimas.

Para permeabilidades bajas, la curva es prácticamente una recta con pendiente negativa, es decir, las variaciones de conductividad hacen variar las diferencias de par que se dan entre dos rotores con chapas de diferente espesor. En cambio con permeabilidades altas, la conductividad prácticamente no influye en los cambios que puedan experimentar las chapas debido a su espesor. Serían necesarias más series de simulaciones, pero podemos dar unas ecuaciones empíricas para estas series en concreto.

$$v_{(\%) } = 0.0168 \cdot c^2 - 0.9693 \cdot c + 55.86 \quad [9.56]$$

$$v_{(\%) } = 0.0135 \cdot c^2 - 1.1542 \cdot c + 62.818 \quad [9.57]$$

$$v_{(\%) } = 0.0103 \cdot c^2 - 0.9086 \cdot c + 63.525 \quad [9.58]$$

$$v_{(\%)} = 0.0144 \cdot c^2 - 1.246 \cdot c + 73.556 \quad [9.59]$$

Donde c , es la conductividad de las chapas del rotor en MS/m, y v , es la variación del par en tanto por ciento. La figura 9.80, ilustra de forma gráfica estas ecuaciones del comportamiento de la variación del par cuando variamos la conductividad.

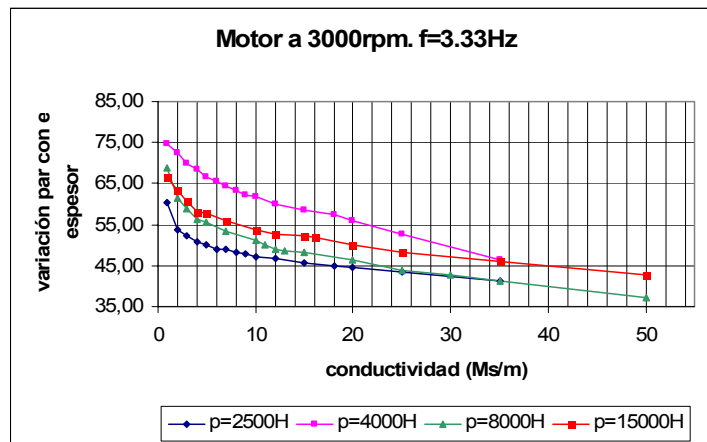


Figura 9.80. Variación del par entre las chapas con espesores de 0.25 mm y 0.7 mm en función de la conductividad.

En cuanto a la inducción, el comportamiento es similar al del par, detectándose una disminución progresiva de la misma a medida que aumenta el espesor de las chapas. Concretamente al variar la permeabilidad relativa se observa que las desviaciones existentes en el campo magnético neto entre los dos motores equipados con rotor de chapas de espesor 0.25 mm y 0.7 mm, aumentan al aumentar la permeabilidad. Así para las permeabilidades analizadas, y de menor a mayor, tendremos respectivamente los siguientes valores promedio de la desviación de la inducción máxima en el entrehierro entre los motores citados de: 31.25%, 32.5%, 34.1% y 37.4%.

Podemos apreciar en las figuras 9.78 y 9.79, dadas para las permeabilidades analizadas, que el comportamiento de la inducción en la mayor parte de las ocasiones es lineal y con pendiente negativa. Para un valor de conductividad estándar de 10 MS/m las ecuaciones que representan estos cambios en el valor de la inducción al variar el espesor de las chapas son:

$$\text{Para una permeabilidad de 2500: } B_{m\acute{a}x} = -0.4605 \cdot e + 0.8122 \text{ (T)} \quad [9.60]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 4000: } B_{m\acute{a}x} = -0.3370 \cdot e + 0.7376 \text{ (T)} \quad [9.61]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 8000: } B_{m\acute{a}x} = -0.7341 \cdot e + 1.057 \text{ (T)} \quad [9.62]$$

$$\text{Para una permeabilidad de 15000: } B_{m\acute{a}x} = -0.6350 \cdot e + 1.025 \text{ (T)} \quad [9.63]$$

Por su parte la profundidad donde se alcanza el 50% de la inducción máxima, medida esta distancia en forma radial desde el entrehierro hasta el eje del rotor, sufre menos variaciones de las que a priori podríamos pensar, denotándose que con un aumento del espesor de las chapas existe un aumento de la profundidad de las líneas de campo para las permeabilidades relativas de 2500 y 4000, pero no para las permeabilidades de 8000 ó 15000, en las cuales esta profundidad prácticamente no varía con el espesor de la chapa o incluso se invierte.

Así y mientras que a 2500 de permeabilidad, existen todavía diferencias (en promedio del 30.9%) a medida que aumentamos la permeabilidad estas diferencias decrecen (19.5% a 4000, -5.3% a 8000 y -16.3% a 15000). Además como puede apreciarse en las figuras 9.78 y 9.79, la variación de esta profundidad puede ser equiparada a unas rectas, que para los espesores y materiales analizados podemos expresar de la siguiente forma (se toma también la conductividad de 10 MS/m).

Para una permeabilidad de 2500: $P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.6098 \cdot e + 1.055 \text{ (mm)}$ [9.64]

Para una permeabilidad de 4000: $P_{\text{profundidad máx-50\%}} = 0.341 \cdot e + 1.2785 \text{ (mm)}$ [9.65]

Para una permeabilidad de 8000: $P_{\text{profundidad máx-50\%}} = -1.5721 \cdot e + 2.763 \text{ (mm)}$ [9.66]

Para una permeabilidad de 15000: $P_{\text{profundidad máx-50\%}} = -0.5164 \cdot e + 1.629 \text{ (mm)}$ [9.67]

Finalmente en las figuras 9.81 a 9.88 se muestra el campo magnético generado y la densidad de corriente en los motores equipados con rotores de chapas con espesores de 0.25 mm y 0.7 mm, para algunos valores de conductividad.

Notar que en los motores con el espesor de 0.25 mm, el campo magnético es más superficial alcanzándose profundidades menores lo que repercute en la creación de más par neto, mientras que el motor de chapas con espesor de 0.7 mm, el campo magnético es más profundo originando estas líneas un par antagonista que debilita al par total.

En cuanto a la densidad de corriente ocurre algo parecido, en los motores con chapas de espesor de 0.25 mm, la densidad es mayor que no en los motores con chapas de espesor 0.7 mm, aunque en este caso las diferencias son mínimas.

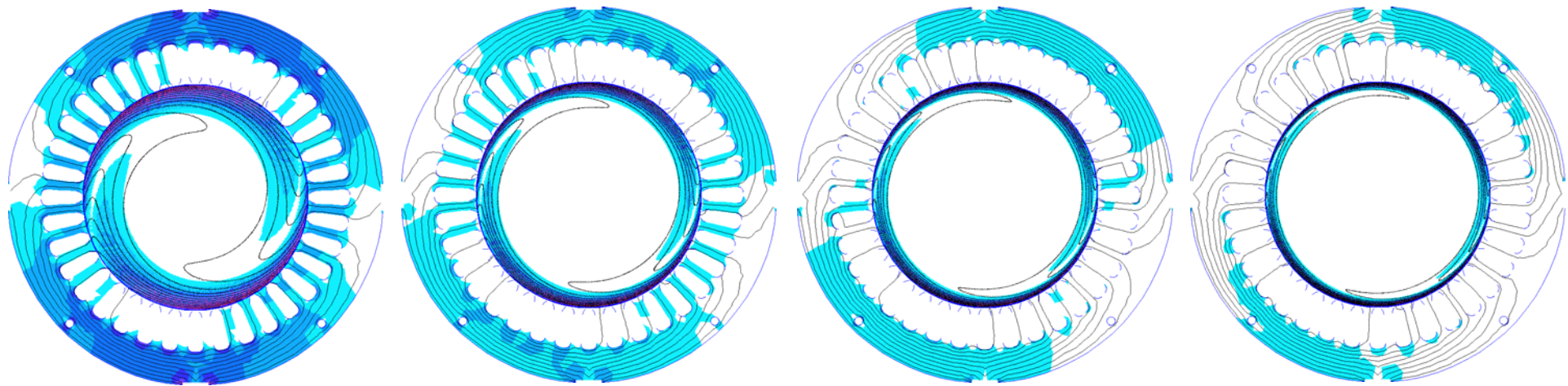


Figura 9.81. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.25 mm. Permeabilidad relativa 2500.

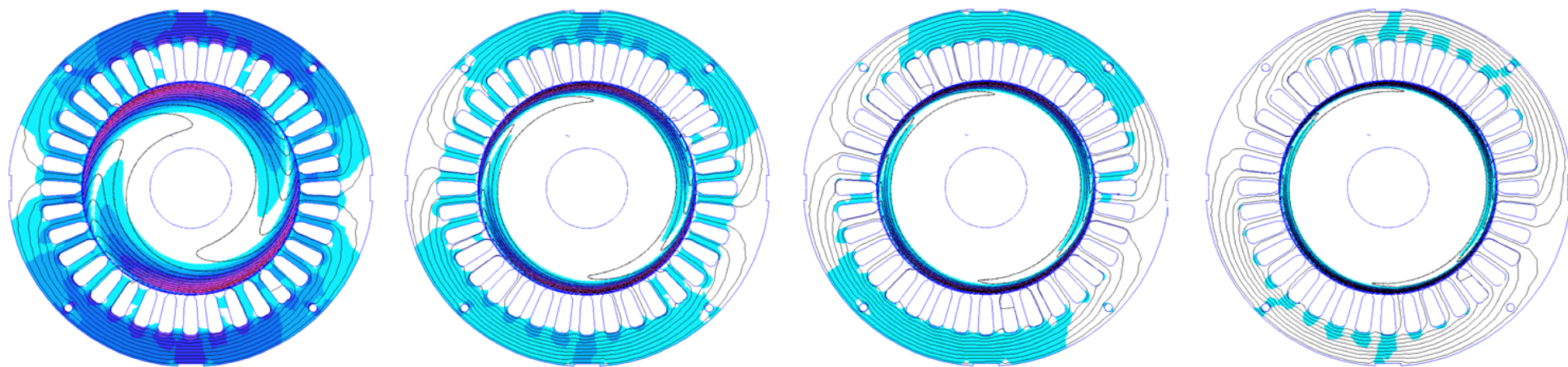


Figura 9.82. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.70 mm. Permeabilidad relativa 2500.

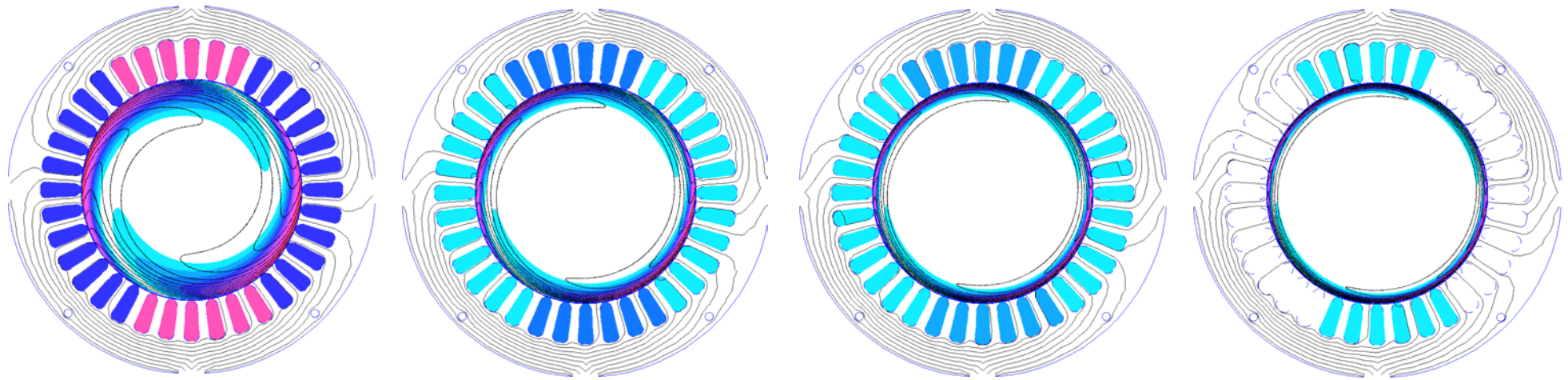


Figura 9.83. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor 0.25 mm. Permeabilidad relativa 2500.

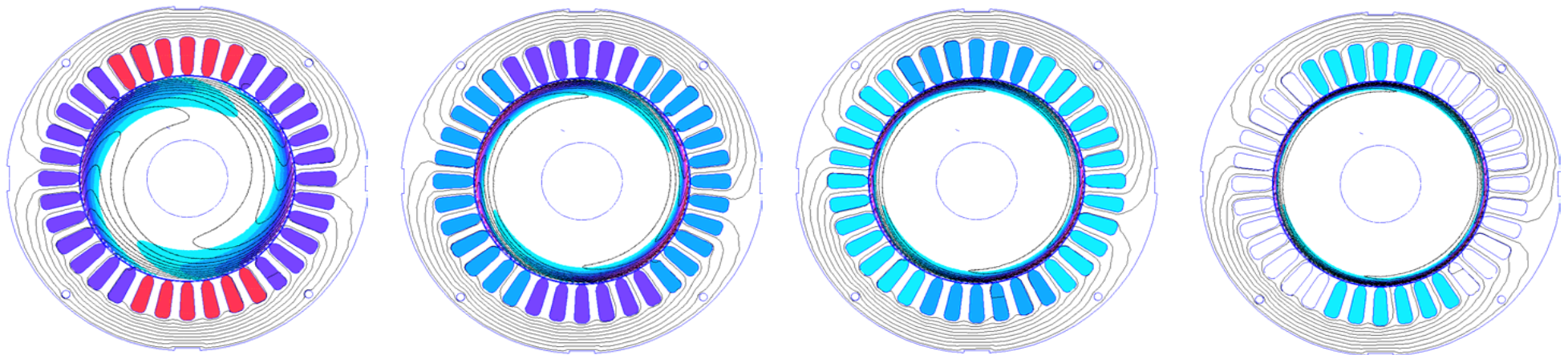


Figura 9.84. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor 0.70 mm. Permeabilidad relativa 2500.

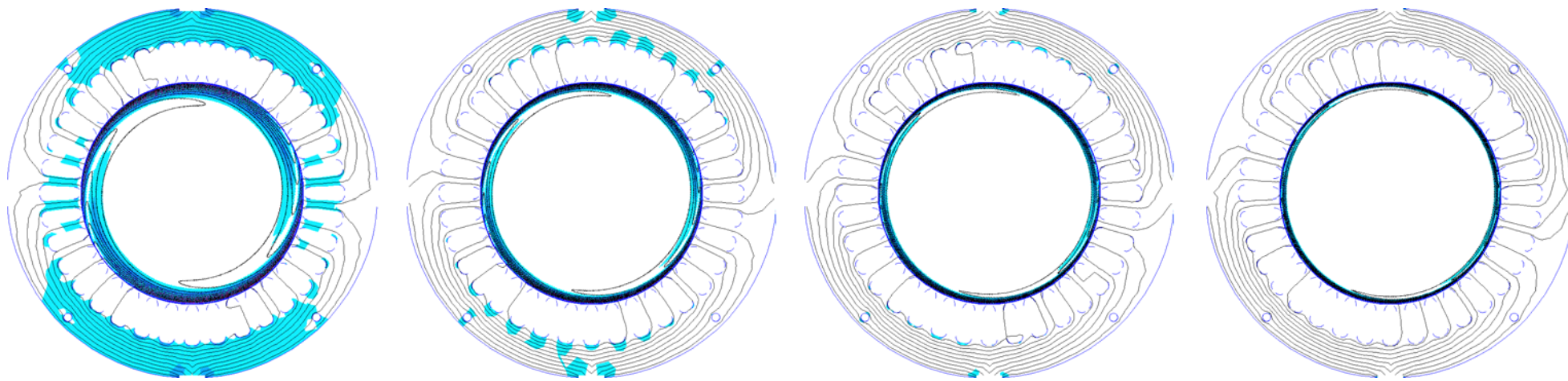


Figura 9.85. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.25 mm. Permeabilidad relativa 15000.

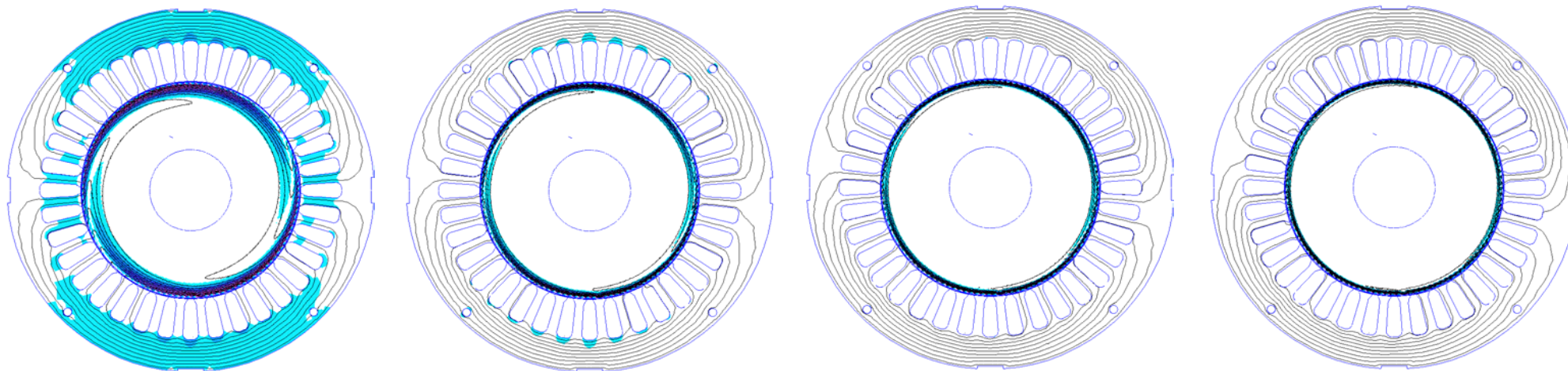


Figura 9.86. Campo magnético motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.7 mm. Permeabilidad relativa 15000.

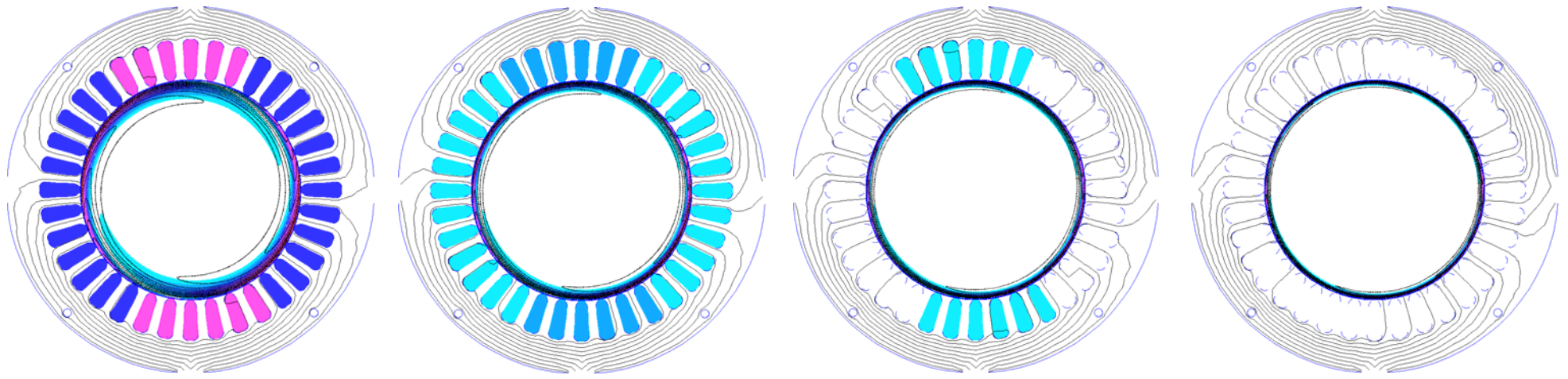


Figura 9.87. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.25 mm. Permeabilidad relativa 15000.

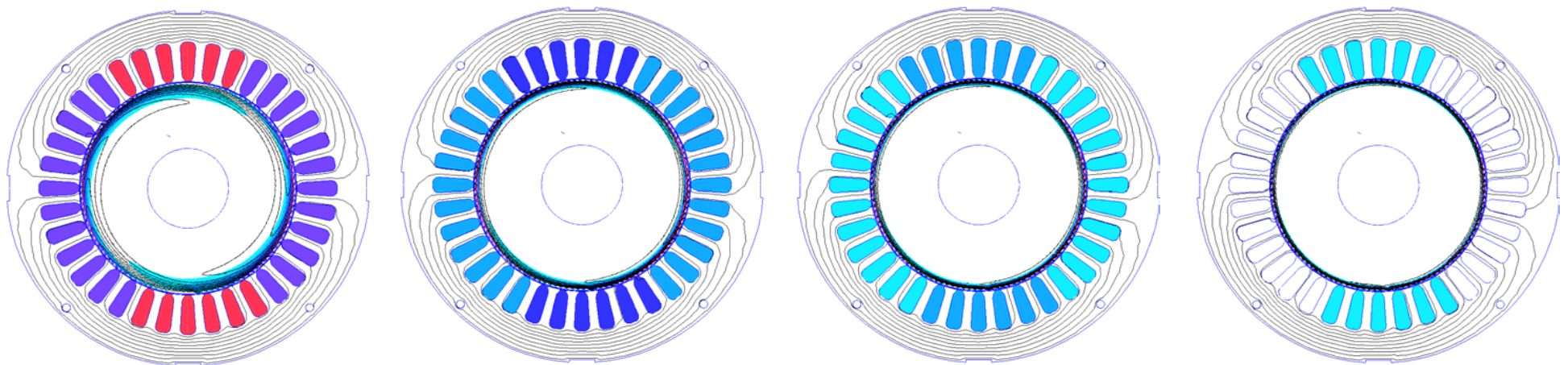


Figura 9.88. Densidad de intensidad motor de chapas a 3000 rpm y deslizamiento de 3.33%. Chapas espesor de 0.70 mm. Permeabilidad relativa 15000.

9.2.3 ANÁLISIS TÉRMICO DE LOS MOTORES CON ROTOR DE CHAPAS

Una vez realizado el análisis de las características electromagnéticas de los motores equipados con rotor de chapas, pasamos al estudio, aunque más superficial, de su comportamiento térmico. En este caso, el estudio es por completo experimental ya que no se dispone de ningún programa de simulación, aunque por el tamaño de la muestra, las conclusiones pueden considerarse representativas.

En el capítulo IV, se expone y razona el método empleado dándose las ecuaciones y teoremas que permiten aplicarlo, asimismo, en los anexos puede consultarse toda la información recogida en estos ensayos. En este apartado se ofrecen sólo algunas gráficas y tablas representativas para el análisis.

Debe diferenciarse la temperatura del estator, que depende en gran medida de la intensidad que circula por sus espiras, de la temperatura del rotor en la que influye el material, la forma constructiva o incluso las aletas dejadas en los anillos laterales del rotor. Como para cada régimen se utilizó solo un estator (1000, 1500-A, 1500 o 3000 rpm), la temperatura del estator debería ser una función directa de la intensidad, aunque esto no es exactamente cierto ya que existe la influencia del rotor que alcanza temperaturas diferentes para cada modelo.

9.2.3.1 Comparación térmica entre los diversos motores de chapas

Una primera serie de gráficas (figuras 9.89 y 9.90) compara la respuesta térmica de los diversos motores de chapas a 3000 rpm para tres deslizamientos (2.5 %, 10 % y 25 %). Nos centraremos en dos de estos deslizamientos (2.5 % y 25 %), los cuales proporcionan los valores extremos. Tanto para la temperatura del estator como para la del rotor, la secuencia de los motores de menor a mayor temperatura es la siguiente:

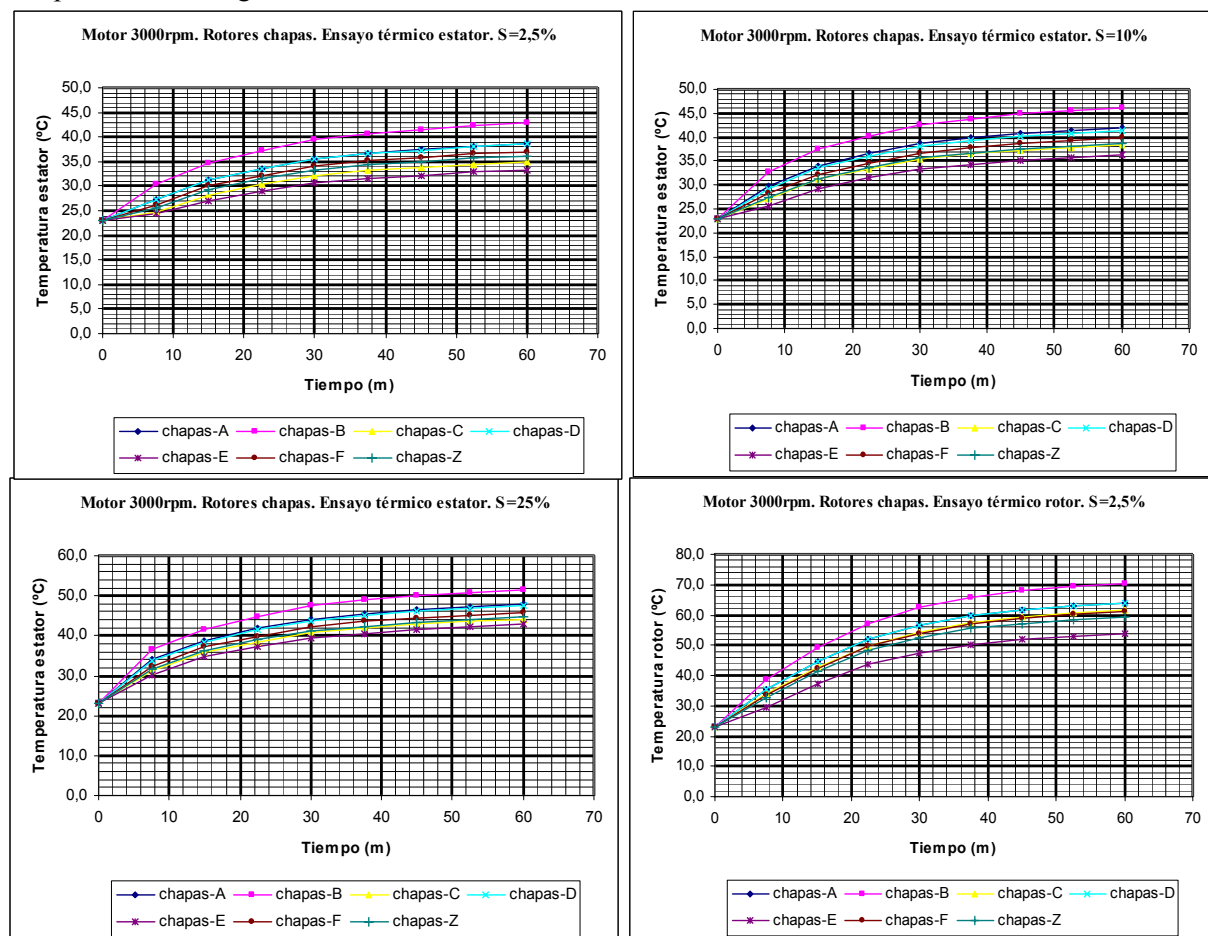


Figura 9.89. Temperatura del estator y del rotor de los motores equipados con rotores de chapas para diversos deslizamientos.

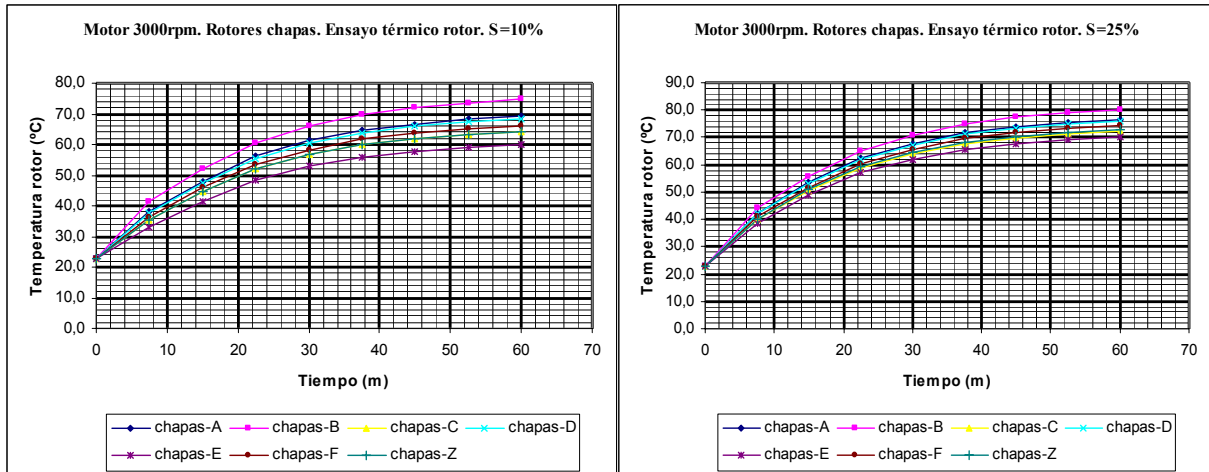


Figura 9.90. Temperatura del estator y del rotor de los motores equipados con rotores de chapas para diversos deslizamientos.

- s = 2.5% temperatura estator: E, C, Z, F, D, A, B
- s = 2.5% temperatura rotor: E, Z, F, C, D, A, B
- s = 25% temperatura estator: E, C, Z, F, D, A, B
- s = 25% temperatura rotor: E, C, Z, F, D, A, B

Si ahora tabulamos para estos dos deslizamientos, los motores a 3000 rpm, de menor a mayor intensidad, y colocamos en columnas anexas las temperaturas máximas alcanzadas tanto en el rotor como en el estator tendremos:

Temperatura motores de chapas a 3000rev/m

Motor	s= 2,5 %			s= 25 %		
	I (A)	Temp Estator	Temp Rotor	I(A)	Temp Estator	Temp Rotor
chapas tipo E	1,033	33,3	53,7	1,528	42,8	70,3
chapas tipo C	1,115	34,9	61,4	1,636	44,2	72,3
chapas tipo Z	1,163	36,1	59,4	1,687	44,7	73,1
chapas tipo F	1,201	37	61	1,756	45,8	74,3
chapas tipo D	1,275	38,5	63,9	1,904	47,5	76,2
chapas tipo A	1,276	38,6	63,9	1,945	47,9	76,7
chapas tipo B	1,537	42,9	70,5	2,333	51,5	80,2

Tabla IX.XIII. Intensidad y temperaturas del rotor y estator para diversos motores de chapas.

En la tabla anterior se aprecia que un aumento de la intensidad representa un aumento de la temperatura del estator, pero esta regla no es totalmente cierta en el rotor ya que por ejemplo para deslizamientos del 2.5 %, se observa que aun existiendo más intensidad en el motor tipo Z, que en el C, la temperatura es menor en el primero. Para deslizamientos mayores (25 %), este fenómeno no ocurre, debido a las altas intensidades que se dan en estos motores, las cuales priman de forma palpable sobre los otros efectos.

Si representamos gráficamente el aumento de la temperatura del estator y del rotor en función de la intensidad para los dos regimenes de funcionamiento dados podremos apreciar con más claridad la evolución de estas magnitudes (figura 9.91).

Gráficamente se aprecia que la temperatura del rotor para el modelo Z, sufre una inflexión respecto a otros motores de mayor intensidad. Este mismo efecto se ha observado a diferentes velocidades. La explicación debe buscarse en que este rotor no tenía las aristas mecanizadas, y además, de la parte lateral del rotor sobresalían unas chapas que hacían las veces de aletas de ventilación. Se aprecia que

con deslizamientos mayores este efecto pasa desapercibido, debido a que las intensidades al ser mayores pasan a tener un papel determinante en el aumento de la temperatura.

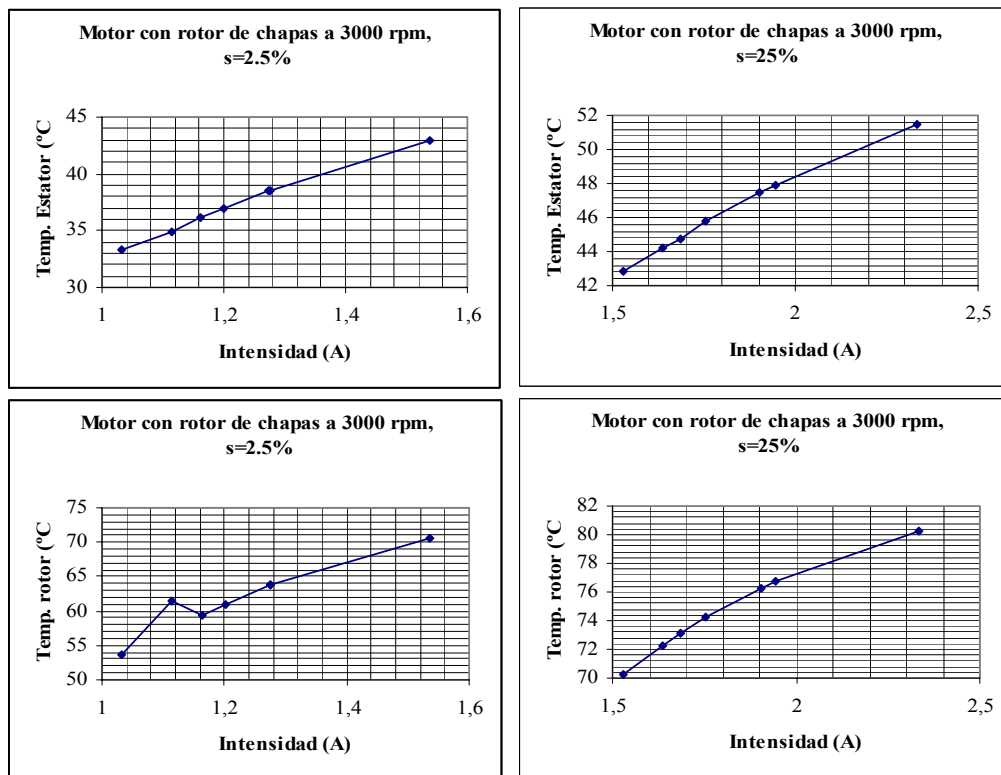


Figura 9.91. Evolución de la temperatura del estator y del rotor en función de la intensidad para dos regímenes de deslizamiento (2.5% y 25%).

En definitiva, la intensidad es el factor determinante en la temperatura del estator, siendo en este caso de poco valor la influencia que pueda presentar el calentamiento del rotor. En cambio cuando hablamos de temperatura del rotor, la composición del mismo, la forma constructiva, los materiales, los anillos con aletas, etc., pueden tener un papel determinante en la temperatura final, esto es cierto siempre que las intensidades entre los motores comparados no difieran sustancialmente (hasta un 12%). Cuando la diferencia de intensidades sobrepasa el 12-15 % entre motores el factor determinante pasa a ser la propia intensidad.

De forma empírica y para los motores analizados, la evolución de la temperatura del rotor y del estator en función de la intensidad puede determinarse mediante las siguientes ecuaciones dadas de menor a mayor temperatura y donde t , es el tiempo de funcionamiento en minutos.

▪ **Deslizamiento 2.5%. Temperatura estator**

$$\text{Motor E: } \Theta_{\text{estator}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0014 \cdot t^2 + 0.307 \cdot t + 22.744 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.68]$$

$$\text{Motor C: } \Theta_{\text{estator}} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0038 \cdot t^2 + 0.4194 \cdot t + 22.615 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.69]$$

$$\text{Motor Z: } \Theta_{\text{estator}} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0064 \cdot t^2 + 0.5137 \cdot t + 22.716 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.70]$$

$$\text{Motor F: } \Theta_{\text{estator}} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0.0083 \cdot t^2 + 0.5817 \cdot t + 22.789 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.71]$$

$$\text{Motor D: } \Theta_{\text{estator}} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0.00115 \cdot t^2 + 0.6983 \cdot t + 22.914 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.72]$$

$$\text{Motor A: } \Theta_{\text{estator}} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.00116 \cdot t^2 + 0.7034 \cdot t + 22.920 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.73]$$

$$\text{Motor B: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0208 \cdot t^2 + 1.0335 \cdot t + 23.274 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.74]$$

▪ **Deslizamiento 2.5%. Temperatura rotor**

$$\text{Motor E: } \Theta_{\text{rotor}} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0138 \cdot t^2 + 1.2018 \cdot t + 22.421 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.75]$$

$$\text{Motor Z: } \Theta_{\text{rotor}} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0226 \cdot t^2 + 1.5661 \cdot t + 22.703 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.76]$$

$$\text{Motor C: } \Theta_{\text{rotor}} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0259 \cdot t^2 + 1.6994 \cdot t + 22.806 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.77]$$

$$\text{Motor F: } \Theta_{\text{rotor}} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0252 \cdot t^2 + 1.672 \cdot t + 22.785 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.78]$$

$$\text{Motor D: } \Theta_{\text{rotor}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0297 \cdot t^2 + 1.8572 \cdot t + 22.928 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.79]$$

$$\text{Motor A: } \Theta_{\text{rotor}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0297 \cdot t^2 + 1.8584 \cdot t + 22.929 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.80]$$

$$\text{Motor B: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0400 \cdot t^2 + 2.2825 \cdot t + 23.257 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.81]$$

▪ **Deslizamiento 25%. Temperatura estator**

$$\text{Motor E: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0001 \cdot t^3 - 0.0206 \cdot t^2 + 1.028 \cdot t + 23.268 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.82]$$

$$\text{Motor C: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0235 \cdot t^2 + 1.1325 \cdot t + 23.38 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.83]$$

$$\text{Motor Z: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0246 \cdot t^2 + 1.1703 \cdot t + 23.42 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.84]$$

$$\text{Motor F: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0270 \cdot t^2 + 1.2584 \cdot t + 23.515 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.85]$$

$$\text{Motor D: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0306 \cdot t^2 + 1.3882 \cdot t + 23.654 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.86]$$

$$\text{Motor A: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0315 \cdot t^2 + 1.4211 \cdot t + 23.689 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.87]$$

$$\text{Motor B: } \Theta_{\text{estator}} = 0.0003 \cdot t^3 - 0.039 \cdot t^2 + 1.6929 \cdot t + 23.98 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.88]$$

▪ **Deslizamiento 25%. Temperatura rotor**

$$\text{Motor E: } \Theta_{\text{rotor}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0397 \cdot t^2 + 2.268 \cdot t + 23.245 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.89]$$

$$\text{Motor Z: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0440 \cdot t^2 + 2.4465 \cdot t + 23.384 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.90]$$

$$\text{Motor C: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0429 \cdot t^2 + 2.400 \cdot t + 23.348 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.91]$$

$$\text{Motor F: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0460 \cdot t^2 + 2.5275 \cdot t + 23.446 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.92]$$

$$\text{Motor D: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0489 \cdot t^2 + 2.6493 \cdot t + 23.540 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.93]$$

$$\text{Motor A: } \Theta_{\text{rotor}} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0497 \cdot t^2 + 2.6821 \cdot t + 23.566 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.94]$$

$$\text{Motor B: } \Theta_{\text{rotor}} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 - 0.0552 \cdot t^2 + 2.9057 \cdot t + 23.739 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [9.95]$$

El motor equipado con rotor de chapas tipo *A*, no es precisamente el motor que sufre un menor calentamiento, sino al contrario, es uno de los motores que alcanzan mayor temperatura, ocupando el penúltimo lugar en cuanto a elevación de la temperatura del estator y del rotor. En todo caso las diferencias tampoco son grandes oscilando entre los 38.6 °C y 76.7 °C del motor con rotor *A*, a los 33.3 °C y 70.3 °C del motor *E*. Nos quedamos pues con el motor con rotor de chapas *A*, ya que por efecto térmico no presenta problemas, siendo bastante mejor en otros aspectos electro-técnicos.

9.2.3.2 Características térmicas del motor de chapas *A*, para diversos deslizamientos

Una vez elegido el motor que analizaremos en profundidad, las siguientes cuatro gráficas (figura 9.92) plantean el problema térmico desde otra perspectiva. En este caso se resuelve por diferentes velocidades del motor con rotor de chapas tipo *A*, (1000, 1500-A, 1500 y 3000 rpm), englobándose en cada gráfica tres deslizamientos para el rotor y tres deslizamientos para el estator (2.5, 10 y 25 %)

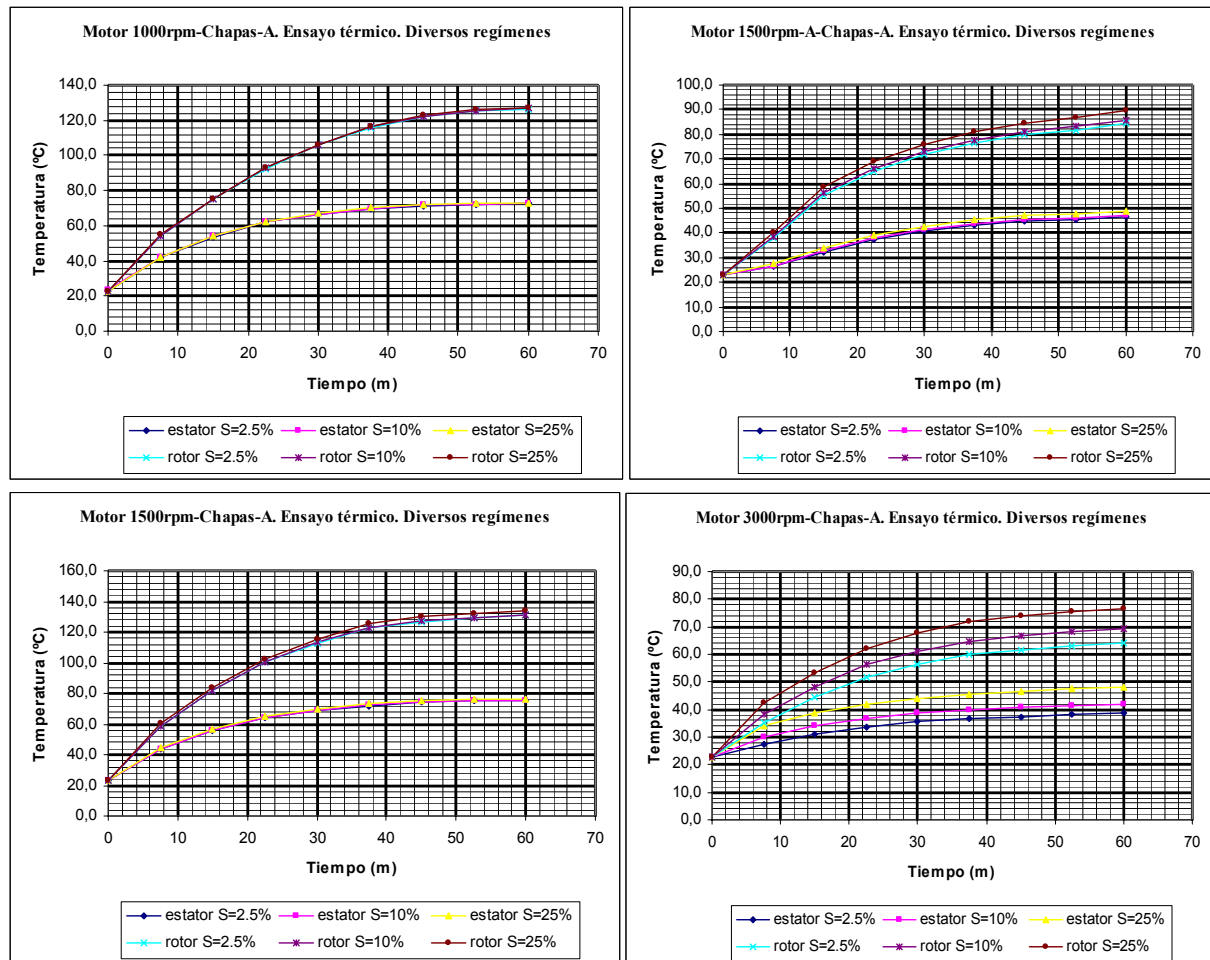


Figura 9.92. Temperatura del estator y del rotor del motor de chapas tipo *A*, para diversos regímenes.

En estas gráficas se observa que al variar los deslizamientos para cada velocidad específica, las intensidades prácticamente no varían, lo que significa una característica diferencial y positiva de estos motores con respecto a los motores de jaula convencionales. Las siguientes tablas y gráficas permiten apreciar esta evolución para el motor de chapas tipo *A*, a diversos deslizamientos.

En todo caso, en la figura 9.92, puede apreciarse que excepto en el régimen de 3000 rpm en los otros regímenes las temperaturas prácticamente no cambian al no variar de forma sustancial las intensidades para los tres deslizamientos analizados (2.5, 10 y 25 %).

Es precisamente en el motor a 3000 rpm donde se aprecia un ligero aumento de la temperatura tanto del estator como del rotor al variar el deslizamiento, pero en el peor de los casos la intensidad varía en 0.669 A, la temperatura del estator 9.3 °C, y la temperatura del rotor 12.8 °C, que pasados a valores porcentuales significa un 34.4%, un 19.4%, y un 16.7% respectivamente, que son en todo caso perfectamente asumibles.

Características motor de chapas tipo A, con 3000rev/m

n (rpm) - s(%)	I (A)	T Estat (°C)	T Rotor (°C)	n (rpm)	Pabsor (W)	Par (N·m)
1000-2,5	2,700	72,6	126,4	969	646	2,7
1000-10	2,710	73,1	126,7	915	700	10,0
1000-25	2,719	73,2	126,9	756	857	27,2
1500-A-2,5	2,013	46,5	84,5	1454	337	4,3
1500-A-10	2,049	47,6	86,3	1360	465	15,5
1500-A-25	2,109	48,8	89,5	1118	715	38,5
1500-2,5	3,234	75,4	131,1	1451	562	50,0
1500-10	3,298	76,1	132,8	1362	780	20,4
1500-25	3,393	76,5	134,4	1119	1171	55,2
3000-2,5	1,276	38,6	63,9	2893	302	4,0
3000-10	1,480	41,8	68,1	2715	580	12,8
3000-25	1,945	47,9	76,7	2229	1073	31,5

Tabla IX.XIV. Características eléctricas y térmicas del motor de chapas tipo A.

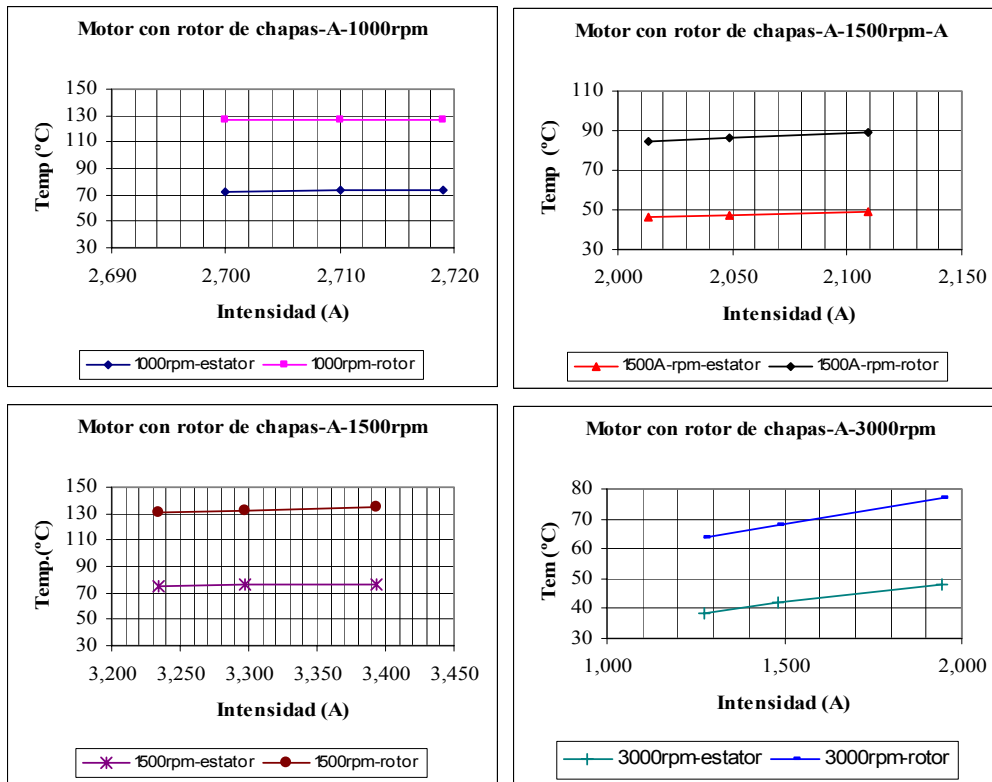


Figura 9.93. Temperatura del rotor y estator para diversos deslizamientos y velocidades.

9.2.3.3 Características térmicas para el motor de chapas tipo A, para diversas velocidades

Las próximas cuatro gráficas (figura 9.94) nos muestran para dos deslizamientos (2.5 y 25 %) el comportamiento del motor de chapas tipo A, en los cuatro regímenes de velocidades ensayados (1000, 1500-A, 1500 y 3000 rpm).

En todos los regímenes se observa la misma gradación de valores. Así el motor que más altas temperaturas soporta es el de 1500 rpm, seguido del de 1000 rpm, en tercer lugar encontramos al motor con 1500-A rpm y finalmente al motor de 3000 rpm. Esta gradación es completamente lógica y obedece a las mayores intensidades que se alcanzan en cada una de estas velocidades respectivas.

Podría pensarse, no obstante, que el motor de 1500 rpm presenta intensidades mayores (3.393 A) frente al motor de 1000 rpm (2.719 A), pero también presenta velocidades mayores (500 rpm de más) con la consiguiente ventilación más efectiva. Si comparamos valores se aprecia que el incremento de

la intensidad entre los dos motores representa un 26% y en cambio el incremento de la temperatura, tanto del rotor como del estator, no supera el 4% indicando la efectividad de una mayor ventilación.

Por último, cabe destacar que la progresión de temperaturas entre los diversos regímenes del motor de chapas tipo *A*, es mucho más homogénea en los motores con 1500-A y 3000 rpm que en los motores de 1000 y 1500 rpm. Este hecho corrobora el funcionamiento más equilibrado de los motores con menor saturación, mientras que los dos modelos más saturados presentan distribuciones térmicas más heterogéneas.

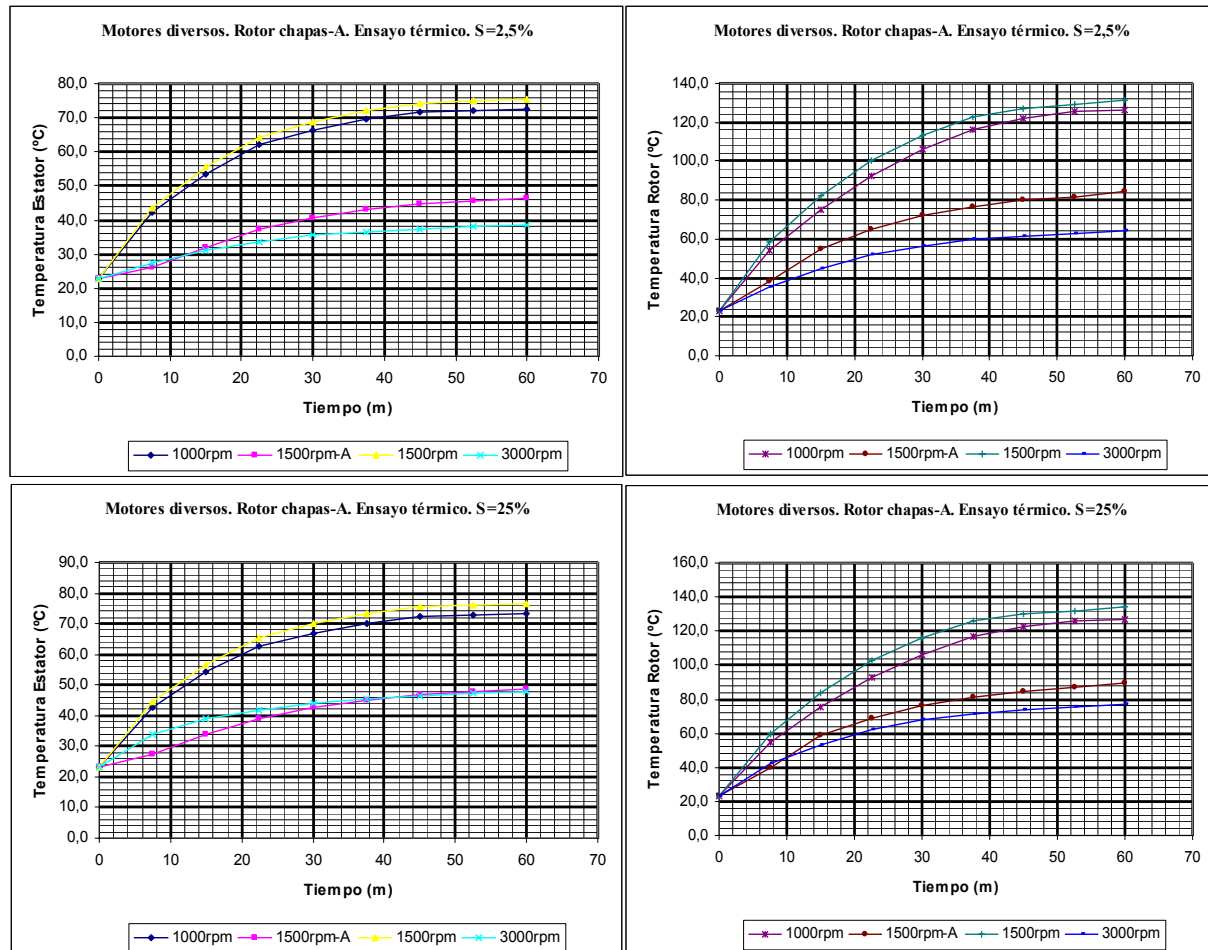


Figura 9.94. Temperatura del estator y del rotor de los motores equipados con rotores de chapas tipo *A*, para diversos regímenes y deslizamientos.

9.2.3.4 Resistencias y capacidades térmicas de los motores con rotores de chapas

La resistencia térmica (R_s) es una medida de la radiación o transferencia de calor entre la fuente generadora de calor (conductores del estator) y el ambiente. Un valor elevado de la resistencia térmica significa que la conductividad térmica es baja, lo que provoca un aumento de temperatura entre las partes interiores del motor y el exterior.

En cambio, la capacidad térmica (C_s), es un parámetro que nos proporciona información sobre el calentamiento y posterior almacenamiento del calor. Así, un valor alto de la capacidad térmica significa una constante de tiempo de valor elevado. Es decir, la capacidad térmica es la responsable del comportamiento térmico transitorio.

En la tabla IX.XV, puede apreciarse un resumen de los valores térmicos obtenidos con los motores de chapas a eficiencia máxima, es decir, donde obtienen su rendimiento eléctrico máximo. Este rendimiento no lo obtienen todos los modelos a la misma velocidad pero oscila alrededor de un

deslizamiento del 20 al 27% por lo que pueden considerarse perfectamente representativos los valores tomados a deslizamientos del 25%.

Esta tabla esta dividida en tres subtablas, la primera de las cuales recoge los valores generales de las pruebas, así como el incremento de temperatura entre el estator y el ambiente, y entre el rotor y el ambiente. También las características eléctricas como par, intensidad, potencia, rendimiento, etc. La segunda subtabla esta encaminada a hallar los parámetros térmicos del estator: resistencia, capacidad térmica y constantes de tiempo térmicas. Finalmente, la tercera subtabla busca los mismos parámetros térmicos pero en esta ocasión del rotor.

DATOS GENERALES	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Tiempo (m)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Tamb (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Ts (°C)	47,9	51,5	44,2	47,5	42,8	45,8	44,7
Tr (°C)	76,7	80,2	72,3	76,2	70,3	74,3	73,1
Tss=(Ts-Tamb) (°C)	25,4	29,0	21,7	25,0	20,3	23,3	22,2
Trss=(Tr-Tamb) (°C)	54,2	57,7	49,8	53,7	47,8	51,8	50,6
U (V)	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
I (A)	1,945	2,333	1,636	1,904	1,528	1,756	1,687
Pabs (W)	1073,0	1062,0	878,0	1050,0	875,0	940,0	899,0
T (kg cm)	31,5	23,8	20,3	29,0	18,7	26,2	21,8
n (rpm)	2229	2228	2222	2208	2217	2229	2231
w (rad/s)	233,4	233,3	232,6	231,2	232,1	233,4	233,6
To (N·m)	3,09	2,33	1,99	2,84	1,83	2,57	2,14
Po	720,6	544,2	462,9	657,1	425,5	599,3	499,1
Pt=Pabs-Po	352,4	517,8	415,1	392,9	449,5	340,7	399,9
$\eta=(Po/Pabs)\cdot 100$	67,2	51,2	52,7	62,6	48,6	63,8	55,5
cos φ	0,84	0,69	0,82	0,84	0,87	0,81	0,81
To/I (N·m/A)	1,59	1,00	1,22	1,49	1,20	1,46	1,27
To/Pabs (N·m/W)	0,0029	0,0022	0,0023	0,0027	0,0021	0,0027	0,0024

ESTATOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Rs=(Tss/Pt) (°C/W)	0,0721	0,0560	0,0523	0,0636	0,0452	0,0684	0,0555
?s (m)	15,0	14,0	15,2	15,0	17,0	15,0	15,0
?s (s)	900	840	912	900	1020	900	900
Cs=(τs /Rs)	12487	14999	17445	14143	22587	13159	16211

ROTOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Rr=(Trss/Pt) (°C/W)	0,1538	0,1114	0,1200	0,1367	0,1063	0,1521	0,1265
Rrs=Rr-Rs (°C/W)	0,0817	0,0554	0,0677	0,0731	0,0612	0,0837	0,0710
?r (m)	19,0	20,0	20,0	20,0	19,0	18,5	19,5
?r (s)	1140	1200	1200	1200	1140	1110	1170
Cr=(τr /Rs)	7413	10769	10002	8779	10721	7300	9246

Tabla IX.XV. Valores térmicos con eficiencia máxima para los motores de chapas a 3000 rpm.

La segunda tabla se calculan y exponen los mismos términos pero en esta ocasión buscados a regímenes nominales (deslizamientos alrededor del 3%). También esta tabla esta dividida en tres

subtablas con los valores generales, los valores particulares del estator y finalmente la tercera subtabla, con los valores correspondientes al rotor.

En cualquiera de los regímenes anteriores, las resistencias y capacidades térmicas son semejantes y elevadas, aunque no en exceso, si recordamos que son rotores con una resistencia mayor que los de jaula, pero menor que los macizos.

En definitiva el modelo con rotor tipo *A*, objeto de nuestro análisis, térmicamente es uno de los modelos menos favorables, pero en valores relativos, las diferencias entre modelos son poco significativas, y por tanto, no desentona en demasía para desdeñarlo por razones térmicas.

DATOS GENERALES	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Tiempo (m)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Tamb (°C)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Ts (°C)	38,6	42,9	34,9	38,5	33,3	37,0	36,1
Tr (°C)	63,9	70,5	61,4	63,9	53,7	61,0	59,4
Tss=(Ts-Tamb) (°C)	15,6	19,9	11,9	15,5	10,3	14,0	13,1
Trss=(Tr-Tamb) (°C)	40,9	47,5	38,4	40,9	30,7	38,0	36,4
U (V)	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
I (A)	1,276	1,537	1,115	1,275	1,033	1,201	1,163
Pabs (W)	302,0	290,0	245,0	307,0	250,0	270,0	241,0
T (kg cm)	4,0	3,0	2,6	3,7	2,4	3,3	2,8
n (rpm)	2893	2882	2896	2887	2889	2892	2892
w (rad/s)	302,9	301,7	303,2	302,3	302,5	302,8	302,8
To (N·m)	0,39	0,29	0,25	0,36	0,23	0,33	0,27
Po	118,8	88,7	76,7	109,0	70,3	98,8	82,2
Pt=Pabs·Po	183,2	201,3	168,3	198,0	179,7	171,2	158,8
$\eta=(Po/Pabs) \cdot 100$	39,3	30,6	31,3	35,5	28,1	36,6	34,1
cos φ	0,36	0,29	0,33	0,37	0,37	0,34	0,32
To/I (N·m/A)	0,31	0,19	0,23	0,28	0,22	0,27	0,23
To/Pabs (N·m/W)	0,0013	0,0010	0,0010	0,0012	0,0009	0,0012	0,0011

ESTATOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Rs=(Tss/Pt) (°C/W)	0,0851	0,0989	0,0707	0,0783	0,0573	0,0818	0,0825
?s (m)	20,0	16,0	22,0	22,6	22,6	22,0	22,0
?s (s)	1200	960	1320	1356	1356	1320	1320
Cs=(τ s/Rs)	14095	9709	18671	17319	23662	16139	16000

ROTOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-C	Tipo-D	Tipo-E	Tipo-F	Tipo-Z
Rr=(Trss/Pt) (°C/W)	0,2232	0,2360	0,2281	0,2066	0,1708	0,2220	0,2292
Rrs=Rr-Rs (°C/W)	0,1381	0,1371	0,1574	0,1283	0,1135	0,1402	0,1467
?r (m)	20,0	18,0	20,0	21,5	21,5	20,0	20,0
?r (s)	1200	1080	1200	1290	1290	1200	1200
Cr=(τ r/Rs)	5376	4576	5260	6244	7552	5405	5235

Tabla IX.XVI. Valores térmicos con régimen nominal para los motores de chapas a 3000 rpm.

9.2.4 ANÁLISIS MECÁNICO DE LOS MOTORES CON ROTOR DE CHAPAS

Una vez realizado el análisis electromagnético y térmico pasamos a estudiar el comportamiento de estos rotores en sus respuestas mecánicas. Hasta ahora hemos comprobado que térmicamente no existen diferencias sustanciales entre los rotores probados, pero son quizás las pruebas mecánicas las que presentan una mayor preocupación ya que la construcción de los rotores de chapas podría no permitir funcionamientos prolongados del motor, o bien, simplemente que las chapas colocadas alrededor del eje constructivo no tuvieran la suficiente rigidez mecánica para soportar los esfuerzos magnéticos a los que estarían sometidos estos motores.

En primer lugar se analizarán las pérdidas totales mecánicas que engloban las pérdidas debidas al rozamiento de los cojinetes y las pérdidas debidas al rozamiento del aire con el ventilador y con el propio rotor cuando éste se encuentra en movimiento. Seguidamente, y aprovechando el mismo banco de pruebas, se realizaron los ensayos que permiten calcular las inercias de los rotores empleados. Estas inercias incluyen el núcleo del rotor, su eje y los cojinetes, es decir, todo el conjunto. Finalmente, se han realizado unos ensayos de resistencia mecánica en largos periodos de funcionamiento con estos rotores, demostrándose que aunque no es su cometido funcionar de forma continua, son capaces de resistir perfectamente estos regímenes.

Es importante destacar que las pruebas se han efectuado con el mismo estator (3000 rpm), ya que como se recordará todos los estatores son iguales, variando solamente por el bobinado que incorporan. De esta forma, con el estator de dos polos, es posible conseguir toda la gama de velocidades, permitiendo una mejor comparación entre ellos.

9.2.4.1 Pérdidas mecánicas debidas a los cojinetes, ventilador y efecto del aire

Comprenden las pérdidas por rozamiento de los cojinetes, las pérdidas por rozamiento del aire y la potencia absorbida por el ventilador. Estas pérdidas son función de la velocidad tangencial del rotor aumentando rápidamente con ésta y también con el volumen del rotor.

Las siguientes tablas hacen referencia a los valores hallados de forma experimental tanto para las pérdidas mecánicas de los cojinetes como para las pérdidas debidas al rozamiento del aire (tanto con el ventilador, como con el mismo rotor cuando éste se encuentra en funcionamiento). El banco de pruebas nos determina estas pérdidas dejando que los rotores puedan funcionar durante tres minutos como mínimo antes de realizar las lecturas. Se efectuaron tres lecturas por régimen y rotor anotándose la velocidad de la prueba, el par, y las pérdidas mecánicas halladas.

COJINETE BANCADA				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Potencia Pérdidas (W)	Promedio Pérdidas (P _c) (W)
1000	1008	0.180	20	20
	1009	0.182	20	
	1009	0.185	21	
1500	1497	0.226	35	35
	1496	0.234	35	
	1496	0.227	34	
3000	2996	0.271	85	85
	2994	0.249	84	
	2993	0.264	85	

Tabla IX.XVII Valores de las pérdidas mecánicas en el cojinete de la bancada.

Se tomaron de forma independiente las pérdidas debidas al cojinete del propio banco de pruebas, así como a la influencia del ventilador (que al ser igual para todos los motores coinciden sus valores), restándose estos valores del total hallado para cada rotor, con lo cual podemos obtener las pérdidas mecánicas debidas exclusivamente al rotor (chapas, eje y cojinetes propios).

VENTILADOR MOTOR				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Potencia Pérdidas (W)	Promedio Pérdidas (P_V) (W)
1000	1009	0.180	2	2
	1010	0.182	2	
	1009	0.185	3	
1500	1494	0.226	4	5
	1493	0.234	6	
	1494	0.227	5	
3000	2995	0.271	15	15
	2994	0.249	15	
	2994	0.264	14	

Tabla IX.XVIII Valores de las pérdidas mecánicas del ventilador del motor probado.

Aparte de estas tablas generales, se detallan las pérdidas para cada uno de los motores de chapas utilizados considerándose sus tres regímenes de funcionamiento (1000, 1500, y 3000 rpm). Es interesante contrastar en estas tablas el incremento que sufren las pérdidas totales al aumentar la velocidad de giro.

ROTOR CHAPAS TIPO A				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P_t) (W)	Pérdidas Cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1010	0.555	46	23
	1009	0.539	45	
	1009	0.542	45	
1500	1492	0.604	95	55
	1493	0.612	92	
	1492	0.613	93	
3000	2993	0.740	216	112
	2992	0.750	214	
	2994	0.720	210	

Tabla IX.XIX. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo A.

ROTOR CHAPAS TIPO B				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P_t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1010	0.353	37	17
	1009	0.366	39	
	1009	0.369	39	
1500	1498	0.496	78	36
	1498	0.486	76	
	1497	0.471	74	
3000	2990	0.544	170	70
	2990	0.539	169	
	2989	0.533	167	

Tabla IX.XX. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo B.

ROTOR CHAPAS TIPO C				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P_t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1010	0.416	40	18
	1011	0.408	40	
	1011	0.420	39	
1500	1492	0.429	70	30
	1493	0.440	71	
	1492	0.452	70	
3000	2993	0.612	192	85
	2992	0.583	183	
	2992	0.584	183	

Tabla IX.XXI. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo C.

ROTOR CHAPAS TIPO D				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P _t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1009	0.343	41	19
	1010	0.354	42	
	1009	0.355	42	
1500	1496	0.484	80	38
	1497	0.492	81	
	1496	0.482	80	
3000	2992	0.556	173	73
	2993	0.546	172	
	2983	0.543	172	

Tabla IX.XXII. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo D.

ROTOR CHAPAS TIPO E				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P _t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1010	0.489	52	28
	1010	0.461	49	
	1011	0.454	48	
1500	1498	0.491	77	36
	1497	0.485	76	
	1498	0.474	74	
3000	2996	0.660	207	105
	2996	0.666	209	
	2995	0.636	202	

Tabla IX.XXIII. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo E.

ROTOR CHAPAS TIPO F				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P _t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1009	0.474	50	28
	1008	0.468	49	
	1009	0.475	50	
1500	1493	0.551	86	46
	1494	0.554	87	
	1494	0.542	85	
3000	2996	0.577	181	80
	2995	0.566	178	
	2996	0.575	180	

Tabla IX.XXIV. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo F.

ROTOR CHAPAS TIPO Z				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Pérdidas totales (P _t) (W)	Pérdidas cojinetes-roce aire (W) $P_{CA-Rotor} = P_t - P_c - P_V$
1000	1011	0.363	41	22
	1010	0.372	44	
	1010	0.375	43	
1500	1495	0.502	82	40
	1496	0.500	80	
	1497	0.496	81	
3000	2991	0.562	176	75
	2992	0.575	175	
	2991	0.569	174	

Tabla IX.XXV. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo Z.

En una tabla resumen podemos ver de forma condensada estas pérdidas totales debidas a los cojinetes más el roce con el aire.

Tipo de Motor	pérdidas a 1000 rpm	pérdidas a 1500 rpm	pérdidas a 3000 rpm
chapas A	23	55	112
chapas B	17	36	70
chapas C	18	30	85
chapas D	19	38	73
chapas E	28	36	105
chapas F	28	46	80
chapas Z	22	40	75

Tabla IX.XXVI. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes de los rotores de chapas.

De la tabla se desprende que las pérdidas por estos conceptos son perfectamente asumibles destacando la pequeña elevación que se observa con el rotor de chapas tipo A, con 3000 rpm, debido principalmente a pequeños roces de los cojinetes. El mismo problema vuelve a aparecer en el motor de chapas tipo E. En todo caso, las pérdidas mecánicas no hacen destacar a estos motores de forma excesiva respecto a los modelos tradicionales.

9.2.4.2 Momento de inercia de los rotores de chapas

Vamos a analizar en segundo lugar como se comportan los motores con rotores de chapas en cuanto a su momento de inercia. En este caso sólo se presentan las gráficas obtenidas para el motor de chapas tipo A, ya que las restantes gráficas están expuestas en los anexos de esta obra.

El cálculo de los momentos de inercia de estos motores resulta complicado, es por ello que para llegar a obtener un valor fiable fue necesario efectuar los correspondientes ensayos experimentales mediante el concurso de unos dispositivos de medida que permitieran controlar la evolución del par y de la velocidad en sucesivos arranques y paradas de los rotores ensayados.

Para cada ensayo se han efectuado tres arranques consecutivos de unos 7 s, cada uno, adoptándose para el tiempo de lectura total el valor de 40 s, lo cual permite obtener tres periodos completos. Mediante el uso de los cursores y tomando como referencia una de las señales se leen los valores de la velocidad y del par en los periodos de arranque o de deceleración de cada figura, estando todos estos valores tabulados al final de las imágenes. Para la obtención del par se ha efectuado una tercera medición para tomar con más precisión su valor medio. En todos ellos se ha fijado un periodo de aceleración de 2 s.

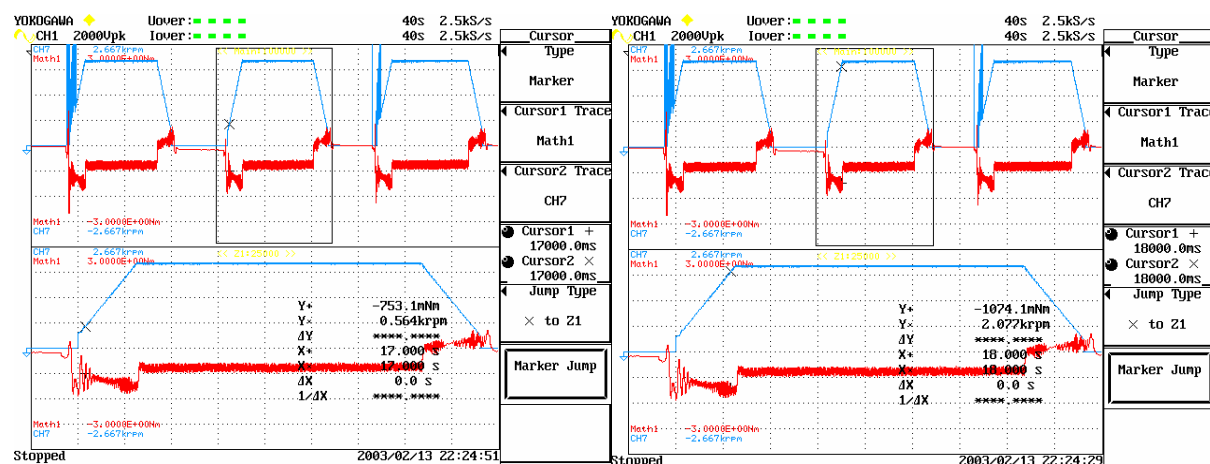


Figura 9.95. Evolución de la velocidad y del par en el rotor chapas tipo A. Valores obtenidos con unos tiempos de 17.00 s y 18.00 s.

De forma resumida las siguientes tablas muestran los parámetros de cálculo que permiten hallar el momento de inercia de estos motores con rotor de chapas.

Tipo Rotor	n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	Δn (rpm)	t_1 (s)	t_2 (s)	Δt (s)	Acelera. $\alpha = \Delta n / \Delta t$ (rev/s ²)	Acelera. α (rad/s ²)
Chapas A	2077	564	1513	18.0	17.0	1.0	1513	158.4
Chapas B	2033	573	1460	26.7	25.7	1.0	1460	152.9
Chapas C	2168	678	1490	11.6	10.6	1.0	1490	156.0
Chapas D	2087	571	1516	17.5	16.5	1.0	1516	158.8
Chapas E	2175	672	1503	14.2	13.2	1.0	1503	157.4
Chapas F	2133	645	1488	15.7	14.7	1.0	1488	155.8
Chapas Z	1978	504	1474	6.3	5.3	1.0	1474	154.4

Tabla IX.XXVII. Cálculo de la aceleración de los diferentes rotores ensayados.

Tipo Rotor	Acelera. α (rad/s)	Par total (T_t) (N·m)	Par pérdidas (T_n) (N·m)	Par neto (T) (N·m) $T = T_t - T_n$	Inercia pieza Soporte (J_s) (N·m ²)	Inercia (kg/m ²) $J = T / \alpha$
Chapas A	158.4	1.032	0.601	0.429	0.000113	$2.714 \cdot 10^{-3}$
Chapas B	152.9	0.839	0.419	0.4186	0.000113	$2.737 \cdot 10^{-3}$
Chapas C	156.0	0.903	0.548	0.354	0.000113	$2.269 \cdot 10^{-3}$
Chapas D	158.8	0.982	0.530	0.450	0.000113	$2.834 \cdot 10^{-3}$
Chapas E	157.4	0.990	0.520	0.478	0.000113	$3.041 \cdot 10^{-3}$
Chapas F	155.8	0.935	0.516	0.418	0.000113	$2.687 \cdot 10^{-3}$
Chapas Z	154.4	0.967	0.516	0.4506	0.000113	$2.918 \cdot 10^{-3}$

Tabla IX.XXVIII. Cálculo de los momentos de inercia de los diferentes rotores ensayados.

Si comparamos los momentos de inercia de los diversos rotores de chapas podremos apreciar que los valores son prácticamente iguales, manteniéndose en todos los casos alrededor de los 0.0003 kg/m². Estos valores, como veremos en la comparación con los rotores más convencionales, no destacan ni entre sí, ni en la comparación con otros modelos de rotores. Por tanto, se dan por válidas estas inercias, no presentando problemas por este concepto, los motores de chapas.

9.2.4.3 Resistencia mecánica de los rotores de chapas ante pruebas de largo funcionamiento

Finalmente, se han sometido los rotores de chapas a largos periodos de funcionamiento. Aunque los rotores objeto de estudio se construyeron desde el principio pensando en un régimen de trabajo óptimo transitorio, con muchas paradas y arrancadas y pocos periodos dilatados de funcionamiento continuo, se creyó conveniente conocer su respuesta con regímenes permanentes, ya que de esta respuesta dependería su potencial aplicación en otras actividades industriales no contempladas en esta investigación.

Así se dispusieron los rotores en unas condiciones de trabajo estándar (sus condiciones nominales) para el régimen de giro más rápido y por tanto más proclive a sufrir deformaciones, el de 3000 rpm.

Realizándose todas las experiencias en el mismo banco de pruebas ya utilizado en las pruebas eléctricas.

Con cada rotor se efectuaron dos pruebas independientes haciéndolos funcionar el motor durante cuatro horas ininterrumpidas entre las cuales se dejó descansar el motor el tiempo suficiente para que recuperase la temperatura en frío.

Como muestra de las tablas obtenidas, las cuales pueden consultarse en los anexos, se adjunta la tabla de funcionamiento del motor con rotor de chapas tipo A.

Motor 3000rpm. Rotor chapas-A. Ensayo mecánico. S=2,5%										
Tiempo (m)	U (V)	T ambi. (°C)	T. Estat (°C)	T. Rotor (°C)	Cos φ	P (W)	In (A)	n (rpm)	T (kg cm)	T (N·m)
30'	380	20,5	23,0	23,0	0,36	295	1,286	2935	4,1	0,40
60'	380	20,5	38,3	64,0	0,35	311	1,306	2856	4,2	0,41
90'	380	20,5	43,8	65,0	0,35	301	1,290	2835	4,1	0,40
120'	380	20,5	47,0	66,0	0,35	305	1,282	2825	4,0	0,39
150'	380	20,5	49,8	67,0	0,36	312	1,297	2814	4,0	0,39
180'	380	20,5	51,3	67,5	0,36	316	1,297	2805	4,0	0,39
210'	380	20,5	52,4	68,0	0,37	323	1,301	2800	3,9	0,38
240'	380	20,5	53,3	68,6	0,36	326	1,306	2795	4,0	0,39

Tabla IX.XXIX. Prueba resistencia mecánica del rotor de chapas tipo A, a 3000 rpm con un deslizamiento del 2.5%.

Se ha demostrado pues, que la mayor parte de los rotores construidos, aunque no sea su finalidad óptima, pueden resistir largos periodos de funcionamiento sin presentar problemas de rigidez mecánica ni de deformación de las chapas, comprobándose asimismo, que sus propiedades electromagnéticas también se mantienen dentro de unos niveles aceptables.

El estado superficial de los rotores y su cilindridad después de las cuatro horas de funcionamiento ininterrumpido ha sido analizado pudiéndose concretar en la siguiente tabla.

Rotor	Estado final del rotor
Rotor chapas A	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas B	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas C	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas D	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas E	Algún signo de rozamiento superficial. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas F	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas Z	Algún signo de rozamiento superficial. Cilindridad perfecta.

Tabla IX.XXX. Estado final mecánico de la superficie del rotor y su cilindridad.

En definitiva, los motores de chapas no presentan problemas mecánicos destacables, no encontrándose diferencias destacables entre los diversos modelos analizados, lo que permite concluir que el motor con rotor de chapas tipo A, con 3000 rpm, aunque en algunos resultados mecánicos no es el más brillante, supera con creces las pruebas a las que ha estado sometido.

Con objeto de visualizar los resultados eléctricos obtenidos y para su más fácil comparación entre modelos se han graficado estos valores, los cuales pueden completarse en los anexos, dándose en este apartado una muestra de ellos.

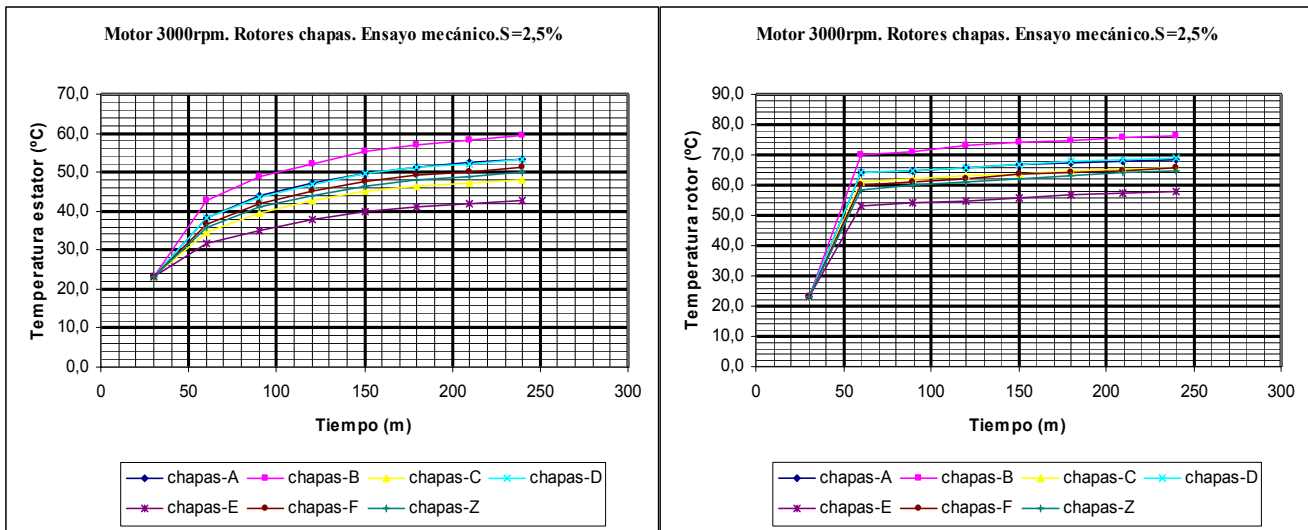


Figura 9.96. Rotores de chapas a 3000 rpm. Temperatura del estator y rotor versus tiempo.

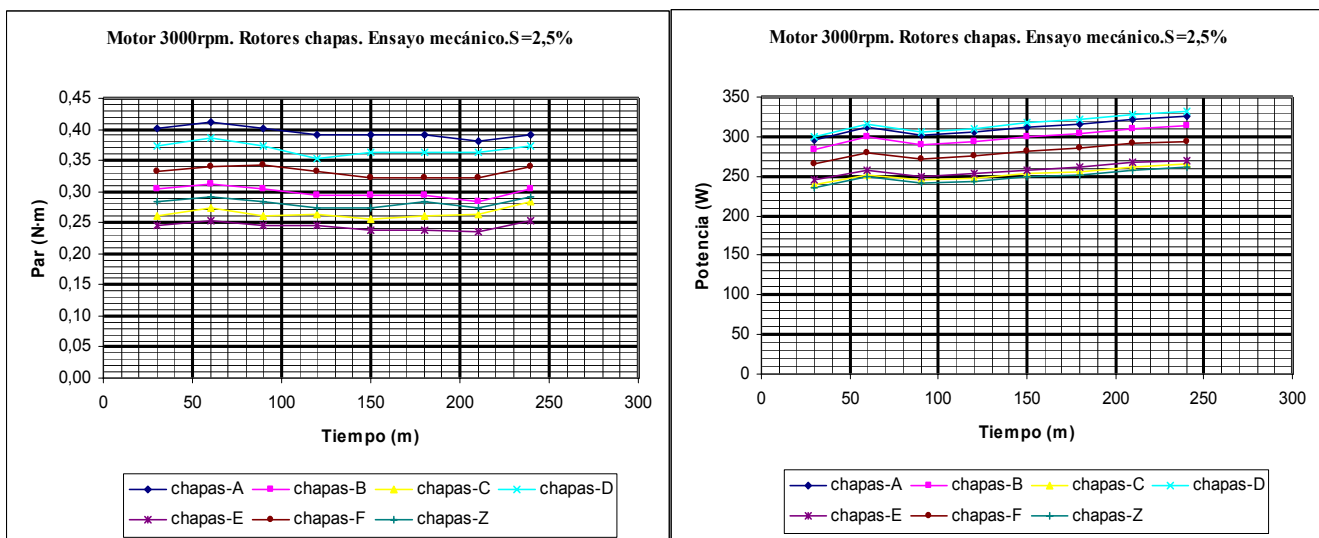


Figura 9.97. Rotores de chapas a 3000 rpm. Par y potencia versus tiempo.

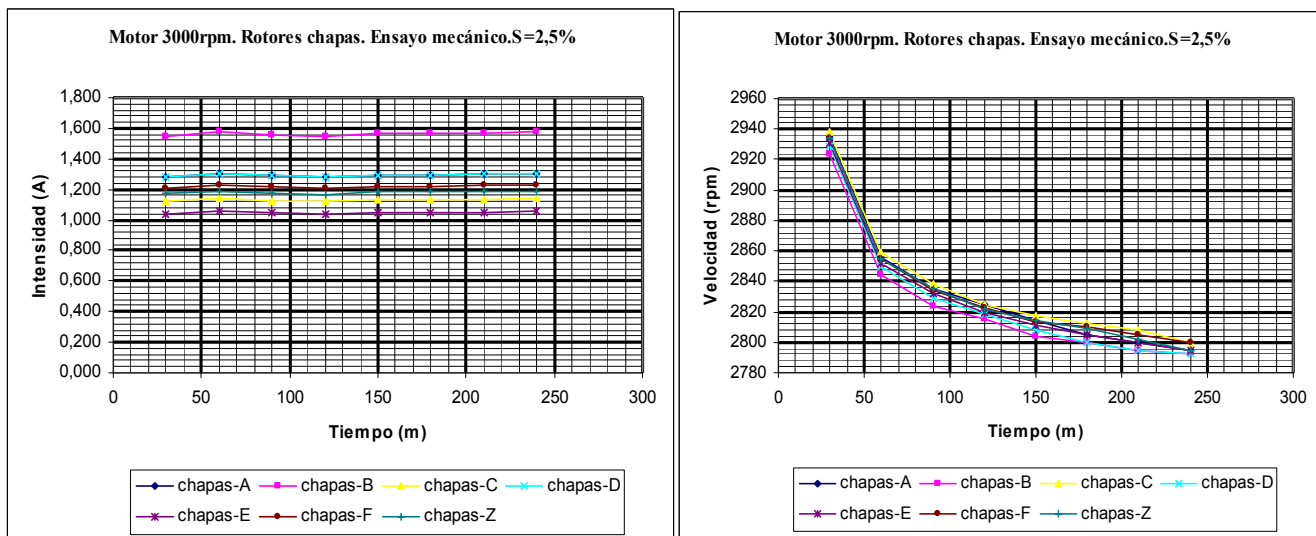


Figura 9.98. Rotores de chapas a 3000 rpm. Intensidad y velocidad versus tiempo.

Podemos concluir a la vista de estas gráficas que los motores de chapas no presentan problemas importantes ni en aspectos de rozamiento ni en deformaciones superficiales delante de periodos de funcionamientos prolongados. Aparte, los valores de las magnitudes eléctricas y térmicas tampoco salen perjudicadas con regímenes permanentes.