

### 9.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS ENTRE DIVERSOS MOTORES

Una vez efectuado el análisis de los motores con rotor de chapas y comprobar cuales eran los modelos más eficaces, vamos a efectuar una comparación entre estos modelos de chapas y otros modelos convencionales.

Este estudio será más breve ya que la finalidad de este trabajo era analizar el motor con rotor de chapas, aunque se creyó conveniente compararlo con otros motores más usuales. Este es el motivo por el que en esta comparativa, aunque en algunos resultados aparecerán otros motores, se centrará básicamente en tres: motor con rotor de chapas-A, motor con rotor de jaula y motor con rotor macizo con aros, todos ellos al régimen de 3000 rpm con el cual se han obtenido los mejores resultados.

La forma de proceder es la misma que se ha seguido en la comparación entre motores de chapas, pasando por el análisis en primer lugar de 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.

En la siguiente tabla se resumen las características más representativas de los diversos rotores analizados en esta sección. 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.

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

Tabla IX.XXXI. Principales características mecánicas de los rotores analizados

Una vez recordadas las características principales de estos motores, pasamos a analizar los resultados obtenidos con los mismos.

#### 9.3.1 ANÁLISIS ELÉCTRICO DE LOS MOTORES DE JAULA, MACIZO CON AROS Y CHAPAS TIPO A

En primer lugar se analizarán las características eléctricas halladas al realizar los ensayos experimentales. Cabe recordar que estos ensayos se realizaron en su gran mayoría por duplicado, manteniendo las constantes de temperatura y humedad del laboratorio dentro de un estrecho margen. Con todas estas medidas se consideran válidos los resultados obtenidos mediante estos ensayos, siendo más significativos que las simulaciones realizadas con programas de elementos finitos.

Seguidamente se muestran las gráficas de la evolución con respecto a la velocidad de algunas de las magnitudes eléctricas más importantes referidas al motor de 3000 rpm. En cada gráfica se representan algunos de los rotores de chapas construidos, más el rotor macizo, macizo con aros, jaula de ardilla y el rotor hueco.

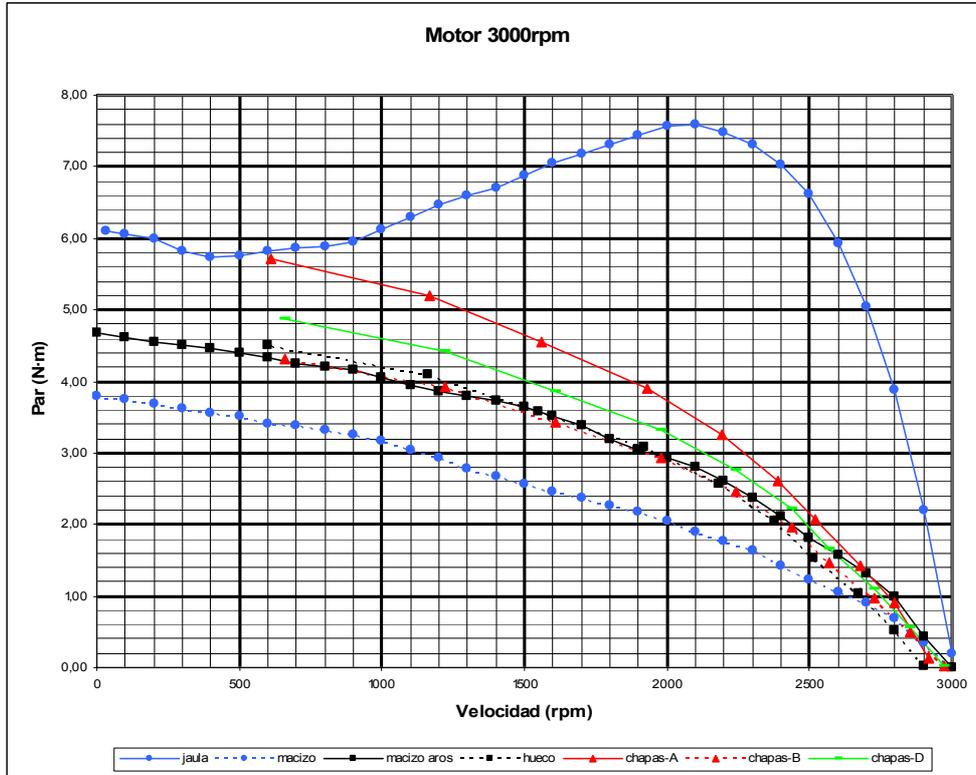


Figura 9.99. Variación del par con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

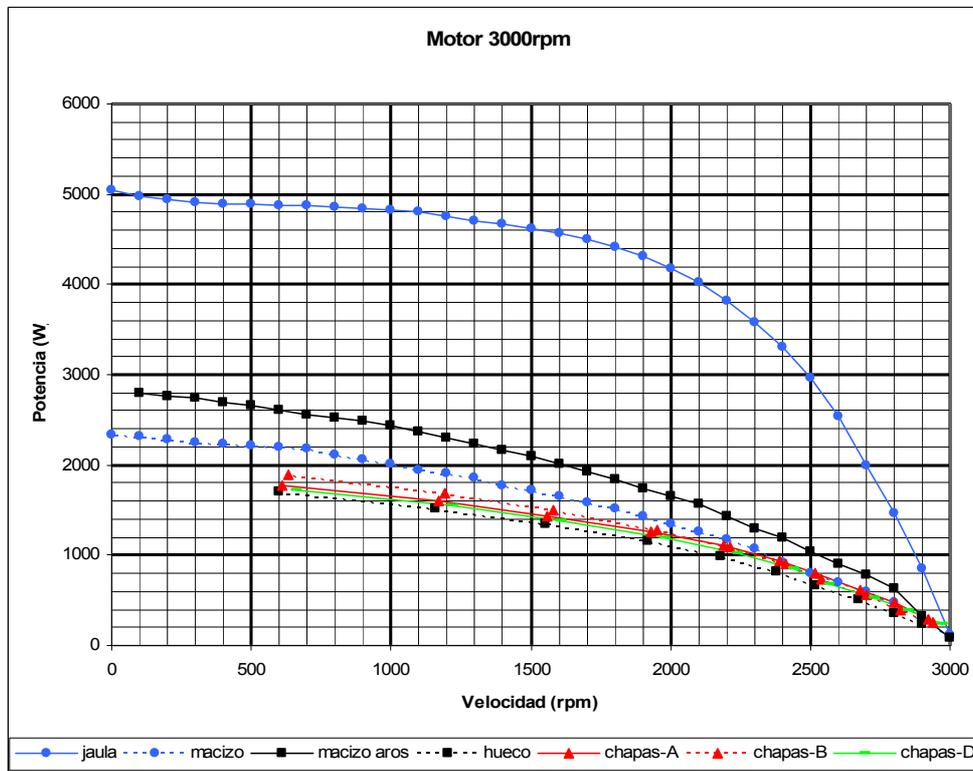


Figura 9.100. Variación de la potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

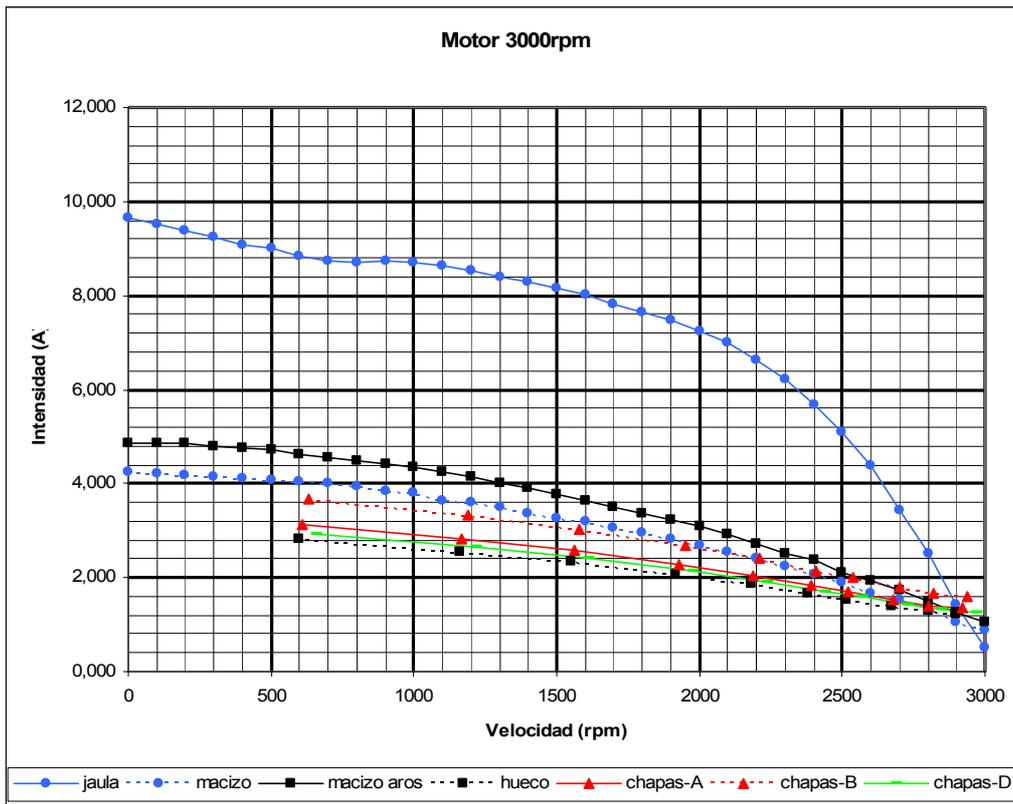


Figura 9.101. Variación de la intensidad con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

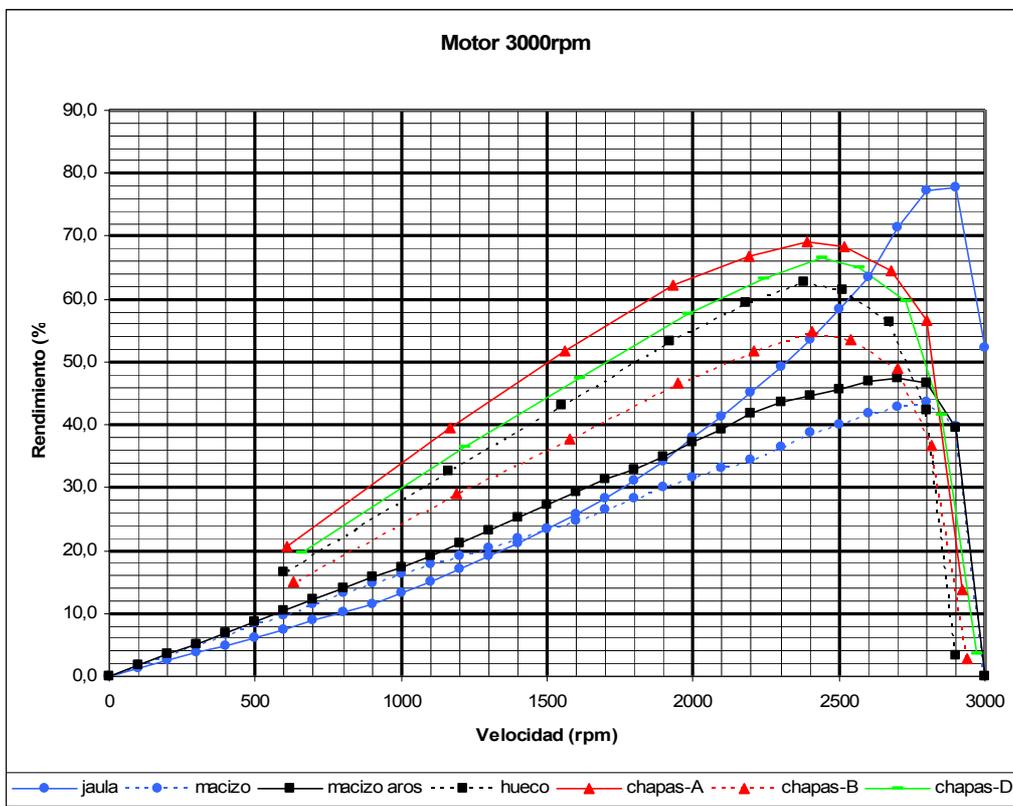


Figura 9.102. Variación del rendimiento con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

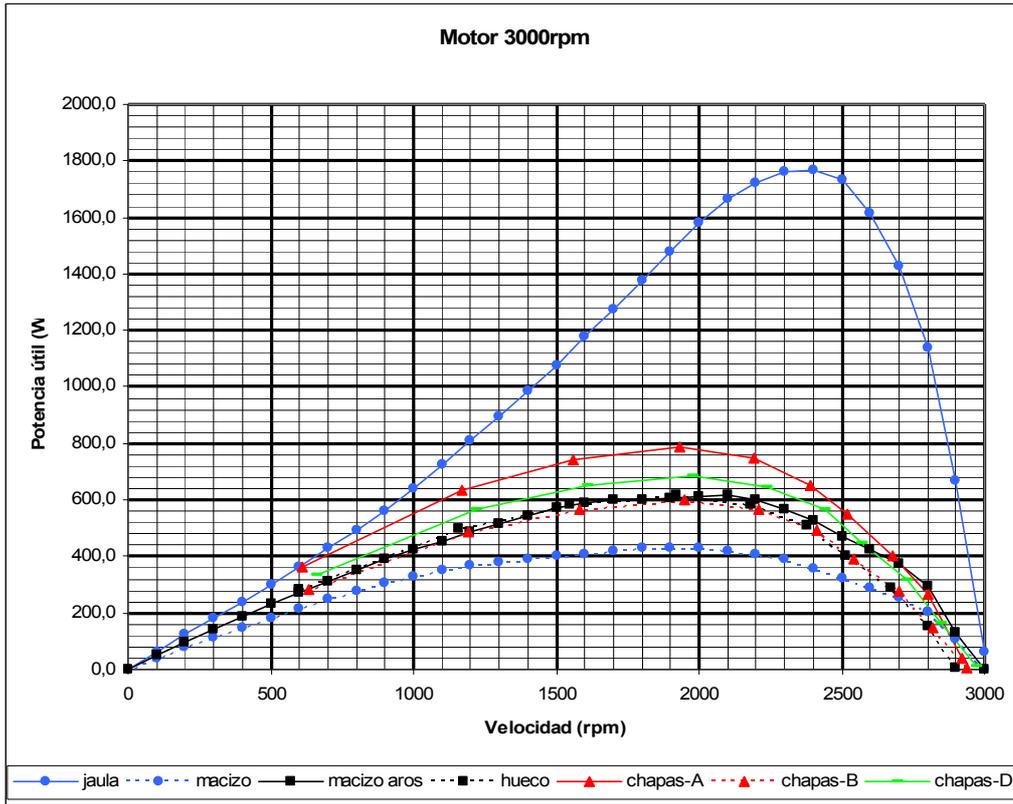


Figura 9.103. Variación de la potencia útil con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

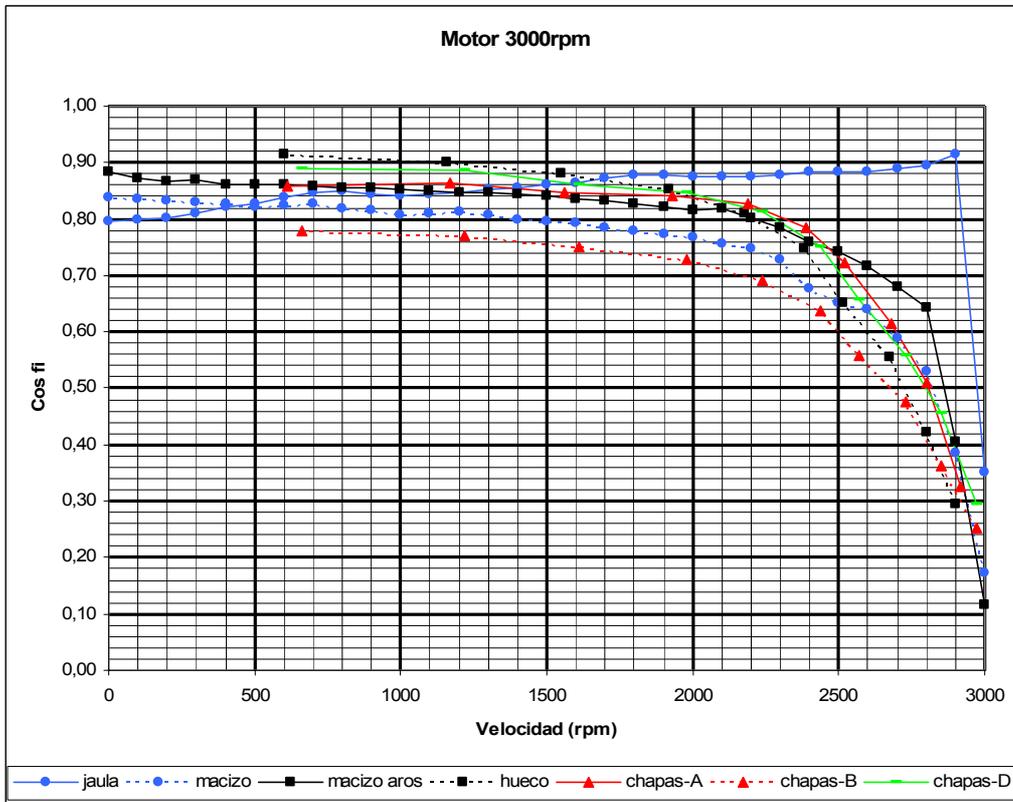


Figura 9.104. Variación del factor de potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

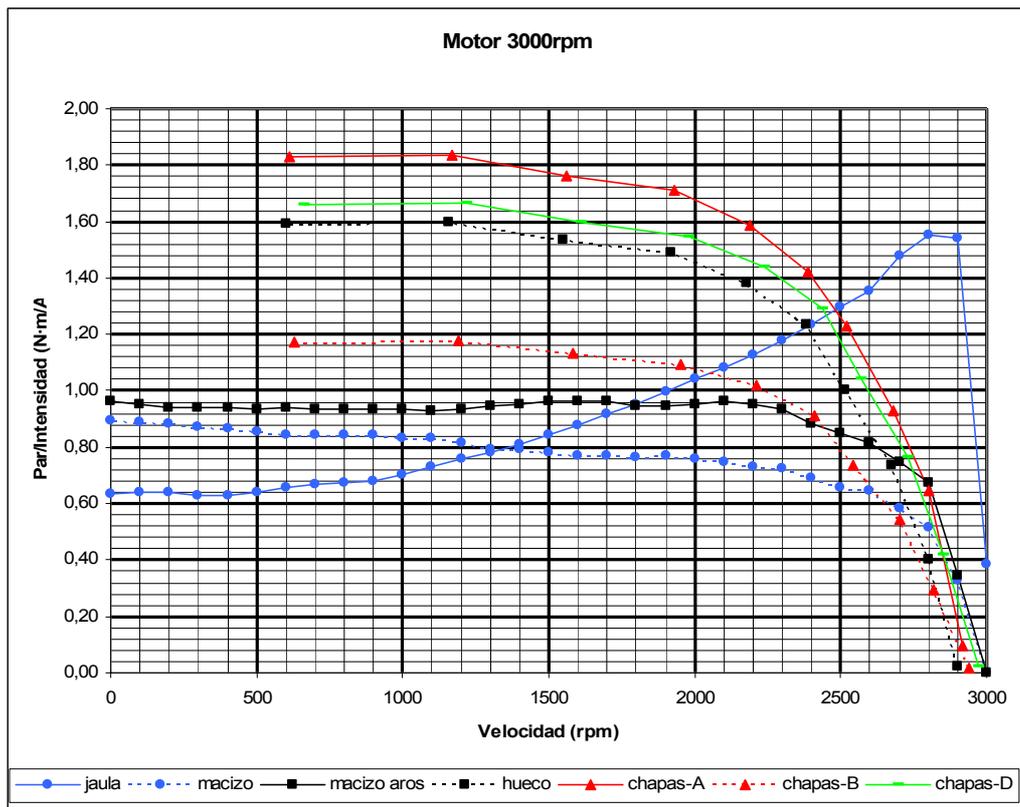


Figura 9.105. Variación del par/intensidad con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

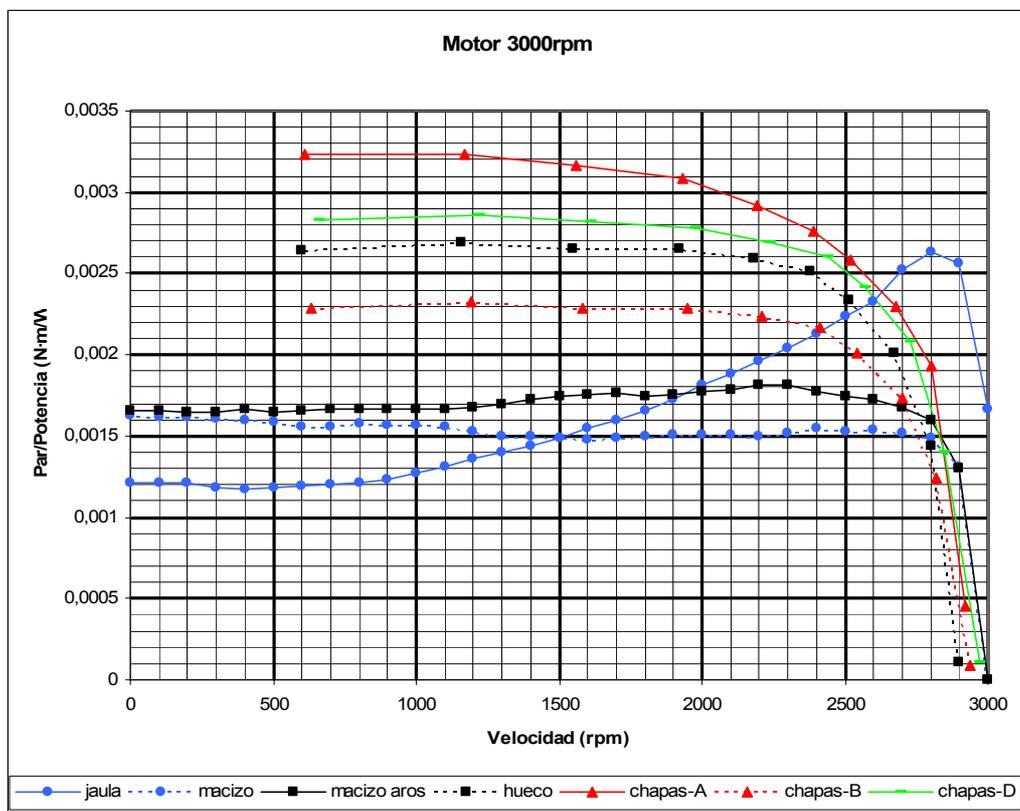


Figura 9.106. Variación del par/potencia con la velocidad en el motor a 3000 rpm con diversos rotores.

Aunque en estas gráficas aparecen diversos motores, nos centraremos en tres: jaula, macizo con aros y chapas tipo A. El motivo de comparar el motor con rotor macizo con aros (denominado motor de par) se basa en que este motor, de más fácil construcción, dispone de una característica de par en el arranque de buena calidad. Si con el motor equipado con rotor de chapas se obtuvieran resultados parecidos al de este motor con rotor macizo, sería absurdo proponer el motor de chapas dada su complicada fabricación. Por su parte, la comparación con el motor equipado con el rotor de jaula es obvia, ya que este es uno de los motores mayormente utilizados en la industria por sus buenos resultados y con el que intentamos pueda competir (al menos en algunos aspectos) el motor propuesto.

En las gráficas (figuras) precedentes se observa que el motor con rotor de chapas tipo A, desbancan en todas las magnitudes eléctricas al rotor macizo con aros, por lo que se ven cumplidos los objetivos. En su comparación con el rotor de jaula, destaca el motor de chapas por tener una relación par/intensidad y par/potencia muy favorable. El rendimiento del motor de chapas, aún dándose a un régimen menor de velocidad, no desentona del motor de jaula, y finalmente, donde el motor de jaula supera ampliamente al motor de chapas es en valor absoluto del par.

Pero veamos de forma resumida estos valores. Para ello se han confeccionado unas tablas y gráficas en las cuales se toman como valores de referencia para las diversas magnitudes eléctricas, las proporcionadas por el motor de jaula (100%), sirviendo de comparación al resto de motores.

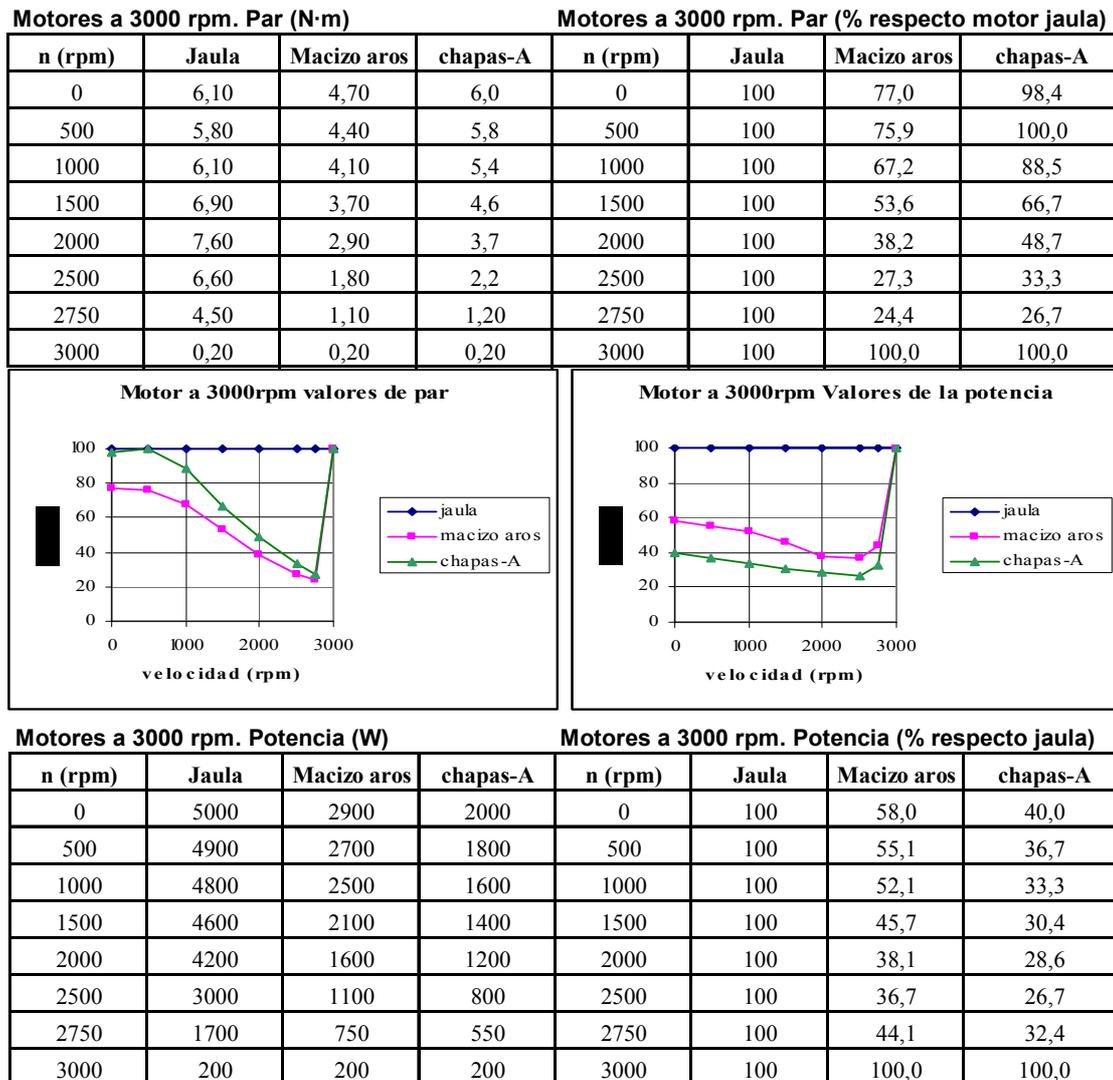
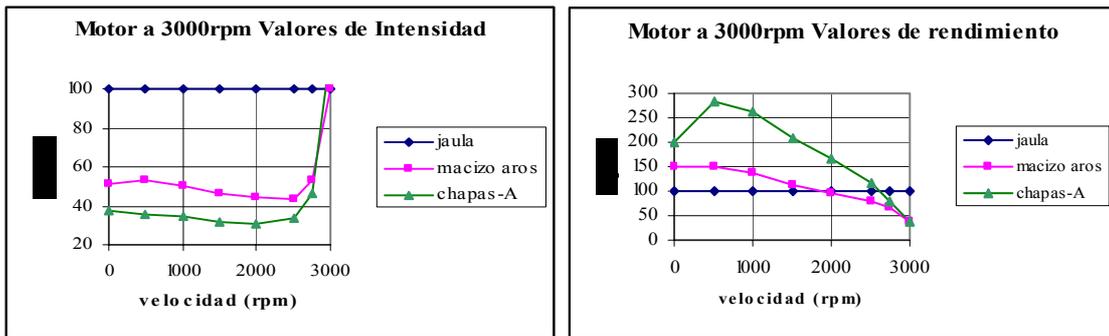


Figura 9.107. Comparativa motor jaula versus macizo con aros y chapas tipo A.

Motores a 3000 rpm. Intensidad (A)				Motores a 3000 rpm. Intensidad (% respecto jaula)			
n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A	n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A
0	9,60	4,90	3,6	0	100	51,0	37,5
500	9,00	4,80	3,2	500	100	53,3	35,6
1000	8,70	4,40	3,0	1000	100	50,6	34,5
1500	8,20	3,80	2,6	1500	100	46,3	31,7
2000	7,20	3,20	2,2	2000	100	44,4	30,6
2500	5,10	2,20	1,7	2500	100	43,1	33,3
2750	3,00	1,60	1,40	2750	100	53,3	46,7
3000	1,00	1,00	1,20	3000	100	100,0	120,0



Motores a 3000 rpm. Rendimientor (%)				Motores a 3000 rpm. Rendimiento (% resp. jaula)			
n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A	n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A
0	2	3	4	0	100	150,0	200,0
500	6	9	17	500	100	150,0	283,3
1000	13	18	34	1000	100	138,5	261,5
1500	24	27	50	1500	100	112,5	208,3
2000	38	37	63	2000	100	97,4	165,8
2500	59	46	68	2500	100	78,0	115,3
2750	74	48	60	2750	100	64,9	81,1
3000	52	20	20	3000	100	38,5	38,5

Figura 9.108. Comparativa motor jaula versus macizo con aros y chapas tipo A.

Motores a 3000 rpm. Par/Intensidad (N·m/A)				Motores a 3000 rpm. Par/Intensidad (% resp. jaula)			
n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A	n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A
0	0,64	0,96	1,82	0	100	150,0	284,4
500	0,64	0,94	1,81	500	100	146,9	282,8
1000	0,70	0,94	1,80	1000	100	134,3	257,1
1500	0,85	0,96	1,76	1500	100	112,9	207,1
2000	1,04	0,96	1,68	2000	100	92,3	161,5
2500	1,30	0,86	1,25	2500	100	66,2	96,2
2750	1,56	0,70	0,76	2750	100	44,9	48,7
3000	0,40	0,20	0,20	3000	100	50,0	50,0

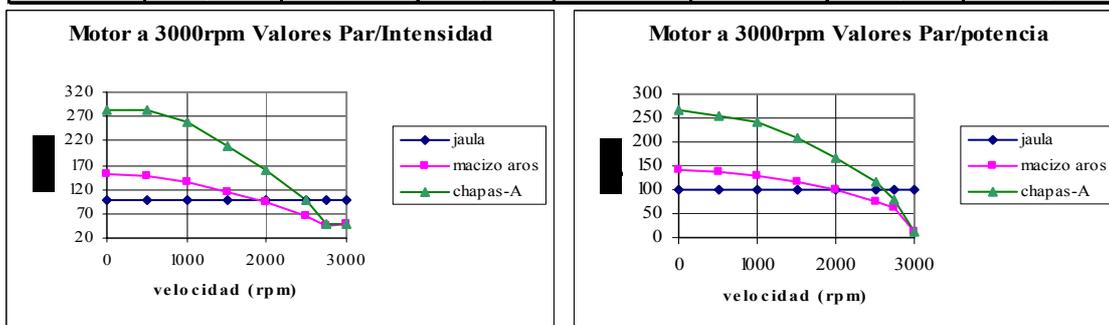


Figura 9.109. Comparativa motor jaula versus macizo con aros y chapas tipo A.

Motores a 3000 rpm. Par/potencia (N-m/W)				Motores a 3000 rpm. Par/potencia (% resp. jaula)			
n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A	n (rpm)	Jaula	Macizo aros	chapas-A
0	0,0012	0,0017	0,0032	0	100	141,7	266,7
500	0,0013	0,0017	0,0032	500	100	136,0	256,0
1000	0,0013	0,0017	0,0032	1000	100	130,8	242,3
1500	0,0015	0,0018	0,0031	1500	100	116,7	206,7
2000	0,0018	0,0018	0,0030	2000	100	100,0	166,7
2500	0,0023	0,0017	0,0026	2500	100	75,6	115,6
2750	0,0026	0,0017	0,0021	2750	100	63,5	80,8
3000	0,0017	0,0002	0,0002	3000	100	11,8	11,8

Tabla IX.XXXII. Comparativa motor jaula versus macizo con aros y chapas tipo A.

De las figuras anteriores (figuras 9.107-109) podemos apreciar que el par es siempre mayor en el motor de jaula que en los otros dos modelos (es una ventaja para el motor de jaula), pero cuando visualizamos potencia e intensidad, también el motor de jaula destaca respecto a los otros motores (es una desventaja para el motor de jaula), de forma que visualizando el rendimiento (dependiente de las dos magnitudes anteriores) se invierten los términos, siendo el motor de chapas el que pasa a ocupar un lugar privilegiado excepto en el último tramo de la gráfica. Las dos últimas gráficas (par/intensidad y par/potencia) confirman este hecho, destacando el motor de chapas muy por encima del resto de motores, especialmente el de jaula, excepto en el último tramo de funcionamiento.

Podría pensarse que estas ventajas alcanzadas por el motor de chapas no tienen razón de ser, ya que no se dan en el régimen nominal de funcionamiento (deslizamientos alrededor del 2-3%), pero como se comprobó en el análisis térmico, mecánico y magnético, y a diferencia del motor de jaula, el motor de chapas podrían funcionar de forma continuada en estos deslizamientos (incluso del 25%) sin problemas.

Finalmente, en el motor de chapas, el rendimiento es alto pero está desplazado hacia velocidades inferiores, mientras que en el motor macizo con aros el rendimiento se alcanza a más régimen de velocidad aunque su valor es menor. Finalmente, es el motor de jaula el que alcanza valores más elevados de rendimiento, pero también la velocidad de giro es la más elevada de los tres motores.

### 9.3.1.1 Características eléctricas a diversos regímenes de los motores en carga

Aunque ya sabemos que el régimen más adecuado para el funcionamiento de estos motores de chapas son las 3000 rpm, vamos a estudiar como se comportan los motores a diferentes velocidades. Concretamente en los cuatro regímenes que se han probado (1000, 1500-A, 1500 y 3000 rpm). No se muestran todas las gráficas ya que las mismas están expuestas en los anexos, sólo las más representativas en carga para cada motor y régimen.

La curva del par ya nos indica diferencias entre los modelos, así mientras en los motores de jaula y macizo el régimen donde se alcanza el par máximo para todos los modelos es con el motor de 1500 rpm, seguido respectivamente por los motores a 1000, 1500-A y 3000 rpm, en el motor de chapas se invierten estos regímenes correspondiendo esta secuencia a 1500, 1500-A, 1000 y 3000 rpm. Otra diferencia notable es que en los motores macizo y chapas el par aumenta de forma progresiva a medida que disminuye la velocidad, en cambio en el motor de jaula la curva sigue la forma conocida y característica.

En las gráficas de intensidades también se aprecian diferencias. Así el motor de jaula muestra un incremento notable de la intensidad hasta un 50% de su velocidad, en todos los regímenes de funcionamiento, para a partir de este momento elevarse de forma tenue. La intensidad del motor de jaula decrece desde 1500, a 3000, a 1500-A y 1000 rpm. Los motores macizo y chapas son parecidos en cuanto a intensidad de carga, así el incremento de intensidad es constante a lo largo de todo el régimen pero con una pendiente mucho menor que en el modelo de jaula.

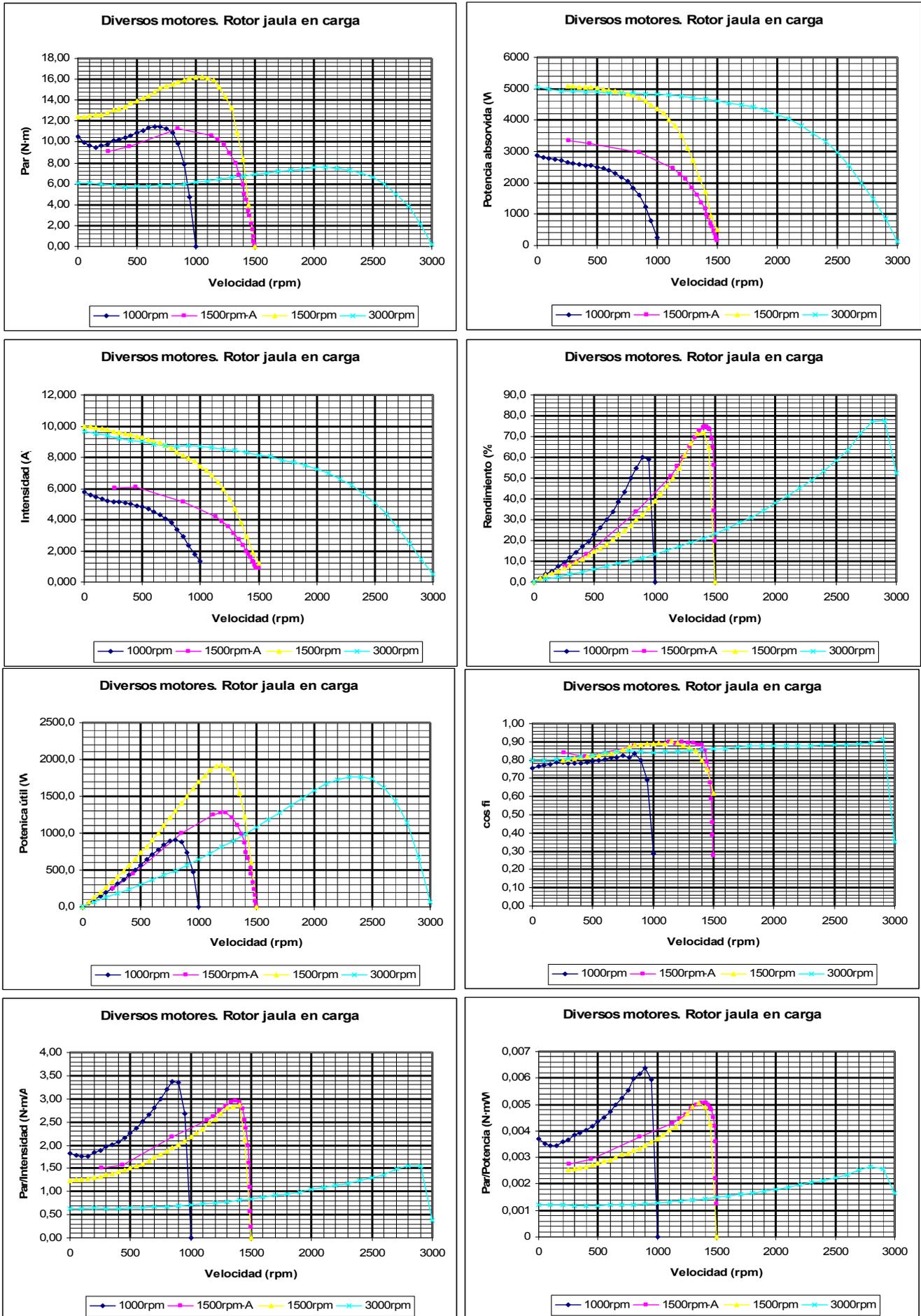


Figura 9.110. Características eléctricas del motor de jaula, para diversas velocidades.

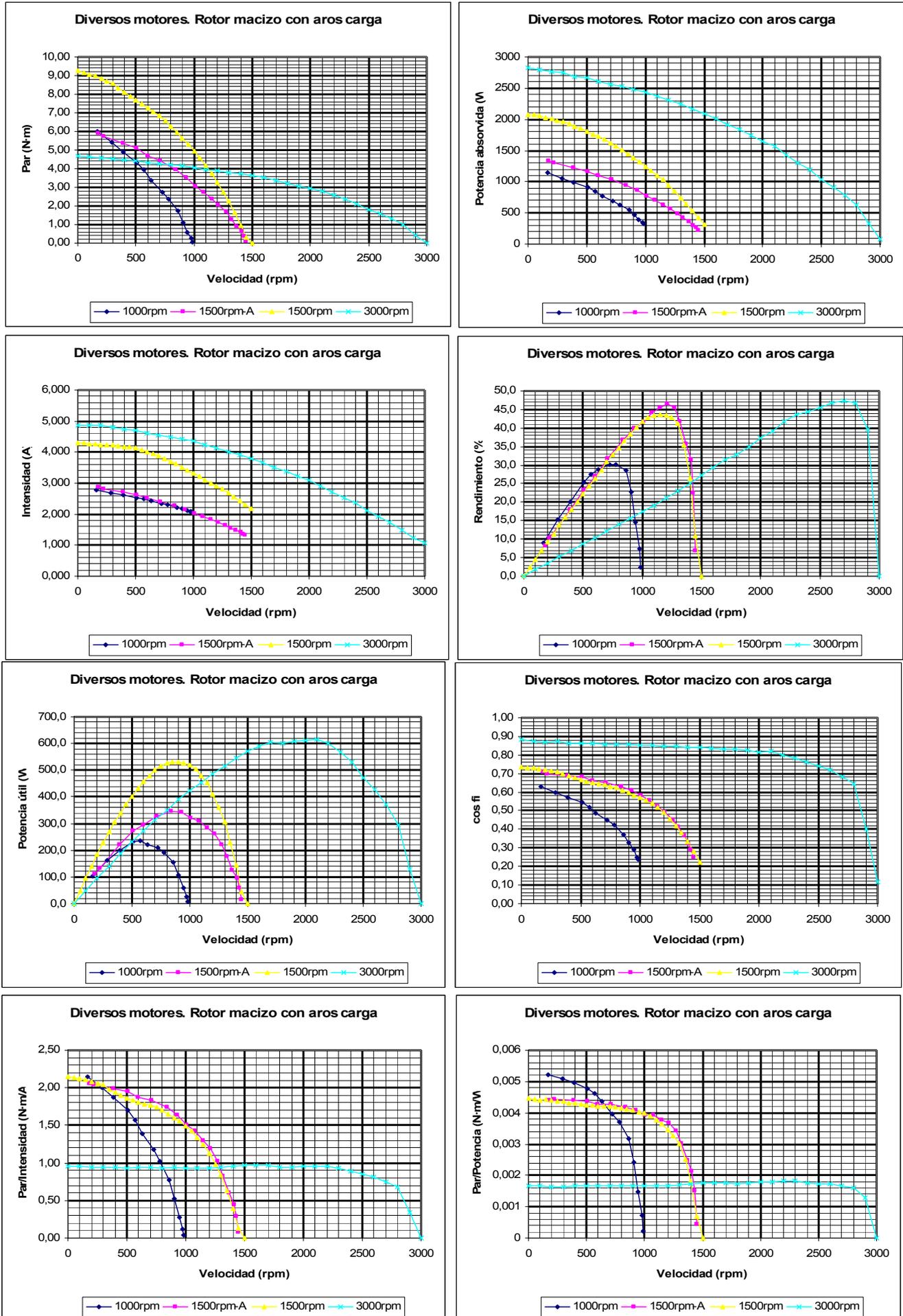


Figura 9.111. Características eléctricas del motor macizo con aros para diversas velocidades.

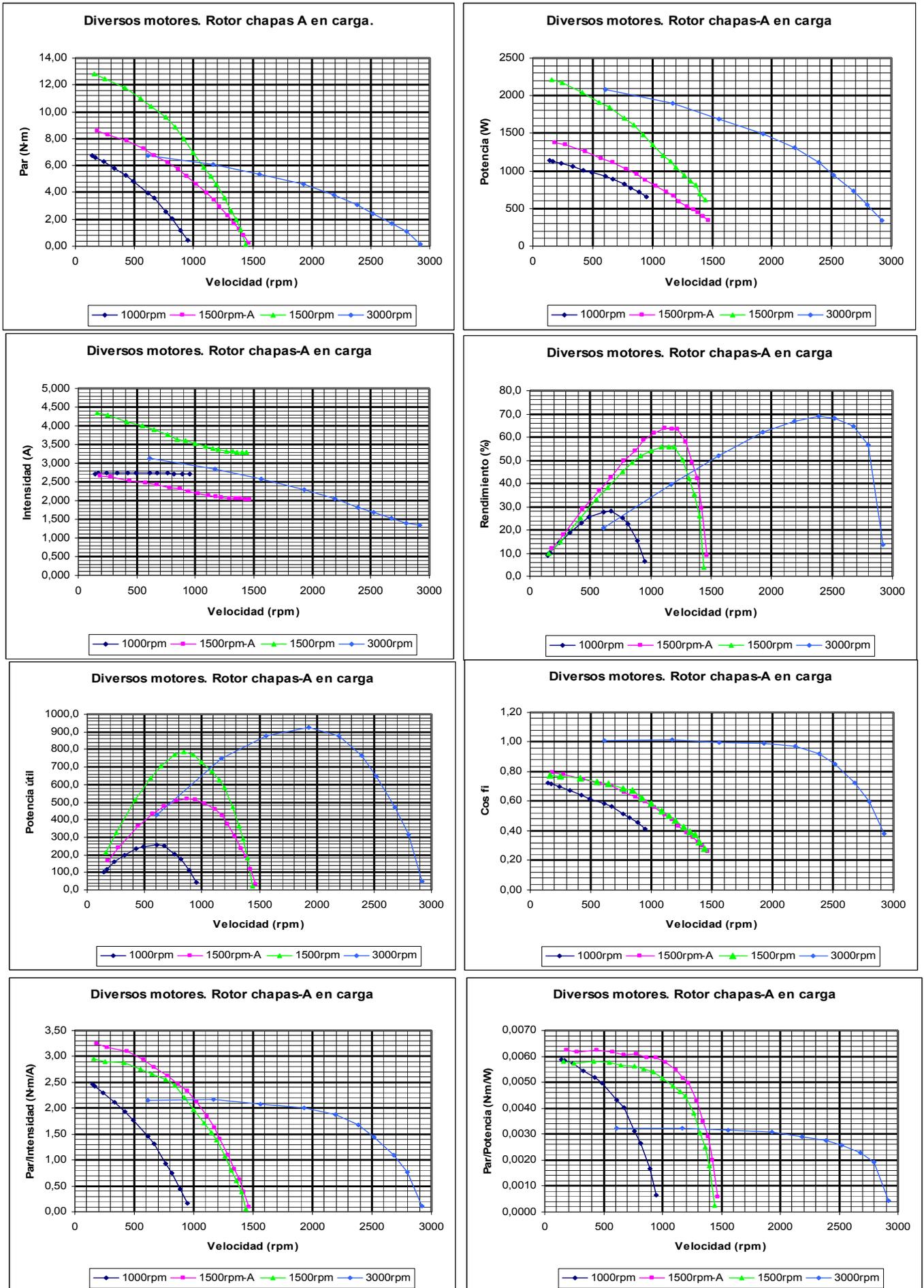


Figura 9.112. Características eléctricas del motor de chapas A, para diversas velocidades.

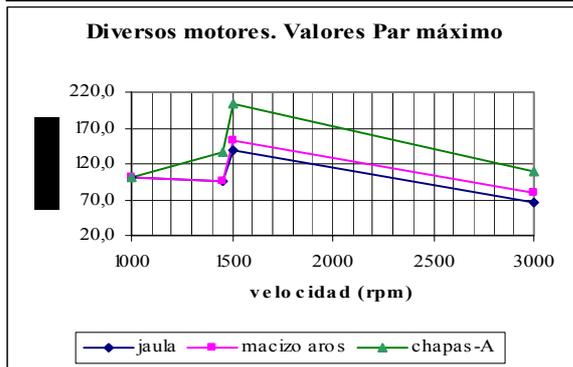
En las gráficas de la potencia consumida ocurre algo parecido. En el motor de jaula la potencia crece cuando disminuimos la velocidad, siendo este aumento mucho mayor desde pleno régimen hasta un 50% de la velocidad que en el intervalo del 50% al 0% de la velocidad, donde prácticamente se estabiliza. En los motores macizo y macizo con aros el incremento de la potencia en función de la disminución de la velocidad se mantiene constante. En todos los motores es en los regímenes de 3000 y 1000 rpm cuando consumen más y menos potencia respectivamente.

Finalmente, las gráficas de rendimiento muestran un aumento del mismo a medida que aumentamos la velocidad. En este caso son mínimas las diferencias entre los motores a 1500-A y 1500 rpm. Los valores máximos de rendimiento en cada régimen, los consigue el motor de chapas a velocidades más bajas, mientras que es el motor de jaula el que alcanza estos valores con velocidades más elevadas.

Si tomamos como base de referencia (100%) para cada régimen al valor alcanzado a 1000 rpm, es posible apreciar en valores relativos la evolución que sufren las cuatro magnitudes eléctricas (par, potencia, intensidad y rendimiento) cuando variamos la velocidad.

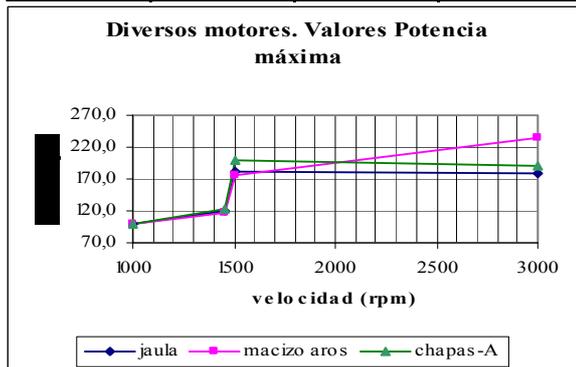
**Motores diversos. Valores de par máximo**

motor	jaula	macizo aros	chapas A
n (rpm)	par (N·m)	par (N·m)	par (N·m)
1000	100,0	100,0	100,0
1450	96,6	96,7	137,5
1500	138,8	153,3	203,1
3000	65,5	78,3	109,4



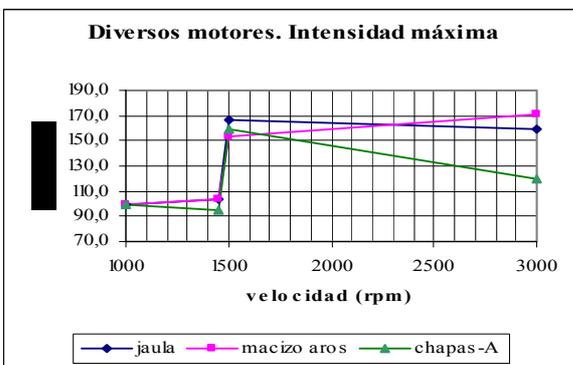
**Motores diversos. Valores de potencia máxima**

motor	jaula	macizo aros	chapas A
n (rpm)	par (N·m)	par (N·m)	par (N·m)
1000	100,0	100,0	100,0
1450	121,4	116,7	121,7
1500	182,1	175,0	200,0
3000	178,6	233,3	191,3



**Motores diversos. Valores de intensidad máxi**

motor	jaula	macizo aros	chapas A
n (rpm)	par (N·m)	par (N·m)	par (N·m)
1000	100,0	100,0	100,0
1450	103,3	103,6	94,5
1500	166,7	153,6	160,0
3000	160,0	171,4	120,0



**Motores diversos. Valores de rendimi. máxi**

motor	jaula	macizo aros	chapas A
n (rpm)	par (N·m)	par (N·m)	par (N·m)
1000	100,0	100,0	100,0
1450	125,0	156,7	232,1
1500	120,0	143,3	200,0
3000	130,0	160,0	250,0

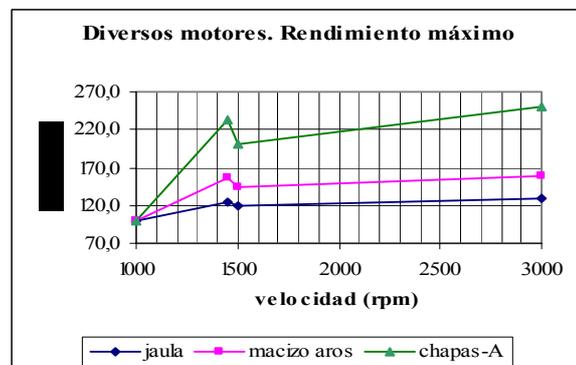


Figura 9.113. Par, potencia, intensidad y rendimiento con respecto al valor alcanzado a 1000 rpm.

Estas últimas gráficas (figura 9.113) representadas en valores relativos, muestran que el motor de chapas al aumentar la velocidad (cambio de motor), aumenta de forma notoria sus valores de par, en cambio con la intensidad, este aumento es más contenido, lo que permite que en la gráfica del rendimiento, sea este motor el que presenta un aumento relativo mayor al cambiar su régimen. El motor que sufre menos cambios al variar su régimen es el motor con rotor de jaula, aumentando su rendimiento en un 30% como máximo.

### 9.3.1.2 Características eléctricas con convertidor de frecuencia de los diversos motores

Como complemento a las gráficas eléctricas en carga y frecuencia nominal se muestran en las siguientes figuras 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, pero en los otros regímenes inferiores se han alcanzado los 70 Hz. Añadir, que como en apartados anteriores se exponen brevemente sólo una parte de las gráficas hallándose el resto, junto con las tablas, en los anexos.

En todos los motores se observa un incremento de las magnitudes eléctricas principales (par, potencia, intensidad y rendimiento) a medida que aumentamos la frecuencia, pero con una diferencia, la pendiente de cualquiera de estas magnitudes y para cada régimen, es más pronunciada en el motor de jaula que en el motor de chapas, siendo el motor macizo con aros el que dispone de una menor pendiente, aunque muy parecida a la del motor de chapas.

Vamos a centrarnos en algunos de los parámetros representados: el rendimiento, la potencia útil, el cociente par/intensidad y el cociente par/potencia. Si representamos para cada uno de los motores los valores máximos de estas magnitudes, así como a las velocidades en las que se produce, para las frecuencias aplicadas (20, 30, 40 y 50 Hz), obtendremos las siguientes tablas.

**Motores diversos. Valores de rendimiento**

motor	jaula	jaula	macizo aros	macizo aros	chapas A	chapas A
f (Hz)	rend (%)	n (rpm)	rend (%)	n (rpm)	rend (%)	n (rpm)
20	60	1100	30	800	42	700
30	68	1700	37	1400	56	1300
40	70	2200	45	2000	66	1800
50	75	2800	48	2400	72	2300

**Motores diversos. Valores potencia útil**

motor	jaula	jaula	macizo aros	macizo aros	chapas A	chapas A
f (Hz)	P. útil (W)	n (rpm)	P. útil (W)	n (rpm)	P. útil (W)	n (rpm)
20	300	950	80	800	140	700
30	650	1400	170	1100	300	1000
40	1200	1750	330	1600	550	1500
50	1700	2250	500	1900	760	1800

**Motores diversos. Valores de par/intensidad**

motor	jaula	jaula	macizo aros	macizo aros	chapas A	chapas A
f (Hz)	T/I (N·m/A)	n (rpm)	T/I (N·m/A)	n (rpm)	T/I (N·m/A)	n (rpm)
20	1,30	900	1,10	100	1,70	100
30	1,44	1600	1,20	100	1,80	100
40	1,56	2200	1,24	100	2,10	100
50	1,60	2800	1,20	100	2,20	100

**Motores diversos. Valores de par/potencia**

motor	jaula	jaula	macizo aros	macizo aros	chapas A	chapas A
f (Hz)	T/P (N·m/W)	n (rpm)	T/P (N·m/W)	n (rpm)	T/P (N·m/W)	n (rpm)
20	0,0052	1100	0,0045	100	0,0063	100
30	0,0040	1700	0,0034	100	0,0046	100
40	0,0030	2200	0,0026	100	0,0038	100
50	0,0028	2800	0,0022	100	0,0030	100

Tabla IX.XXXIII. Valores máximos con sus respectivas velocidades de algunas magnitudes.

Si representamos gráficamente estos valores, podemos apreciar con más comodidad la evolución de estas magnitudes. En las siguientes gráficas, cada punto se refiere a una de las frecuencias analizadas (20, 30, 40 y 50 Hz).

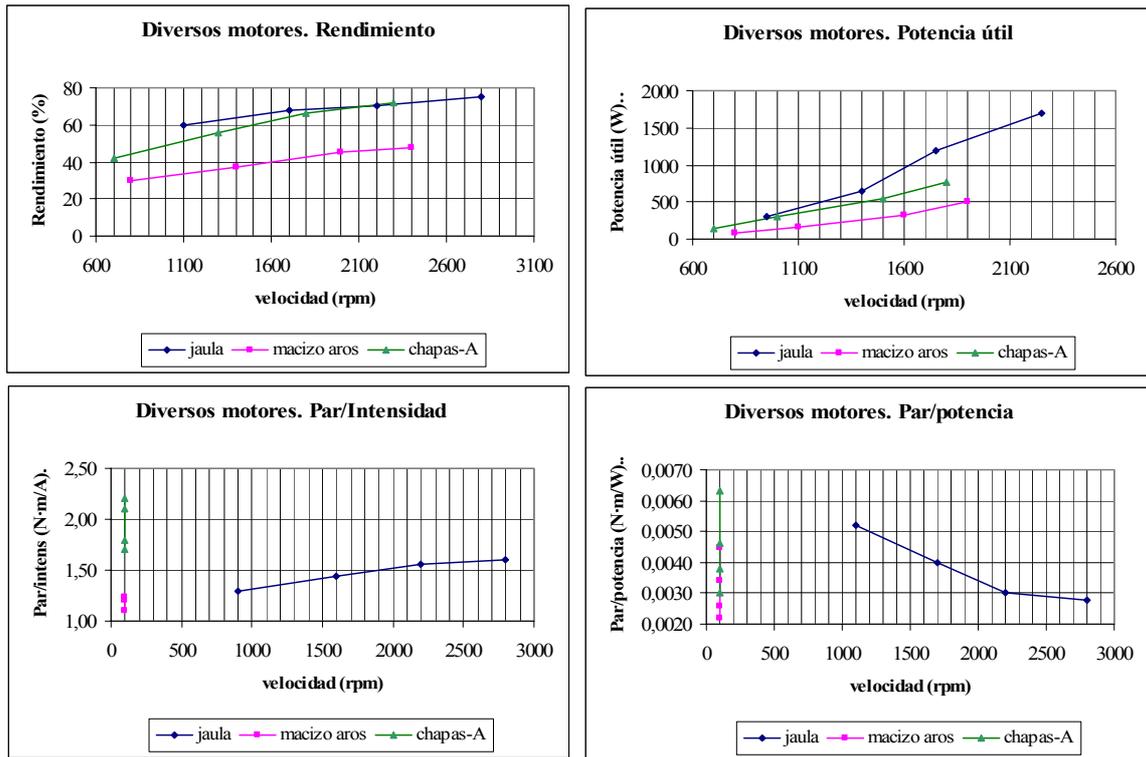


Figura 9.114. Diversas magnitudes eléctricas con inversor de frecuencia para los motores analizados.

De estas gráficas es posible extraer algunas conclusiones. De la curva del rendimiento se aprecia que el motor con rotor macizo dispone del valor más bajo, aparte su evolución es prácticamente lineal al variar la frecuencia. El motor de chapas también se comporta de forma lineal pero con una estabilización a altas frecuencias. Finalmente el motor que presenta valores más elevados de par y su evolución es más inestable es el motor de jaula. También es importante observar que los valores máximos se obtienen con velocidades crecientes desde el motor de chapas al motor de jaula.

Con la gráfica de la potencia útil pasa algo parecido. Los valores máximos se obtienen con el motor de jaula y los valores mínimos con el motor macizo con aros. Asimismo, excepto el motor de jaula, los otros motores siguen una evolución prácticamente lineal en función de la frecuencia. Finalmente, los valores máximos se obtienen a velocidades bajas en el motor de chapas, incrementándose (ver puntos marcados en las gráficas) en los motores macizo y jaula respectivamente.

Las últimas dos gráficas, indican que los motores de par (macizo con aros y chapas), obtienen los valores máximos de las relaciones (Par/intensidad y Par/potencia) prácticamente con velocidades nulas, mientras que en el motor de jaula estos valores se obtienen a lo largo de toda la gama de rpm.

▪ **Motor de jaula** (fórmulas empíricas para motores en carga e inversor).

Rendimiento:  $\eta(\%) = -2 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0.0173 \cdot n + 44.04$  (n en rpm) [9.96]

Potencia útil:  $P_{\text{útil}}(W) = 0.0001 \cdot n^2 \cdot 0.7544 \cdot n - 541$  (n en rpm) [9.97]

▪ **Motor macizo con aros.**

Rendimiento:  $\eta(\%) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0.0347 \cdot n + 20.2$  (n en rpm) [9.98]

Potencia útil:  $P_{\text{útil}}(W) = 0.0001 \cdot n^2 \cdot 0.2923 \cdot n - 109.6$  (n en rpm) [9.99]

▪ **Motor de chapas.**

Rendimiento:  $\eta(\%) = -1 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0.0157 \cdot n + 18.07$  (n en rpm) [9.100]

Potencia útil:  $P_{\text{útil}}(W) = 0.0002 \cdot n^2 \cdot 0.0788 \cdot n - 42.169$  (n en rpm) [9.101]

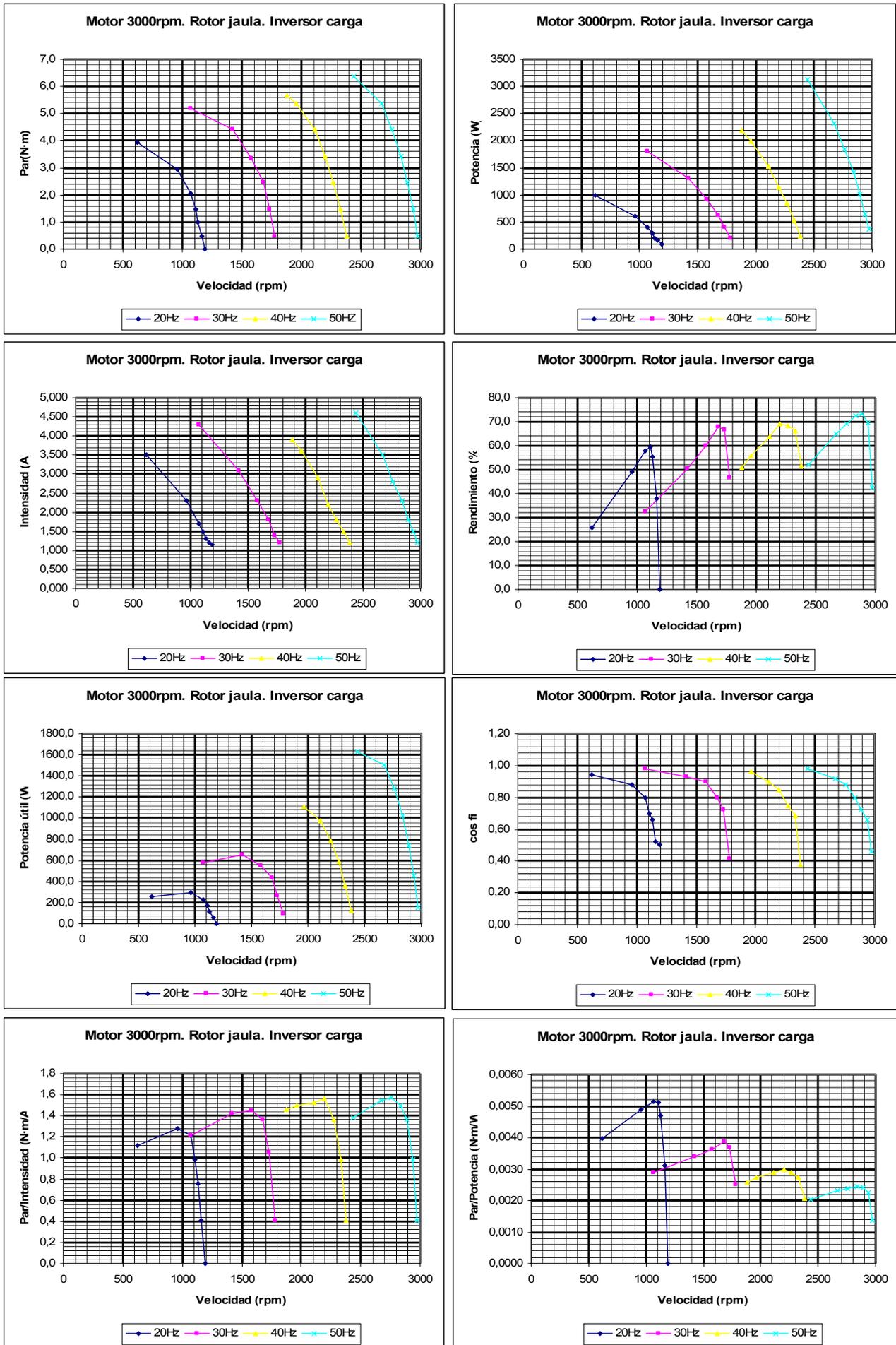


Figura 9.115. Motor jaula. Evolución de algunas magnitudes eléctricas en carga con la frecuencia.

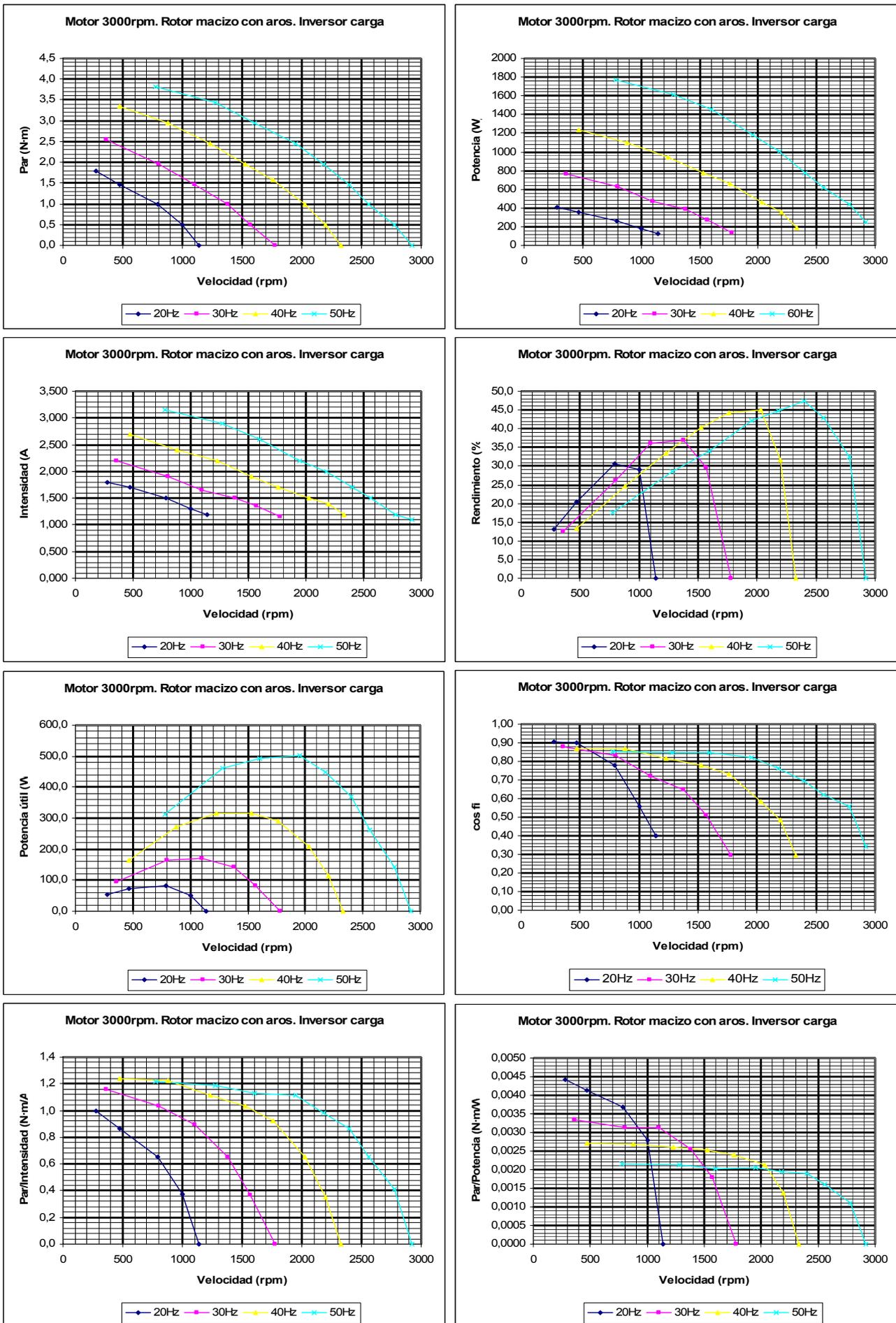


Figura 9.116. Motor macizo con aros. Evolución magnitudes eléctricas en carga con la frecuencia.

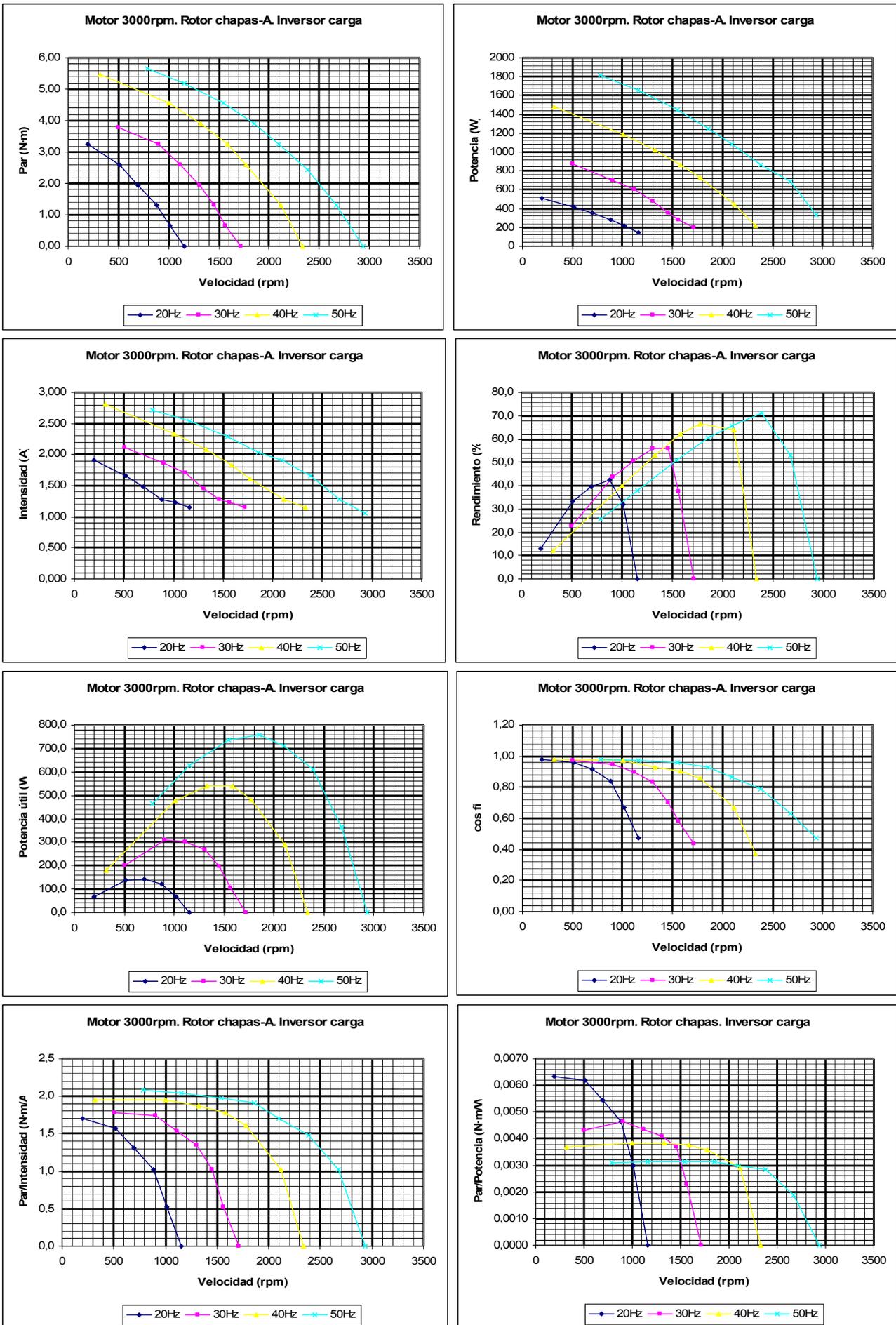


Figura 9.117. Motor chapas-A. Evolución de algunas magnitudes eléctricas en carga con la frecuencia.

### 9.3.2 ANÁLISIS MAGNÉTICO DE LOS MOTORES DE JAULA, MACIZO CON AROS Y CHAPAS TIPO A

Para completar el análisis eléctrico comparativo entre estos tres motores a 3000 rpm, realizaremos unas simulaciones mediante el programa FEMM, para comparar algunos de los efectos magnéticos que se producen al cambiar materiales constructivos, entrehierros, chapas, etc.

Un estudio magnético completo ha sido realizado en el análisis de los motores de chapas, por lo que en este apartado se estudiarán las particularidades más importantes que permiten comparar estos tres motores, pero no se entrará con la profundidad o extensión realizada entre los motores de chapas.

#### 9.3.2.1 Efecto de la variación del espesor del entrehierro

El primer efecto estudiado para un régimen concreto de funcionamiento, es la variación del espesor del entrehierro. El régimen escogido se corresponde con un deslizamiento estándar del 3.33% a 3000 rpm, cuantificándose el efecto mediante la utilización del programa FEMM.

En la siguiente tabla, 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).

Motor a 3000rpm con diversos rotores.  $s=3,33\text{Hz}$

p=4000H	rotor	jaula	rotor	macizo aros	rotor	chapas A
c=3Ms/m	T	Bmax	T	Bmax	T	Bmax
% entrehier.	(N·m)	(T)	(N·m)	(T)	(N·m)	(T)
1000	1,75	0,25	0,03	0,11	0,03	0,13
666	2,45	0,28	0,06	0,15	0,04	0,14
333	3,16	0,42	0,19	0,30	0,19	0,27
200	3,42	0,54	0,38	0,43	0,39	0,45
143	3,50	0,63	0,57	0,57	0,60	0,61
111	3,53	0,72	0,75	0,70	0,79	0,73
100	3,54	0,78	0,83	0,73	0,89	0,79
83	3,54	0,90	0,98	0,80	1,06	0,88
71	3,54	1,02	1,12	0,87	1,22	0,98
62	3,53	1,08	1,24	0,93	1,36	1,05
55	3,53	1,14	1,35	1,00	1,49	1,11
50	3,52	1,20	1,44	1,10	1,61	1,18

Tabla IX.XXXIV. Variación del par e inducción máxima en el entrehierro en función de su espesor.

Se aprecia en la tabla anterior que los valores del par para un entrehierro nominal (100%) coinciden razonablemente con los valores experimentales hallados para este deslizamiento y motor ( $s=3.3\%$  y 3000 rpm). siendo respectivamente de 3.92, 0.93 y 0.96 N·m para los motores de jaula, macizo y chapas. Con estas pequeñas diferencias puede considerarse válidos los valores que graficamos:

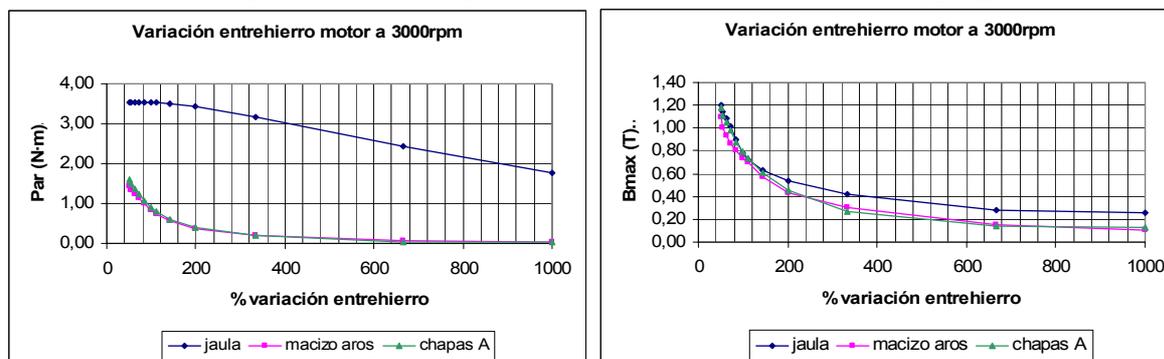


Figura 9.118. Evolución del par y de la inducción máxima en el entrehierro en función de su espesor.

De la gráfica anterior se deduce que a estos regímenes (2800 rpm) el par que entrega el motor de jaula esta muy por encima de los otros dos modelos. Pero lo realmente interesante es la evolución que ofrece el par en cada uno de los motores.

Así mientras que el motor de jaula a partir del entrehierro estándar (100%) y a medida que disminuimos este entrehierro hasta la mitad, el par prácticamente no aumenta, sino que se mantiene constante, en el motor macizo con aros y chapas tipo *A*, sucede prácticamente lo contrario. A partir del entrehierro nominal y a medida que se disminuye éste, el par aumenta de forma potencial.

Así para los tres motores podemos apuntar unas ecuaciones empíricas, válidas sólo para este régimen, de la evolución del par con la variación del entrehierro, las cuales difieren según los modelos.

- Motor de jaula.  $T = 2 \cdot 10^{-9} \cdot c^3 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot e_e^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot e_e + 3.5541 \text{ (N}\cdot\text{m)}$  [9.102]
- Motor macizo con aros.  $T = 275.84 \cdot e_e^{-1.2847} \text{ (N}\cdot\text{m)}$  [9.103]
- Motor de chapas tipo *A*.  $T = 424.83 \cdot e_e^{-1.3653} \text{ (N}\cdot\text{m)}$  [9.104]

Donde  $e_e$ , es el espesor en % del entrehierro. Igualmente para las inducciones máximas en el entrehierro, que en esta ocasión se comportan de forma parecida para los tres motores, tendremos una evolución de tipo potencial, la cual puede representarse mediante las siguientes ecuaciones empíricas.

- Motor de jaula.  $B_{\text{máx-entrehierro}} = 9.687 \cdot e_e^{-0.539} \text{ (T)}$  [9.105]
- Motor macizo con aros.  $B_{\text{máx-entrehierro}} = 23.82 \cdot e_e^{-0.77} \text{ (T)}$  [9.106]
- Motor de chapas tipo *A*.  $B_{\text{máx-entrehierro}} = 29.367 \cdot e_e^{-0.80} \text{ (T)}$  [9.107]

Así pues, la variación del espesor del entrehierro ofrece efectos muy distintos si el motor es de tipo jaula o bien si es macizo o de chapas. 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.

Si cuantificamos esta distorsión del campo magnético total en función del espesor del entrehierro para unas cuantas simulaciones obtendremos la siguiente tabla y gráfica (se toma como distorsión 0° de referencia al valor de 1000% del entrehierro).

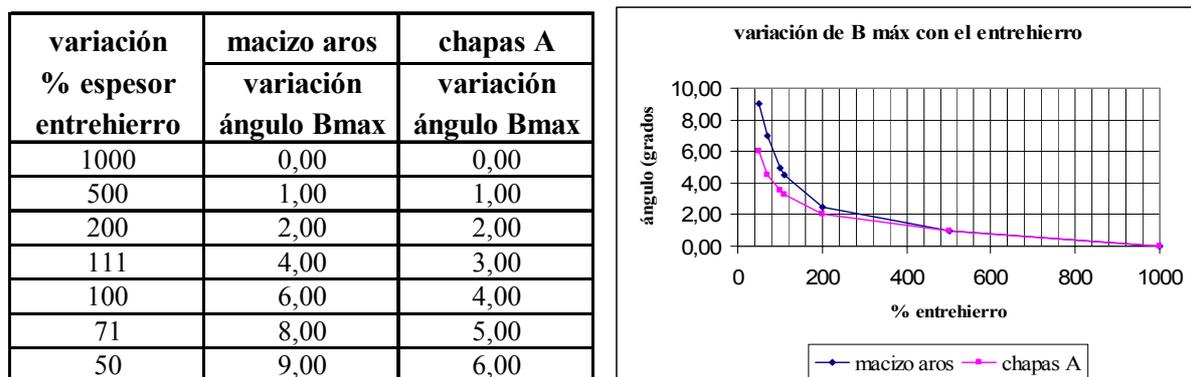


Figura 9.119. Tabla y gráfica con la variación del campo magnético total en función del entrehierro.

La variación es más notoria en el motor macizo que en el motor de chapas. Alcanzándose los 9° de distorsión frente a los 6° del motor de chapas. Esta variación puede cuantificarse con las ecuaciones:

- Motor macizo con aros:  $\text{variación ángulo} = -2.836 \cdot \ln(e_e) + 18.727 \text{ grados}$  [9.108]
- Motor de chapas tipo *A*:  $\text{variación ángulo} = -1.8422 \cdot \ln(e_e) + 13.343 \text{ grados}$  [9.109]

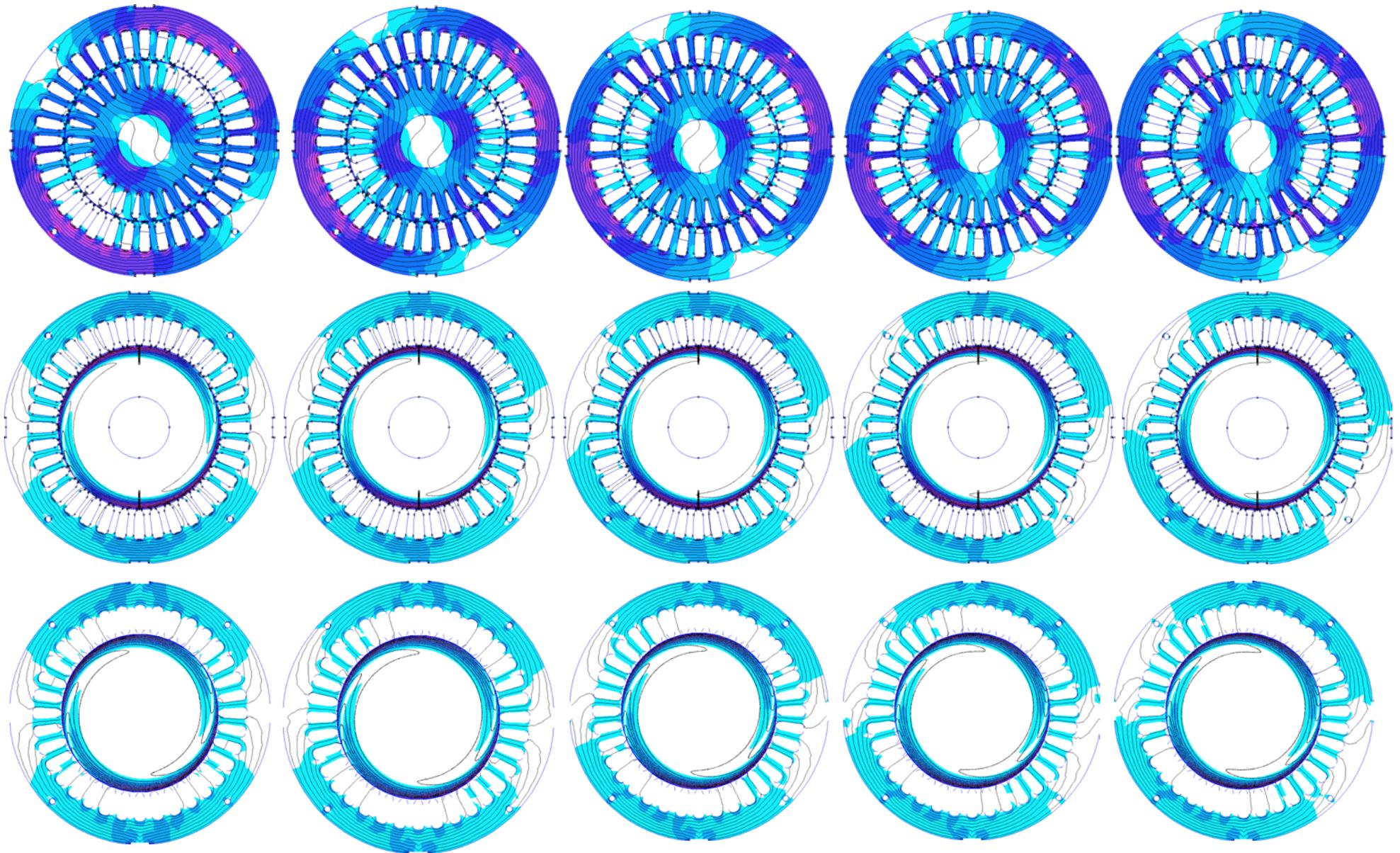


Figura 9.120. Campo magnético a 3000 rpm con rotor de jaula, macizo aros y chapas-A. De izquierda a derecha  $c=1000\%$ ,  $c=200\%$ ,  $c=111\%$ ,  $c=71\%$  y  $c=50\%$ .

### 9.3.2.2 Efecto de los anillos en los rotores analizados

Simular con el programa FEMM un rotor con anillos no es posible. Aunque si se disponen de las intensidades reales obtenidas de forma experimental, y se considera el incremento proporcional que representan los anillos sobre el par, puede llegarse a una distribución y valor de las restantes magnitudes electromagnéticas bastante aproximada, pero para obtener datos fiables sería necesario disponer de un programa de cálculo de elementos finitos en 3D, del cual carece la sección departamental de Terrassa.

Nos tenemos pues que basar únicamente en los resultados experimentales y remitir al lector 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, los cuales pueden aplicarse con suficiente aproximación a los rotores macizos con aros. En el rotor de jaula los anillos son imprescindibles para cerrar las corrientes que circulan por las barras de la jaula y por tanto no tendría sentido un rotor sin los mismos. Este breve estudio estará pues centrado en los rotores que pueden funcionar con o sin anillos, es decir, el rotor macizo con aros y el rotor de chapas, aparte de considerar sólo sus valores experimentales. También se desvincula de esta sección la incorporación de anillos centrales, la cual fue analizada en la comparación que se realizó entre el rotor de chapas tipo *F* (con anillos laterales y uno central), y el rotor de chapas tipo *A* (con anillos laterales).

Motor asíncrono trifásico con rotor de chapas tipo A. 3000 rpm con y sin anillos													
régimen utilización		motor rotor macizo sin anillos				motor con rotor macizo con anillos				variación en % magnitudes			
f Hz	n rpm	T N·m	Tfem N·m	I A	P W	T N·m	Tfem N·m	I A	P W	Ta-Tsa %	Ia-Isa %	Pa-Psa %	
1	2940	0,10	0,09	1,120	250	0,10	0,11	1,250	275	5,0	10,4	9,1	
3,33	2800	0,83	0,75	1,283	420	0,94	1,01	1,408	480	11,7	8,9	12,5	
8,33	2500	2,15	1,94	1,562	700	2,58	2,30	1,700	820	16,7	8,1	14,6	
13,33	2200	3,00	2,70	1,850	950	3,60	3,20	2,044	1100	16,7	9,5	13,6	
16,66	2000	3,52	3,17	2,020	1075	4,20	3,70	2,210	1230	16,2	8,6	12,6	
25	1500	4,32	3,89	2,358	1285	5,10	4,50	2,620	1470	15,3	10,0	12,6	
30	1200	4,58	4,18	2,590	1400	5,40	4,90	2,852	1612	15,2	9,2	13,2	
33,33	1000	4,75	4,35	2,700	1460	5,60	5,07	2,950	1680	15,2	8,5	13,1	
41,66	500	5,08	4,68	2,880	1600	5,90	5,25	3,180	1810	13,9	9,4	11,6	
46,66	200	5,12	4,61	3,000	1635	5,92	5,20	3,300	1870	13,5	9,1	12,6	

Tabla IX.XXXV. Resultados experimentales y teóricos obtenidos para el motor de chapas-A

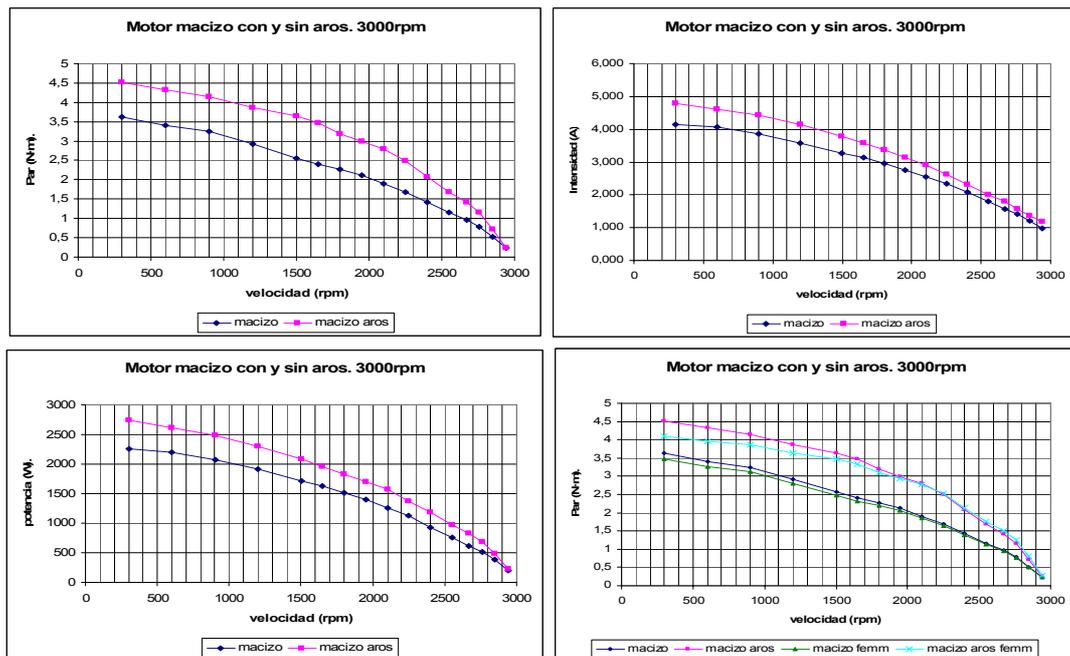


Figura 9.121. Evolución del par experimental y teórico para el motor de chapas tipo-A.

La incorporación de los anillos laterales en el motor de chapas tipo A, 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. Para la intensidad el incremento es del 9%, y para la potencia absorbida del 13%, aunque son variables a lo largo de una prueba de carga (cabe recordar que sin anillos no se logró hacer funcionar correctamente al motor ya que las chapas a partir de un cierto voltaje rozaban la superficie del estator). Las tablas y gráficas que se presentan muestran los resultados experimentales obtenidos.

Para el rotor macizo con o sin aros, se disponen de varias series de datos experimentales, los cuales nos permiten con suficiente aproximación conocer la influencia que representan estos anillos. De forma que si comparamos en primer lugar los resultados experimentales obtenidos para algunos deslizamientos tendremos la siguiente tabla y gráfica.

Motor asíncrono trifásico con rotor macizo a 3000 rpm con y sin anillos												
régimen utilización		motor rotor macizo sin anillos				motor con rotor macizo con anillos				variación en % magnitudes		
f Hz	n rpm	T N·m	Tfem N·m	I A	P W	T N·m	Tfem N·m	I A	P W	Ta-Tsa %	Ia-Isa %	Pa-Psa %
1	2940	0,23	0,23	0,990	200	0,25	0,285	1,180	230	8,0	16,1	13,0
2,5	2850	0,52	0,52	1,200	380	0,72	0,799	1,360	490	27,8	11,8	22,4
4	2760	0,78	0,77	1,410	520	1,15	1,256	1,580	680	32,2	10,8	23,5
5,5	2670	0,97	0,96	1,580	620	1,41	1,506	1,800	825	31,2	12,2	24,8
7,5	2550	1,15	1,13	1,800	750	1,68	1,749	2,000	975	31,5	10,0	23,1
10	2400	1,43	1,40	2,075	924	2,08	2,124	2,320	1180	31,3	10,6	21,7
12,5	2250	1,69	1,65	2,350	1125	2,50	2,513	2,620	1370	32,4	10,3	17,9
15	2100	1,90	1,85	2,539	1264	2,80	2,766	2,913	1568	32,1	12,9	19,4
17,5	1950	2,12	2,06	2,750	1400	2,99	2,930	3,150	1700	29,1	12,7	17,6
20	1800	2,27	2,20	2,961	1514	3,19	3,094	3,366	1833	28,9	12,0	17,4
22,5	1650	2,40	2,32	3,140	1625	3,48	3,341	3,580	1960	31,0	12,3	17,1
25	1500	2,56	2,47	3,275	1715	3,64	3,466	3,780	2090	29,8	13,4	17,9
30	1200	2,92	2,81	3,590	1917	3,87	3,634	4,139	2307	24,5	13,3	16,9
35	900	3,25	3,12	3,856	2069	4,15	3,854	4,430	2489	21,7	13,0	16,9
40	600	3,41	3,26	4,056	2197	4,33	3,958	4,608	2609	21,2	12,0	15,8
45	300	3,63	3,47	4,142	2258	4,52	4,091	4,800	2747	19,6	13,7	17,8

Tabla IX.XXXVI. Resultados experimentales y teóricos para el motor macizo con y sin aros.

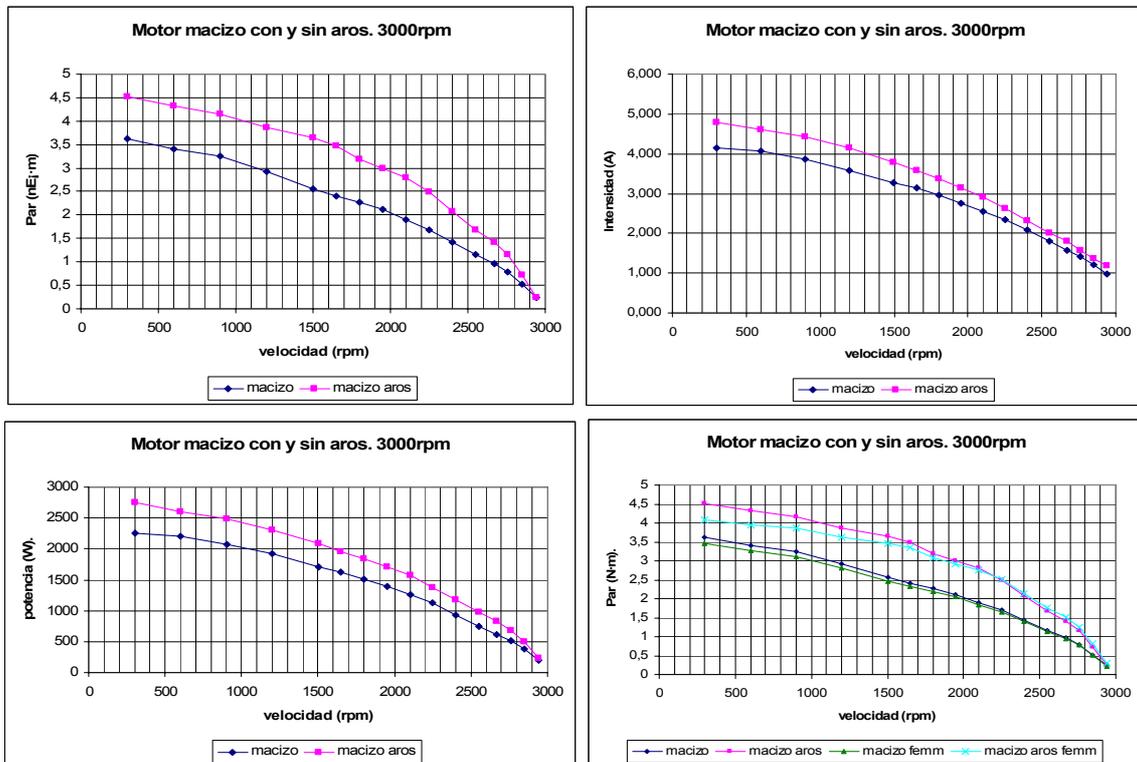


Figura 9.122. Evolución del par experimental y teórico para el motor con rotor macizo con y sin aros.

La incorporación de los anillos laterales en el motor macizo, representa un incremento medio del par del 20%, de la intensidad del 13% y de la potencia absorbida del 18%. Aunque debe recordarse que estos valores varían con la velocidad a lo largo de una prueba de carga como queda de manifiesto en las siguientes gráficas dadas tanto para el motor macizo como para el motor de chapas tipo *A*.

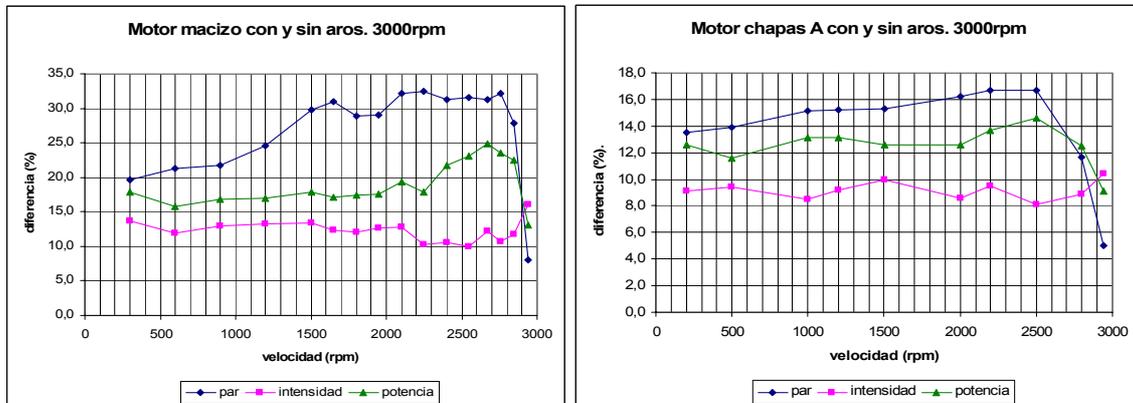


Figura 9.123. Relación porcentual entre el par, la intensidad y la potencia absorbida para los motores macizos y de chapas-*A*, con y sin anillos laterales del rotor.

Como conclusiones de la incorporación de los anillos laterales y comparando los motores macizo y chapas, puede apreciarse que los incrementos son más moderados en el motor con rotor de chapas que en el macizo, para todas las magnitudes. Aparte, el motor de chapas es más equilibrado no sufriendo las alteraciones del motor macizo. Así pues, resulta más decisiva la incorporación de aros en un motor macizo que no en un motor de chapas, al contrario de lo que podría pensarse, debido a que como se vio en el capítulo V, aún sin anillos las chapas podían cerrar el circuito eléctrico a través de ellas.

### 9.3.2.3 Efecto del material del rotor en las magnitudes electromagnéticas

Para realizar este análisis nos basaremos en las simulaciones realizadas mediante el programa FEMM de los modelos de motor que estamos estudiando en este apartado: motor de jaula, motor macizo con aros y motor de chapas tipo *A*, en el régimen de funcionamiento estándar de 3000 rpm y con un deslizamiento nominal del 3.33%.

Como los estatores son iguales para todos los motores, el único material modificado es el del rotor, y dentro del rotor, su núcleo. Los rotores de chapas y jaula de ardilla están formados por apilado de chapas, aunque dispuestas de forma muy distinta, pero en definitiva son unas chapas con unas características determinadas. Las barras del rotor de jaula se mantienen de aluminio que es el material de fabricación habitual y además uno de los más adecuados, por lo que este material no se cambia durante el estudio. Finalmente, el rotor macizo suele fabricarse normalmente de acero F-114.

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

En primer lugar, se escogieron una serie de permeabilidades relativas, y para cada una de ellas se realizó un análisis de conductividad, dejando las restantes características inalterables. Posteriormente se eligió de cada serie la mejor conductividad, realizándose una tabla de valores de pares conductividad-permeabilidad óptimos.

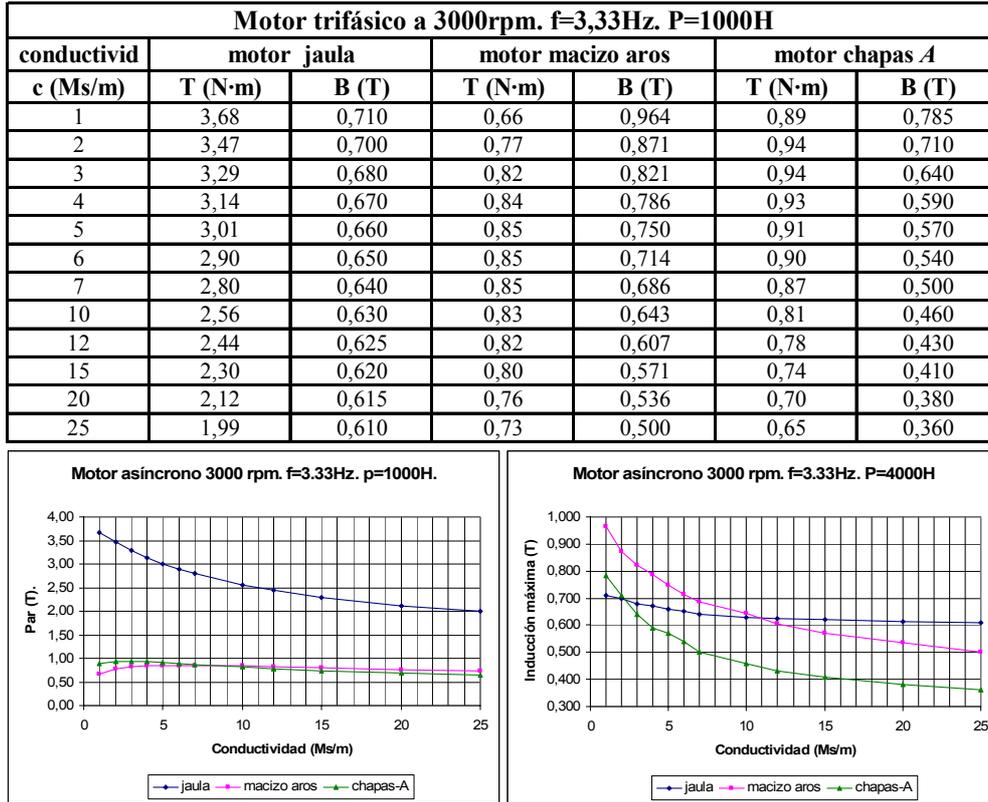


Figura 9.124. Variación del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para los motores analizados con una permeabilidad relativa de 1000.

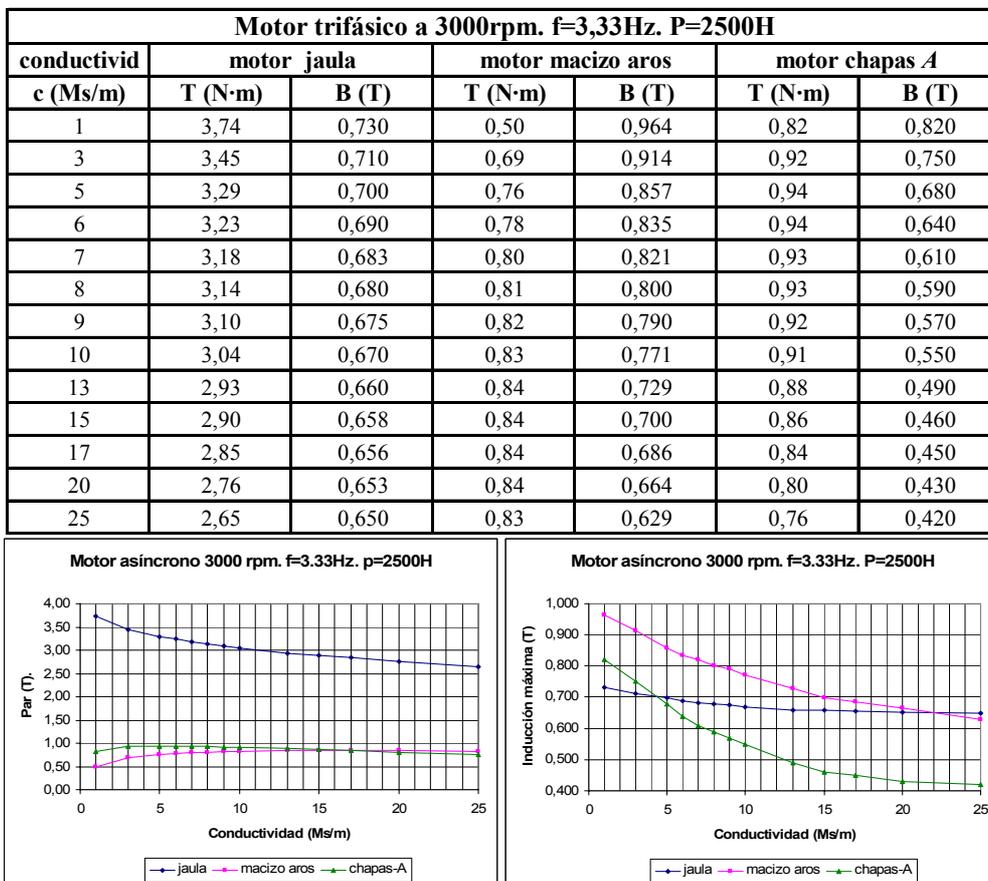


Figura 9.125. Variación del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para los motores analizados con una permeabilidad relativa de 2500.

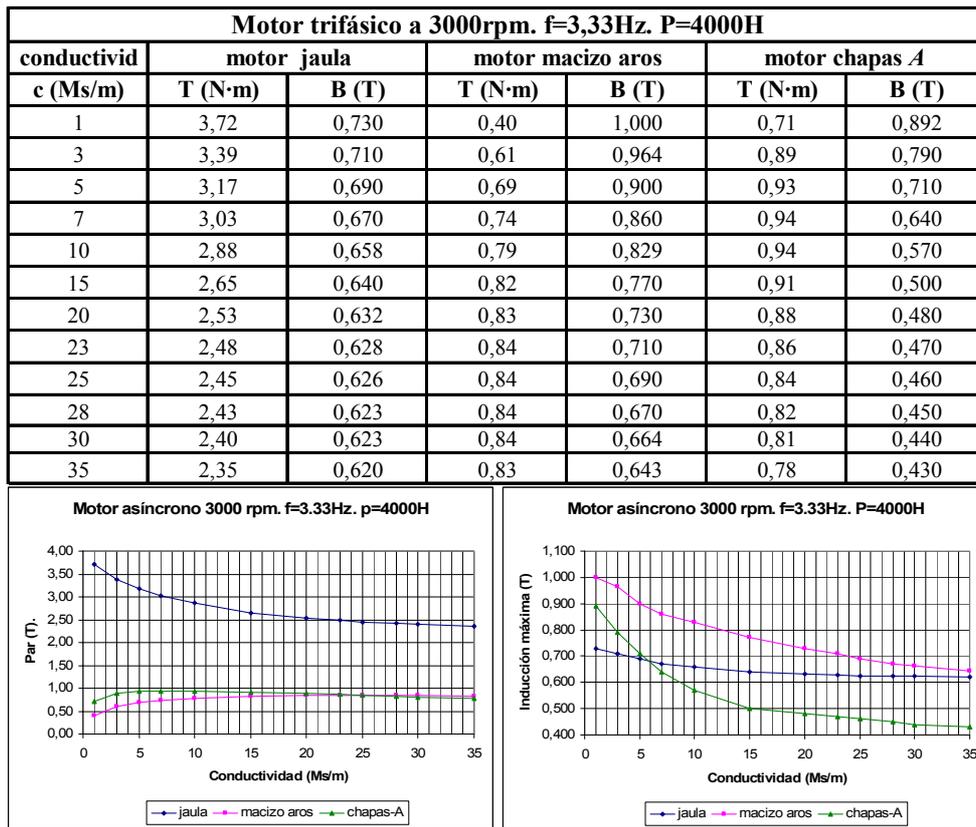


Figura 9.126. Variación del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para los motores analizados con una permeabilidad relativa de 4000.

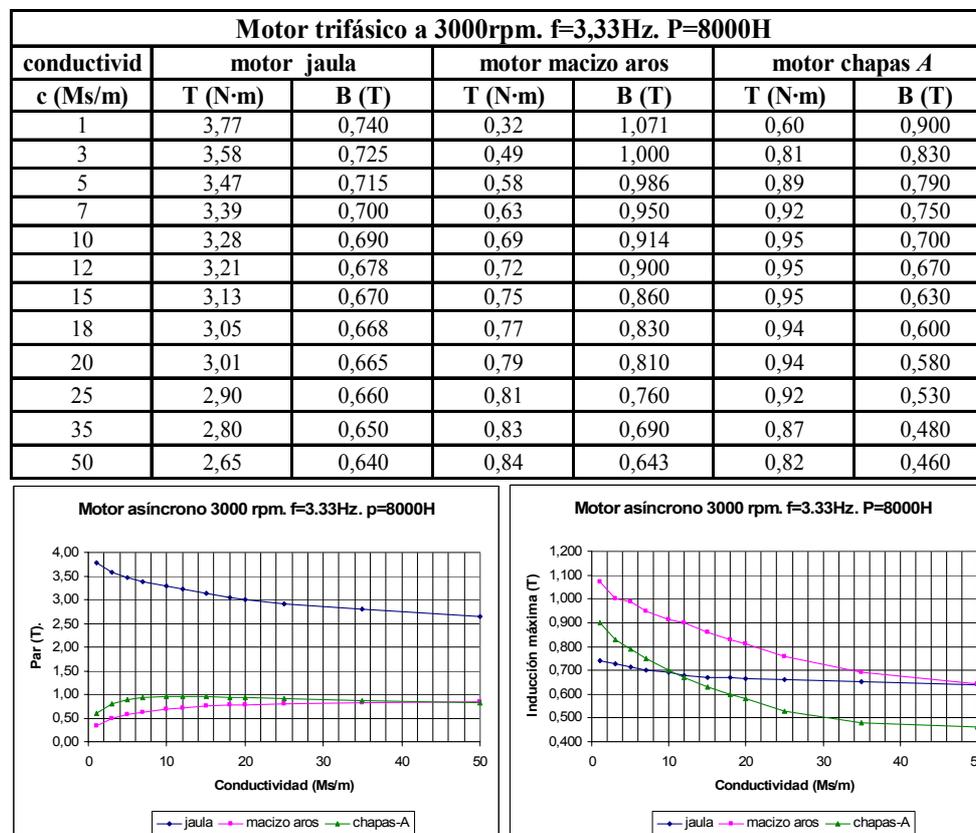


Figura 9.127. Variación del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para los motores analizados con una permeabilidad relativa de 8000.

Aunque la permeabilidad relativa de las chapas de valor 15000 sale de lo normal, también se ha contemplado en las simulaciones para ver como se comportarían los diversos motores con chapas de características especiales, En este caso el motor macizo eleva la conductividad óptima hasta los 102 MS/m, fuera ya de la tabla.

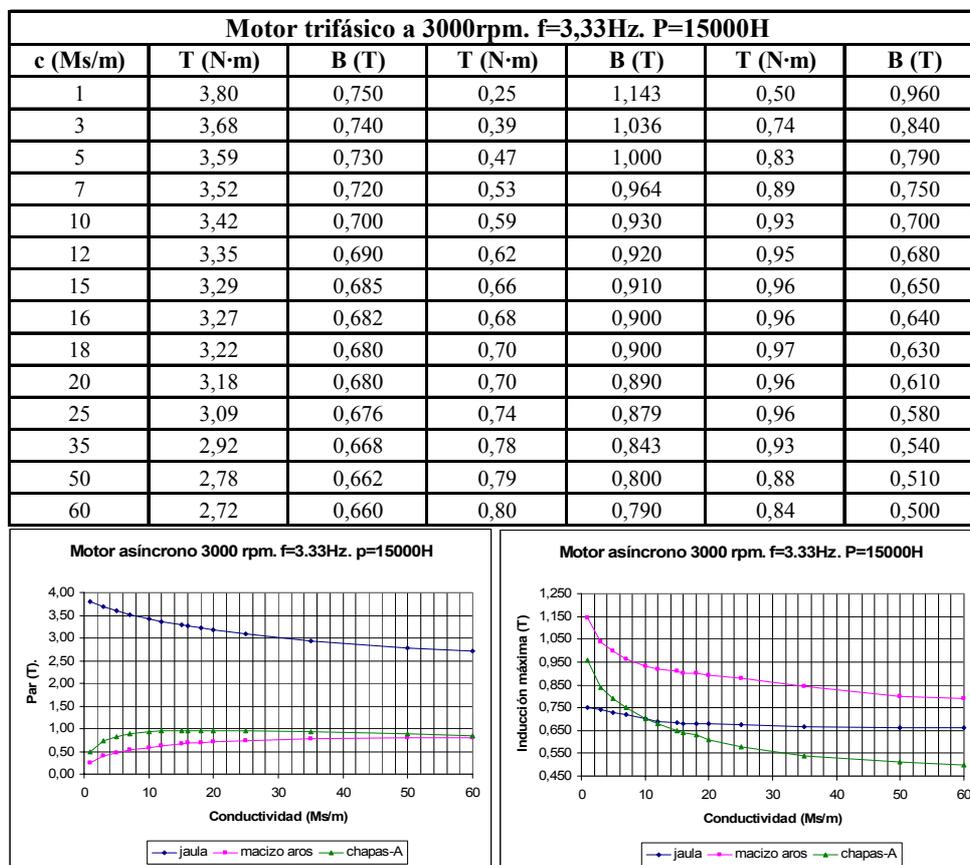


Figura 9.128. Variación del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad para los motores analizados con una permeabilidad relativa de 15000.

De las figuras y tablas de las conductividades anteriores, se extrae una serie de valores de par e inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad. De entre todas las conductividades de cada serie se ha escogido la que proporciona un par más elevado, representándose los resultados en la siguiente tabla:

<b>Motores trifásicos a 3000rpm. f=3,33Hz. P=2500H</b>									
permeab	motor jaula			motor macizo aros			motor chapas A		
p (H)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)	c (Ms/m)	T (N·m)	B (T)
1000	1,0	3,677	0,710	6	0,852	0,714	3	0,945	0,700
1500	1,0	3,700	0,720	10	0,845	0,707	4	0,944	0,690
2500	1,0	3,720	0,730	16	0,840	0,700	5	0,943	0,670
4000	1,0	3,740	0,735	25	0,837	0,693	7	0,943	0,650
6000	1,0	3,760	0,738	39	0,838	0,688	10	0,946	0,630
8000	1,0	3,775	0,740	52	0,838	0,686	12	0,950	0,620
10000	1,0	3,785	0,742	66	0,840	0,684	15	0,955	0,610
12000	1,0	3,793	0,744	80	0,842	0,683	16	0,960	0,605
15000	1,0	3,800	0,746	102	0,846	0,683	18	0,965	0,600

Tabla IX.XXXVII. Par e inducción máxima en el entrehierro para diversos motores en función de la permeabilidad relativa y considerando su conductividad óptima.

Asimismo, de la tabla anterior se extraen algunas gráficas que nos permitirán valorar la evolución de algunas de estas magnitudes en función de su permeabilidad. Para empezar, los valores conductividad-permeabilidad óptimos no siguen una regla común para todos los motores como muestra la gráfica.

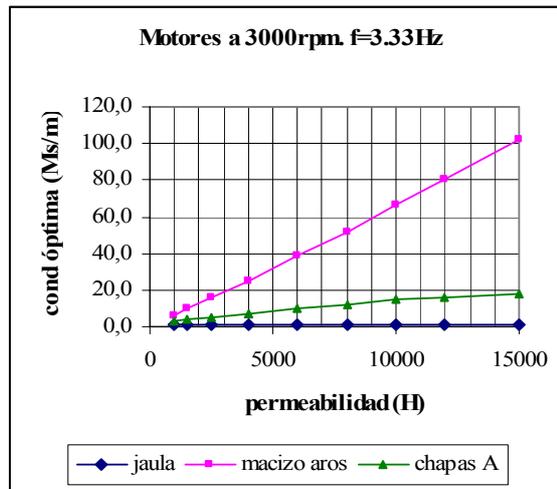


Figura 9.129. Evolución de los valores conductividad permeabilidad óptimos para los motores.

Así mientras que para el motor de jaula la conductividad donde se produce el par máximo no tiene un punto de inflexión sino que incluso con conductividades ficticias de 0.01 MS/m el par seguía aumentando, en el motor macizo con aros, su evolución esta dada por una recta de fuerte pendiente. Finalmente, en una posición intermedia, el motor de chapas *A*, dispone de una curva menos inclinada pero parecida al rotor macizo. De forma empírica podemos extraer unas ecuaciones de la evolución de la conductividad óptima en función de la permeabilidad del material del rotor:

- Motor jaula:  $c_{par\ máximo} = 1 \text{ (MS/m)}$  [9.110]
- Motor macizo aros:  $c_{par\ máximo} = 0.0068 \cdot \mu_r - 1.2785 \text{ (MS/m)}$  [9.111]
- Motor chapas *A*:  $c_{par\ máximo} = -3 \cdot 10^{-12} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_r^2 + 0.0013 \cdot \mu_r + 1.8264 \text{ (MS/m)}$  [9.112]

Donde  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa de las chapas. En una segunda serie de gráficas nos permite ver la evolución de la inducción en el entrehierro para cada una de estas conductividades óptimas, en función de la permeabilidad.

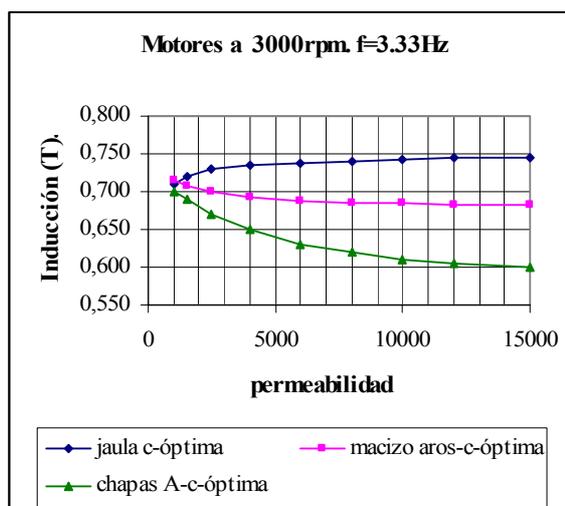


Figura 9.130. Evolución de la inducción máxima en el entrehierro en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades óptimas.

Vuelven a repetirse comportamientos bien dispares para los diversos motores, así en el motor de jaula, al aumentar la permeabilidad aumenta la inducción magnética, mientras que en el motor macizo con aros esta inducción sufre un ligero descenso al aumentar la permeabilidad relativa. Este descenso de la inducción es mucho más acusado en el motor con rotor de chapas.

Aparte, notar que si con permeabilidades relativas de bajo valor las diferencias en los valores de la inducción entre los motores son mínimas, a medida que aumentamos la permeabilidad estas diferencias se hacen cada vez más notorias. Como en el caso anterior se presentan unas ecuaciones empíricas válidas para el intervalo estudiado considerando a  $c$ , como la conductividad en MS/m.

- Motor jaula:  $B_{\text{máxima}} = -2 \cdot 10^{-10} \cdot c^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot c + 0.7115 \text{ (T)}$  [9.113]
- Motor macizo aros:  $B_{\text{máxima}} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot c^2 - 6 \cdot 10^{-6} \cdot c + 0.7158 \text{ (T)}$  [9.114]
- Motor chapas A:  $B_{\text{máxima}} = 6 \cdot 10^{-10} \cdot c^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot c + 0.7121 \text{ (T)}$  [9.115]

Por último la evolución del par en el entrehierro también en función de la permeabilidad relativa y para estas conductividades óptimas es el presentado en las siguientes gráficas.

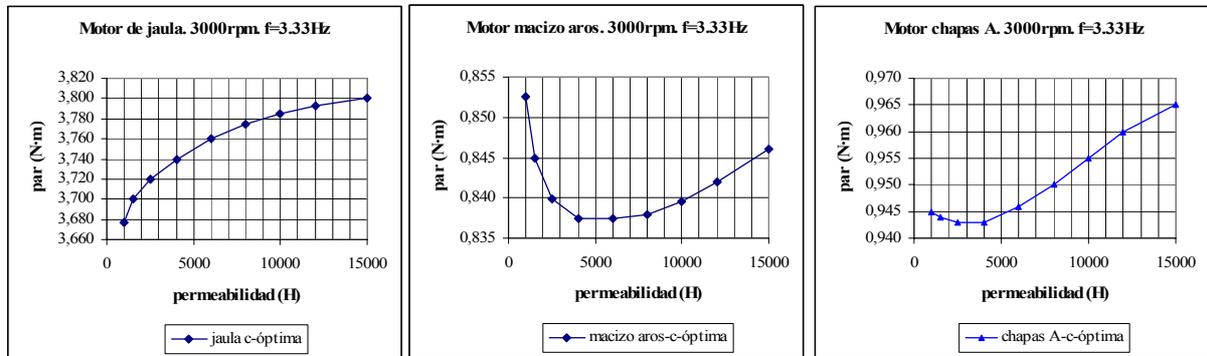


Figura 9.131. Evolución del par en el entrehierro en función de la permeabilidad relativa y para cada una de las conductividades óptimas.

De nuevo vuelven a coincidir las evoluciones del par de los motores macizos y de chapas (aunque con pendientes diferentes), comportándose el motor de jaula de forma inversa ya que aumenta el par al aumentar la permeabilidad. Para este intervalo estudiado las ecuaciones empíricas que representan a estas evoluciones considerando la conductividad  $c$ , en MS/m, son:

- Motor jaula:  $T_{\text{par máximo}} = 0.0457 \cdot \ln \cdot c + 3.3631 \text{ (N} \cdot \text{m)}$  [9.116]
- Motor macizo aros:  $T_{\text{par máximo}} = -3 \cdot 10^{-14} \cdot c^3 + 9 \cdot 10^{-10} \cdot c^2 - 8 \cdot 10^{-6} \cdot c + 0.8568 \text{ (N} \cdot \text{m)}$  [9.117]
- Motor chapas A:  $T_{\text{par máximo}} = -2 \cdot 10^{-14} \cdot c^3 + 6 \cdot 10^{-10} \cdot c^2 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot c + 0.9474 \text{ (N} \cdot \text{m)}$  [9.118]

Si ahora representamos todas las series de datos de cada motor en un mismo gráfico se cumplen las evoluciones dadas para el par y la inducción máxima óptimas. Así, mientras que en el motor de jaula y para cualquier conductividad, a medida que aumentamos esta conductividad el par y la inducción disminuyen, en los motores macizo y chapas el par va aumentando con la conductividad hasta sufrir una inflexión a un valor determinado de esta conductividad.

Es de remarcar que las conductividades en las cuales se produce el par máximo (conductividades óptimas) son mucho mayores en el motor macizo que en el de chapas, lo que repercute en un comportamiento más homogéneo de este último al variar el material que forma las chapas del rotor.

Por su parte, la inducción se comporta de forma más homogénea en todos los motores analizados, disminuyendo su valor al aumentar la conductividad, notándose un incremento de la conductividad óptima al aumentar la permeabilidad del material del rotor.

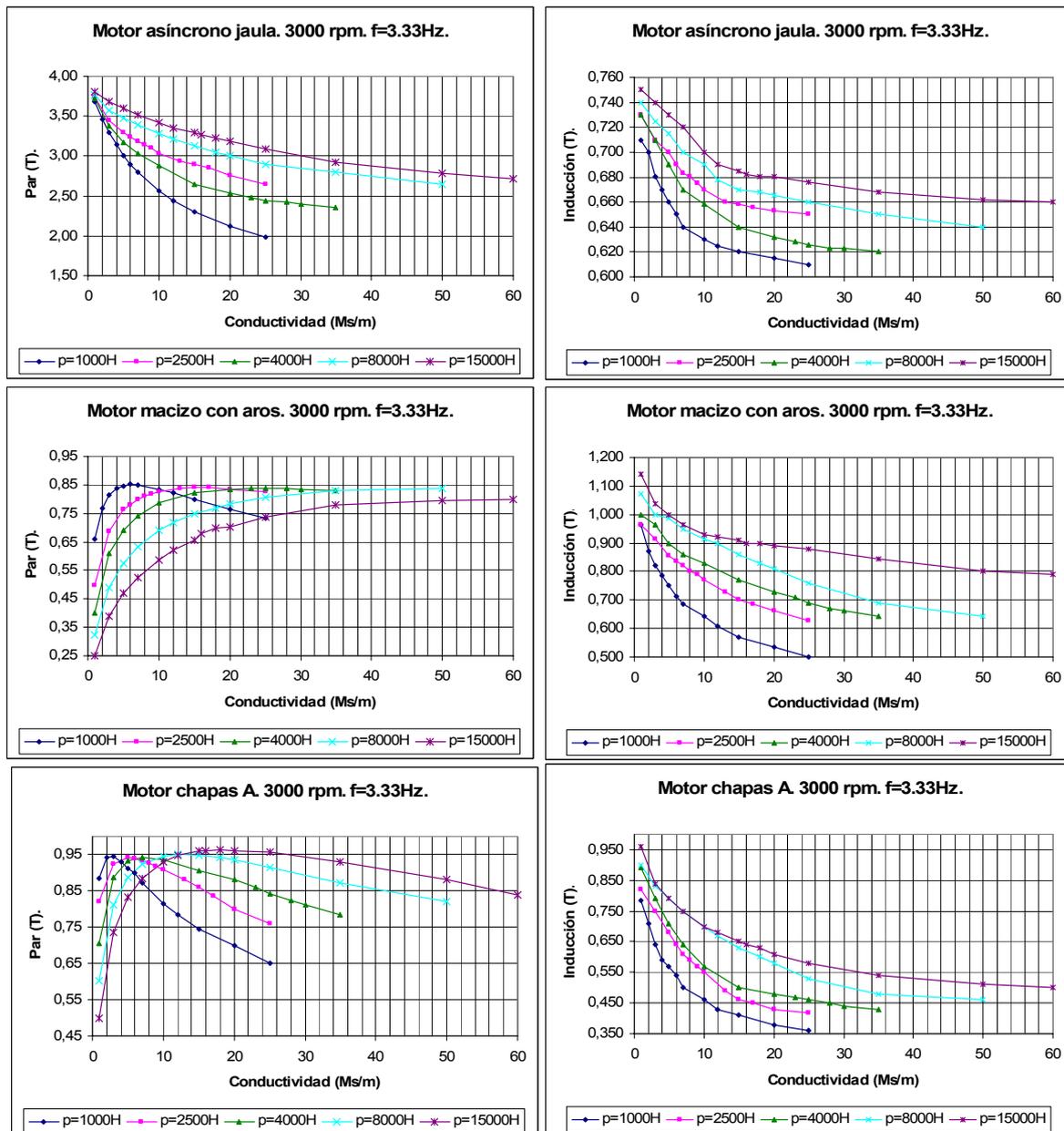


Figura 9.132. Resumen de la evolución del par y la inducción máxima en el entrehierro en función de la conductividad y para cada una de las permeabilidades relativas analizadas.

Una vez halladas las conductividades óptimas para cada permeabilidad, cabría preguntarnos: ¿si adoptamos como conductividad de las chapas a esta conductividad óptima y variamos la permeabilidad alcanzaremos valores de par más elevados? Para responder a esta hipótesis, se tenía que realizar de nuevo unas series de simulaciones, pero en esta ocasión variando las permeabilidades.

Estas simulaciones, no obstante, no se han realizado, ya que para el motor de jaula por ejemplo no se han llegado a encontrar los valores óptimos de conductividad (puntos de inflexión del par), habiéndose realizado simulaciones con conductividades ficticias (del orden de 0.01 MS/m) donde el par seguía creciendo, lo que resulta lógico dada la configuración del rotor de estos motores.

Para el motor de chapas, el estudio ya se ha realizado en la comparación entre motores de chapas, observándose que los pares conductividad-permeabilidad óptimos se mantienen hasta valores de permeabilidad de 15000, a partir de esta permeabilidad, se aprecia un desplazamiento de los pares óptimos en sentido ascendente, aunque las variaciones son mínimas.

Nos quedaría por ver como se comporta el motor macizo con aros al mantener las conductividades y variar las permeabilidades relativas, pero realizadas las pruebas para permeabilidades de hasta 15000, los pares óptimos conductividad-permeabilidad se mantienen inalterables y para permeabilidades de materiales mayores no tienen mucho sentido estos motores.

### 9.3.2.4 Efecto del material del rotor sobre el campo magnético

Una vez conocidos los resultados electromagnéticos cuando se varía el material que compone el rotor, pasamos a estudiar como afectan estos cambios en la forma y distribución del campo magnético.

En primer lugar se muestran cuatro series de los motores analizados, formados por rotores con permeabilidades relativas de 1000, 2500, 8000 y 15000. De cada serie se ofrece asimismo cinco imágenes correspondientes a las conductividades de (1, 3, 7, 10 y 25 MS/m).

Se aprecia en estas series que al aumentar la conductividad del material del rotor las corrientes son más superficiales, demostrándose asimismo que con estos aumentos el campo creado por el rotor se incrementa lo se traduce en un campo total 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, originando este desfase un cambio en los valores de la resistencia y reactancia del rotor en los motores de chapas y macizos.

Si cuantificamos, para una misma conductividad, la profundidad que alcanzan las líneas de campo en los rotores de chapas y macizo cuando variamos sus permeabilidades relativas tendremos la siguiente tabla para los motores analizados.

Motor a 3000rpm con rotor de chapas-A. S=3,33Hz							
p=1000H	profund.	p=2500H	profund.	p=4000H	profund.	p=8000H	profund.
c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm
1,0	7,30	1,0	5,60	1,0	4,80	1,0	3,40
3,0	4,50	3,0	3,70	3,0	3,00	3,0	2,20
5,0	3,60	5,0	2,75	5,0	2,30	5,0	1,80
7,0	3,10	7,0	2,40	7,0	2,00	7,0	1,60
10,0	2,60	10,0	2,00	10,0	1,70	10,0	1,40
12,0	2,35	12,0	1,80	12,0	1,55	12,0	1,30
15,0	2,00	15,0	1,55	15,0	1,35	15,0	1,15
18,0	1,75	18,0	1,40	18,0	1,20	18,0	1,05
20,0	1,60	20,0	1,30	20,0	1,10	20,0	1,00
25,0	1,35	25,0	1,05	25,0	1,00	25,0	0,90

Motor a 3000rpm con rotor macizo aros. S=3,33Hz							
p=1000H	profund.	p=2500H	profund.	p=4000H	profund.	p=8000H	profund.
c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm	c (Ms/m)	mm
1,0	9,80	1,0	6,72	1,0	5,76	1,0	4,60
3,0	5,60	3,0	3,84	3,0	3,24	3,0	2,60
5,0	4,20	5,0	2,72	5,0	2,34	5,0	2,00
7,0	3,50	7,0	2,40	7,0	1,94	7,0	1,70
10,0	2,94	10,0	2,00	10,0	1,80	10,0	1,50
12,0	2,66	12,0	1,84	12,0	1,62	12,0	1,40
15,0	2,38	15,0	1,60	15,0	1,44	15,0	1,20
18,0	2,24	18,0	1,44	18,0	1,35	18,0	1,10
20,0	2,10	20,0	1,36	20,0	1,26	20,0	1,00
25,0	1,82	25,0	1,20	25,0	1,17	25,0	0,80

Tabla IX.XXXVIII. Profundidad alcanzada al 50% del valor de la inducción máxima en la corona del rotor para el motor de chapas tipo A, y el motor macizo con aros.

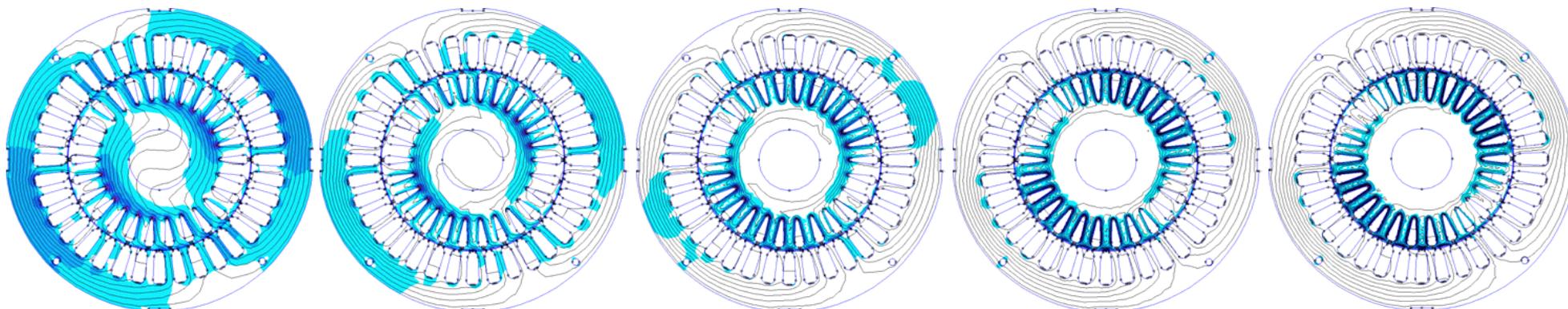


Figura 9.133. Campos magnéticos motor jaula para permeabilidad relativa de 1000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

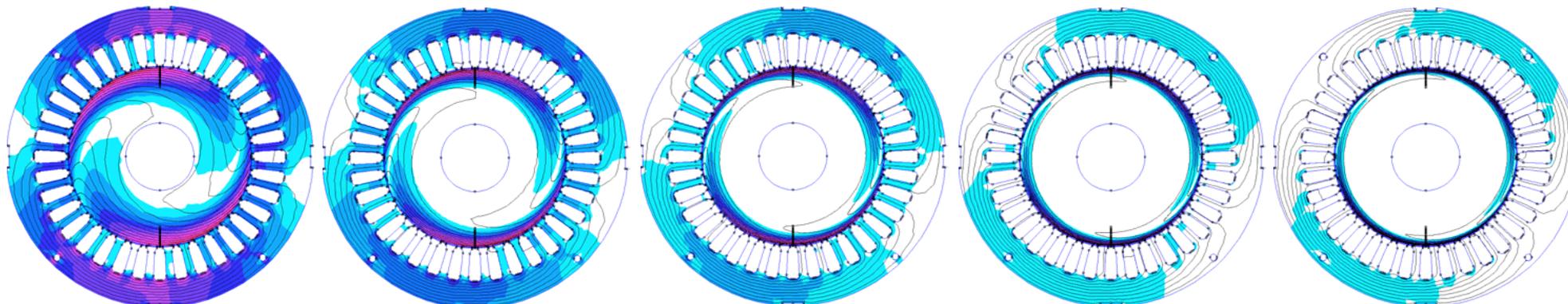


Figura 9.134. Campos magnéticos motor macizo aros para permeabilidad relativa de 1000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m, 15MS/m y 25 MS/m

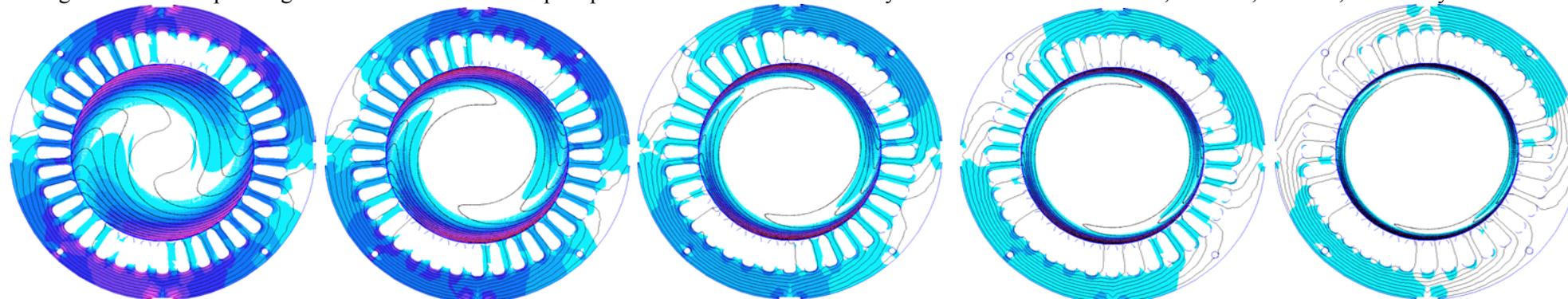


Figura 9.135. Campos magnéticos motor chapas A, para permeabilidad relativa de 1000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m, 15MS/m y 25 MS/m.

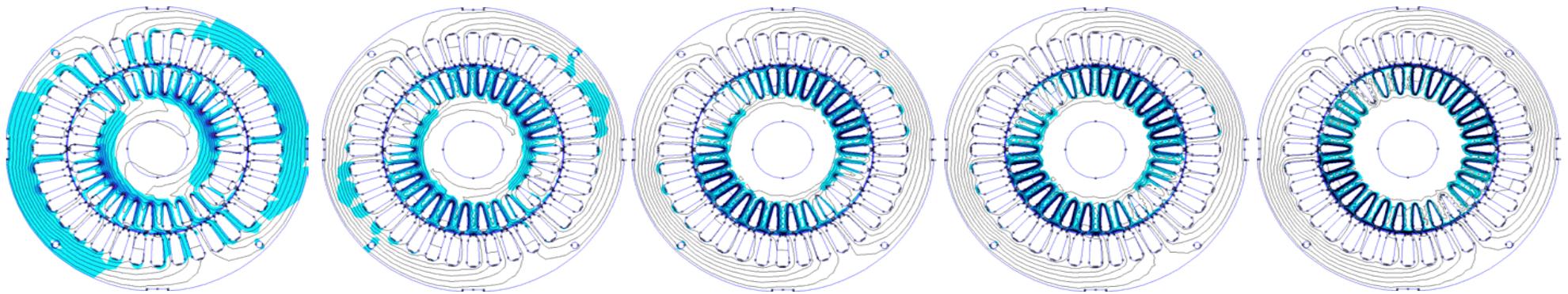


Figura 9.136. Campos magnéticos motor jaula para permeabilidad relativa de 2500 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m.

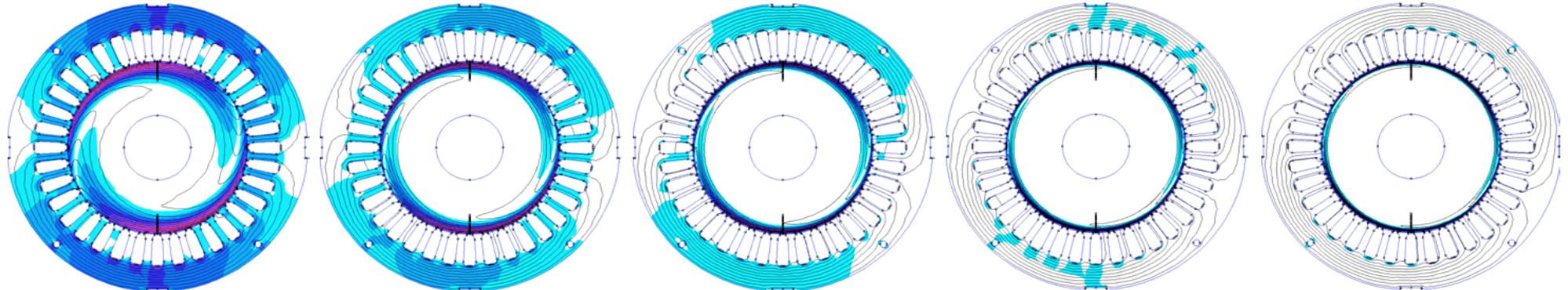


Figura 9.137. Campos magnéticos motor macizo aros para permeabilidad relativa de 2500 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

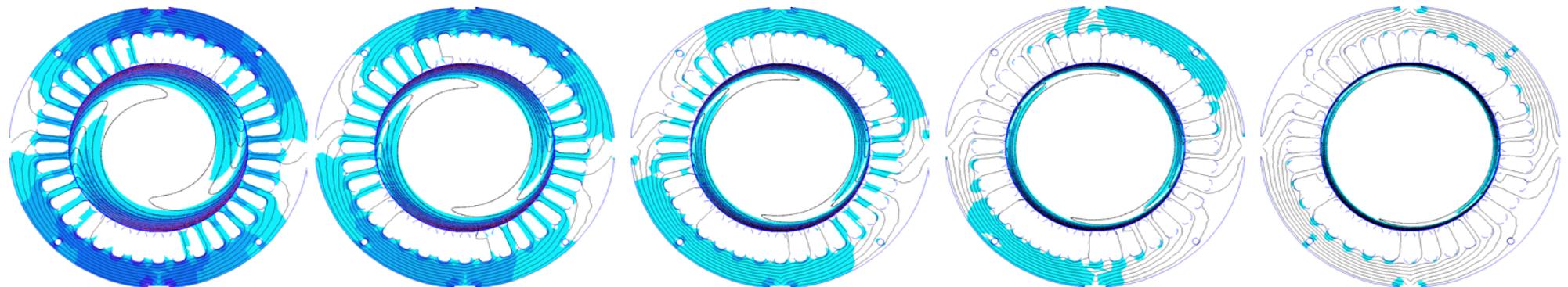


Figura 9.138. Campos magnéticos motor chapas A, para permeabilidad relativa de 2500 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

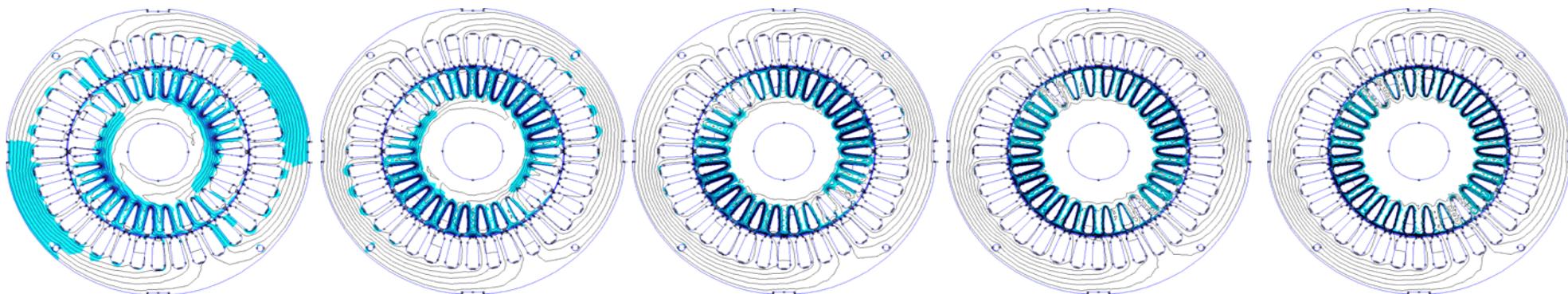


Figura 9.139. Campos magnéticos motor jaula para permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

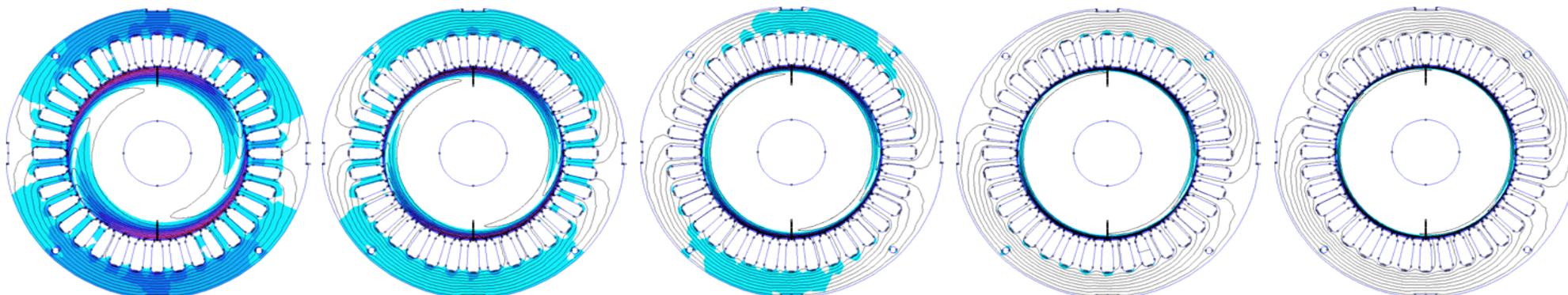


Figura 9.140. Campos magnéticos motor macizo aros para permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

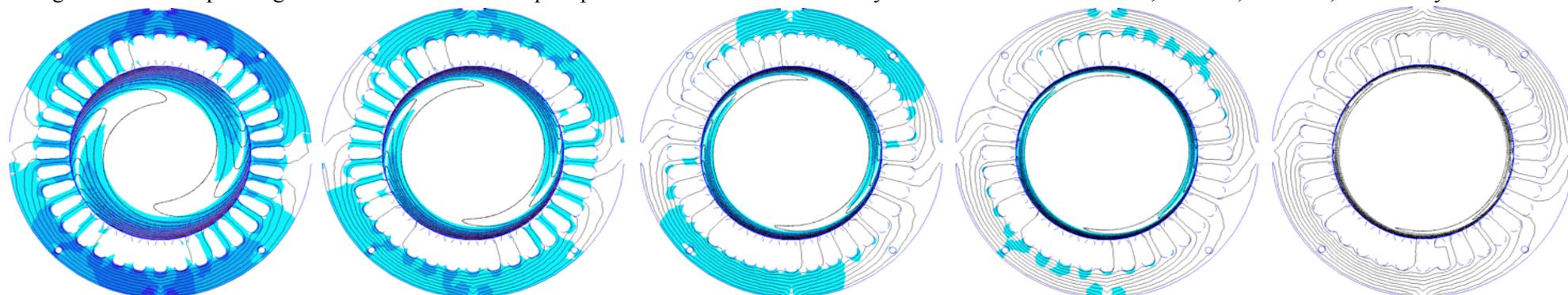


Figura 9.141. Campos magnéticos moto chapas *A*, para permeabilidad relativa de 4000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

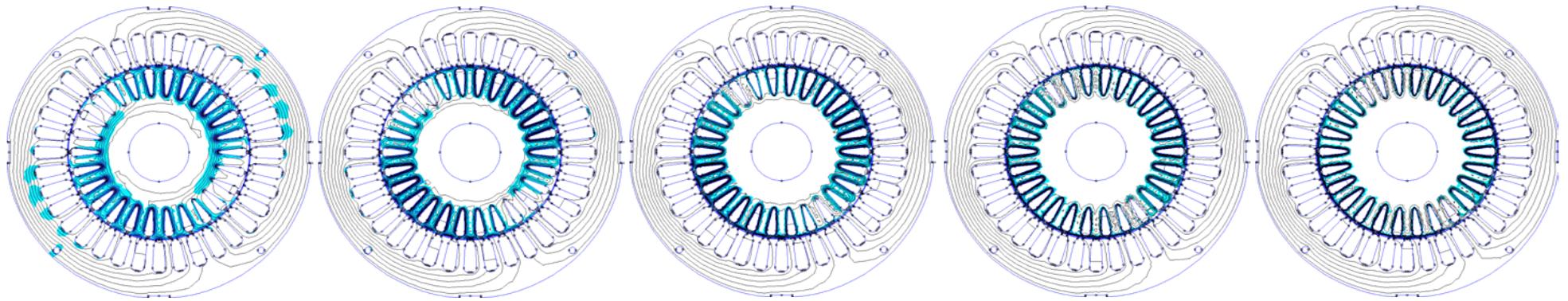


Figura 9.142. Campos magnéticos motor jaula para permeabilidad relativa de 8000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

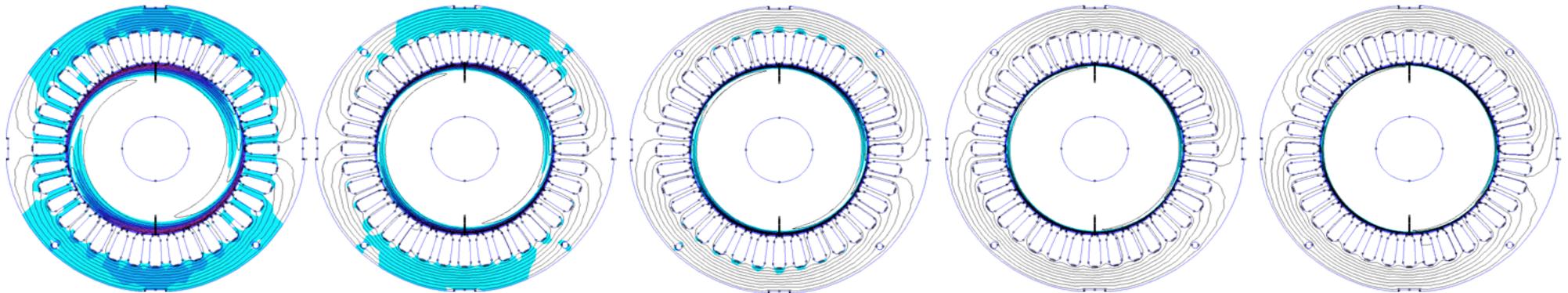


Figura 9.143. Campos magnéticos motor macizo aros para permeabilidad relativa de 8000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m

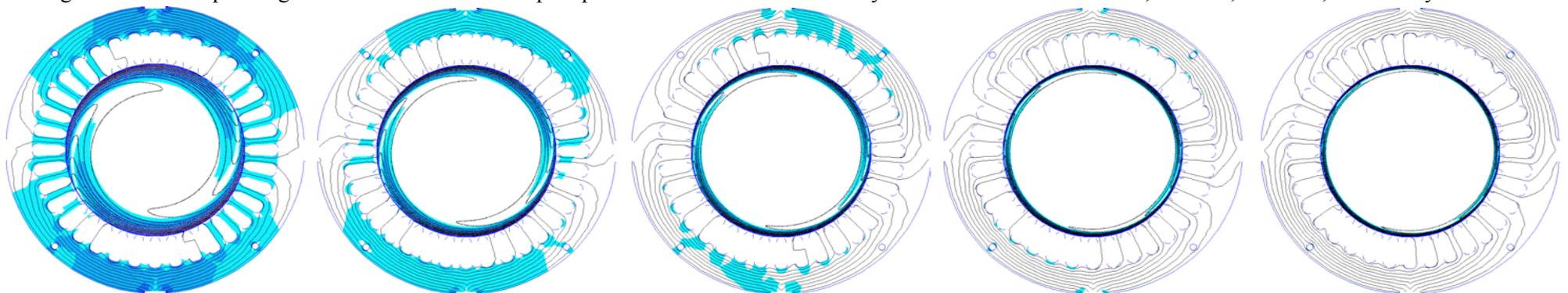


Figura 9.144. Campos magnéticos motor chapas A, para permeabilidad relativa de 8000 y conductividades de 1 MS/m, 3 MS/m, 7 MS/m , 15 MS/m y 25 MS/m.

Cabe comentar que cuando nos referimos a la profundidad del campo magnético en la corona del rotor, nos referimos a una línea que va desde el radio exterior del rotor hasta su eje. En esta línea se ha medido el valor del 50% de la inducción máxima alcanzada, anotándose esta distancia en milímetros desde el radio exterior. Es por tanto una medida axial, no siguiendo la curvatura de las chapas.

En la serie de figuras anteriores se aprecia que a medida que la permeabilidad aumenta (para una misma conductividad) la profundidad que alcanzan las líneas de campo, en el rotor de chapas y macizo, disminuye. Es interesante graficar esta variación como muestra la siguiente figura.

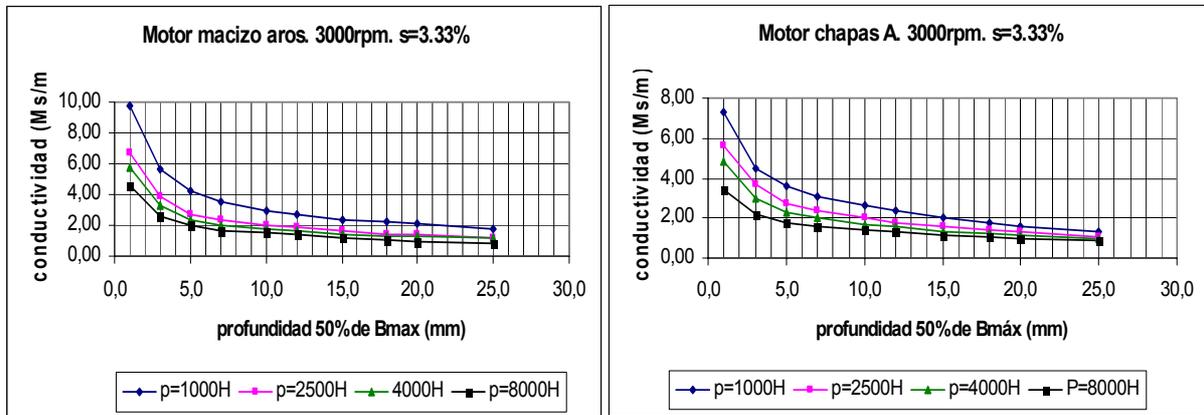


Figura 9.145. Evolución de la profundidad que alcanza el campo magnético en un corte axial del rotor en función de la conductividad y para cada una de las permeabilidades analizadas.

Se aprecia que en el motor con rotor de chapas el campo magnético, a igualdad de condiciones, es más superficial que no en el motor macizo con aros, lo que repercute en que el par neto obtenido con el motor de chapas sea mayor que en el motor macizo ya que debe recordarse que a mayor profundidad de las líneas de campo menos contribución tendrán en la generación del par neto como se explicó en el capítulo II. En promedio puede estimarse en un 15-20% el incremento de profundidad experimentado por el rotor macizo, aunque este valor como muestran las gráficas varía con la conductividad y permeabilidad del material del rotor.

De forma empírica podemos aproximar estas curvas a las siguientes ecuaciones, en el buen entendido que están realizadas para estos motores y en este margen de permeabilidades relativas.

▪ **Motor macizo con aros:**

$$\text{Para } \mu_r = 1000 \quad h = 9.7644 \cdot c^{-0.5186} \quad (\text{mm}) \quad [9.119]$$

$$\text{Para } \mu_r = 2500 \quad h = 6.7323 \cdot c^{-0.5324} \quad (\text{mm}) \quad [9.120]$$

$$\text{Para } \mu_r = 4000 \quad h = 5.5007 \cdot c^{-0.4933} \quad (\text{mm}) \quad [9.121]$$

$$\text{Para } \mu_r = 15000 \quad h = 4.6445 \cdot c^{-0.5107} \quad (\text{mm}) \quad [9.122]$$

▪ **Motor chapas tipo A:**

$$\text{Para } \mu_r = 1000 \quad h = 7.9121 \cdot c^{-0.5150} \quad (\text{mm}) \quad [9.123]$$

$$\text{Para } \mu_r = 2500 \quad h = 6.1439 \cdot c^{-0.5114} \quad (\text{mm}) \quad [9.124]$$

$$\text{Para } \mu_r = 8000 \quad h = 3.6024 \cdot c^{-0.4071} \quad (\text{mm}) \quad [9.125]$$

$$\text{Para } \mu_r = 15000 \quad h = 2.9578 \cdot c^{-0.3777} \quad (\text{mm}) \quad [9.126]$$

Donde  $h$ , representa la profundidad axial desde el entrehierro 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 variación en grados que sufre el campo magnético total en función de la permeabilidad. Por tanto y para los mismos rotores, tendremos la siguiente distribución.

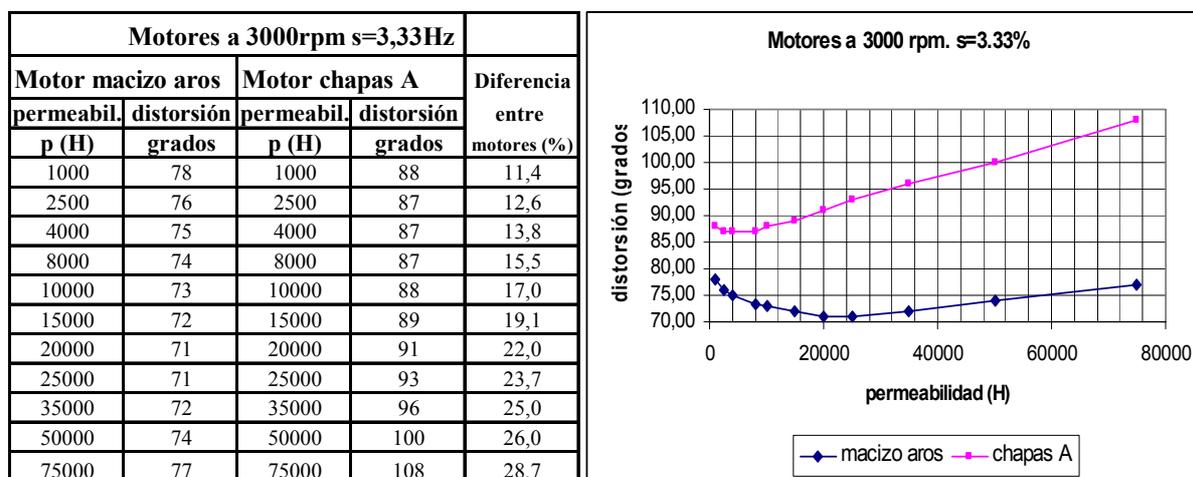


Figura 146. Grados distorsión del campo magnético neto en función de la permeabilidad relativa para los motores macizo con aros y chapas tipo A.

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

▪ **Motor macizo con aros**

$$\Theta = 2 \cdot 10^{-18} \cdot \mu_r^4 - 4 \cdot 10^{-13} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_r^2 - 0.0008 \cdot \mu_r + 78.17 \text{ (grados)} \quad [9.127]$$

▪ **Motor chapas tipo A**

$$\Theta = 5 \cdot 10^{-18} \cdot \mu_r^4 - 7 \cdot 10^{-13} \cdot \mu_r^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_r^2 - 0.0003 \cdot \mu_r + 87.808 \text{ (grados)} \quad [9.128]$$

La variación en la distorsión sufrida por el campo magnético neto total en el rotor prácticamente no se aprecia en el motor macizo con aros, ya que ésta se reduce a ocho grados en el caso extremo para una variación tan significativa de la permeabilidad relativa (de 1000 a 75000). En cambio, y sin ser importante, la variación se nota más en el motor de chapas A, elevándose hasta 20 grados para el mismo intervalo de permeabilidades.

En forma porcentual también se aprecia este efecto, siendo el desplazamiento del campo neto siempre mayor en el motor de chapas, que en promedio podría ponderarse en un 20%. Asimismo, mientras que en el motor de chapas se nota un incremento de este ángulo a medida que aumenta la permeabilidad, en el motor macizo con aros, la curva es mucho más plana, pudiéndose considerar que con valores de permeabilidad normales en la construcción de estos motores esta distorsión permanece prácticamente inalterable.

### 9.3.3 ANÁLISIS TÉRMICO LOS MOTORES DE JAULA, MACIZO CON AROS Y CHAPAS TIPO A

El análisis térmico se realizará de los tres motores principales: jaula, macizo con aros y chapas tipo A. 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.

Como ya se indico en la comparación térmica de los motores de chapas, 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 utilizo sólo 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 alcanzo temperaturas diferentes para cada modelo.

#### 9.3.3.1 Comparación térmica entre los diversos motores

Una primera serie de gráficas (figura 9.148) compara la respuesta térmica de los diversos motores 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:

- S = 2.5% temperatura estator: jaula, macizo aros, macizo, chapas D, A y B, hueco
- S = 2.5% temperatura rotor: jaula, macizo aros, chapas D, A y B, macizo, hueco
- S = 25% temperatura estator: chapas D, A, y B, macizo, hueco, macizo aros, **jaula**
- S = 25% temperatura rotor: chapas D, A, y B, hueco, macizo aros, macizo, **jaula**

A priori es de destacar que el motor de jaula de ardilla, no soporta los deslizamientos del 25%, en cambio los motores macizos y de chapas pueden soportar perfectamente estos regímenes. El motivo hay que buscarlo en el incremento que experimenta la intensidad con el deslizamiento en el motor de jaula, siendo este incremento menor en el motor macizo con aros y prácticamente inexistente en el motor de chapas tipo A.

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 diversos a 3000rev/m							
Motor	s= 2,5 %			s= 25 %			Temp Rotor
	I (A)	Temp Estator	Temp Rotor	Motor	I(A)	Temp Estator	
macizo aros	1,018	36,3	61,4	chapas tipo D	1,904	47,5	76,2
macizo	1,061	37,5	72,8	chapas tipo A	1,945	47,9	76,7
Jaula	1,227	34	51,9	chapas tipo B	2,333	51,5	80,2
chapas tipo D	1,275	38,5	63,9	macizo	2,442	63,9	112,1
chapas tipo A	1,276	38,6	64	macizo aros	2,600	72,9	111,8
chapas tipo B	1,537	42,9	70,5	hueco	2,879	70,1	100,1
hueco	1,539	43,1	71,0	jaula	6,877	ND	ND

Tabla IX.XXXIX. Intensidad y temperaturas del estator rotor para diversos motores.

En la tabla anterior se aprecia que para deslizamiento del 2.5%, un aumento de la intensidad representa un aumento de la temperatura del estator, pero esta regla no es totalmente cierta en todos los motores,

ya que por ejemplo el motor de jaula dispone de más intensidad que el resto de motores, y por el contrario, es uno de los que presenta valores más bajos de temperatura. Por otra parte, y siguiendo con el mismo deslizamiento del 2.5%, podemos apreciar que la secuencia de motores puestos en orden creciente para los valores de la intensidad no coincide con la temperatura del estator, ni asimismo, los ordenes crecientes de las temperaturas del estator y del rotor tampoco coinciden.

Por su parte y para deslizamientos del 25% tampoco coincide el orden creciente de la intensidad con el con el orden creciente de las temperaturas del estator y rotor, finalmente, para el motor de jaula de ardilla, para deslizamientos superiores al 15% no pueden efectuarse lecturas ya que la intensidad alcanza valores demasiado elevados que repercuten en temperaturas del rotor y estator inamisibles.

En las siguientes gráficas se representan estos valores, lo cual nos permite apreciar con mayor comodidad que no existe una relación directa entre temperatura del estator o rotor y la intensidad.

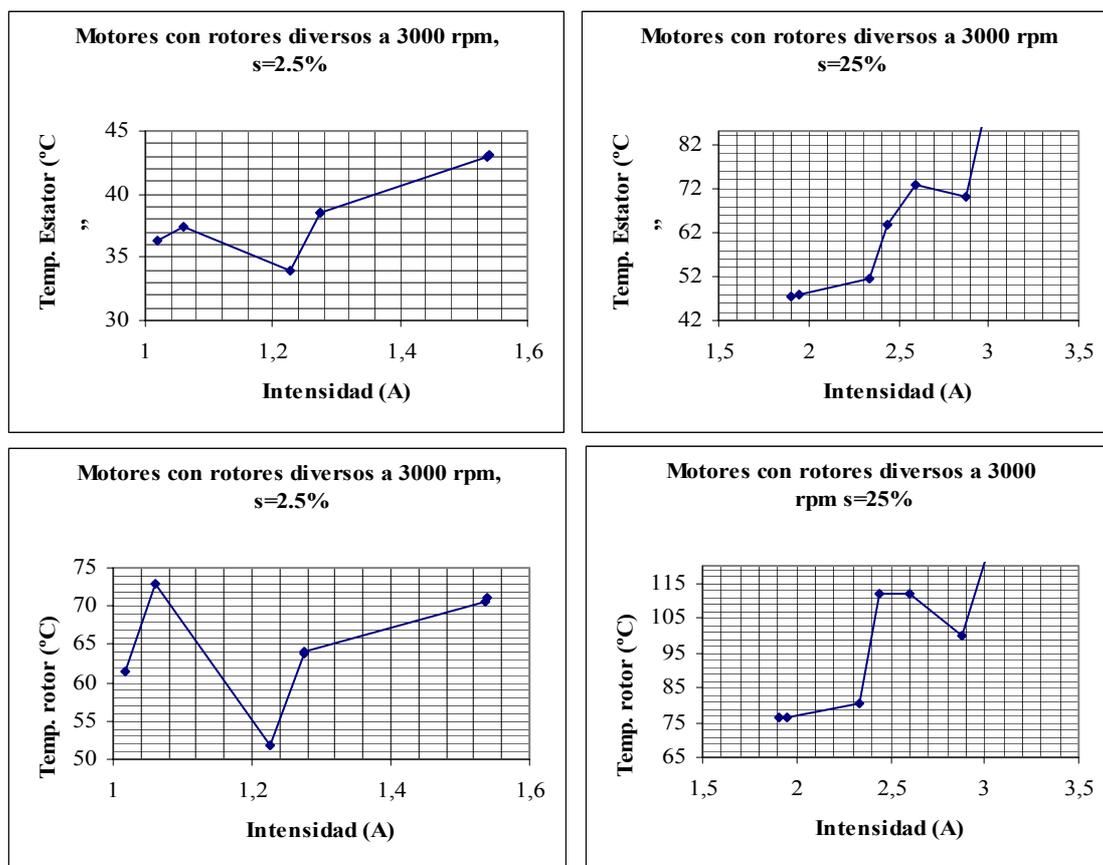


Figura 9.147. Evolución de las temperaturas del estator y del rotor en función de la intensidad para diversos motores equipados con los rotores analizados en la tabla IX.XXXIX.

Es decir, para interpretar estas gráficas (figura 9.147) nos debemos centrar en la tabla IX.XXXIX, en la cual se representan por el orden establecido en la misma tabla todos los motores en función de su intensidad (cada punto coincide con la intensidad de un motor por lo que estos puntos representan a cada uno de los motores con el orden establecido en la tabla).

Como puede apreciarse, un aumento de la intensidad no significa un aumento de las temperaturas del rotor y del estator, sino que depende del tipo de motor siendo la secuencia bastante irregular ya que entre los motores de jaula y macizo o chapas la relación es prácticamente inexistente. En cambio entre motores de un mismo tipo (los de chapas) la evolución era más regular. También se aprecia la característica remarcada anteriormente: con deslizamientos del 25%, y con el motor con rotor de jaula ya no es posible su funcionamiento.

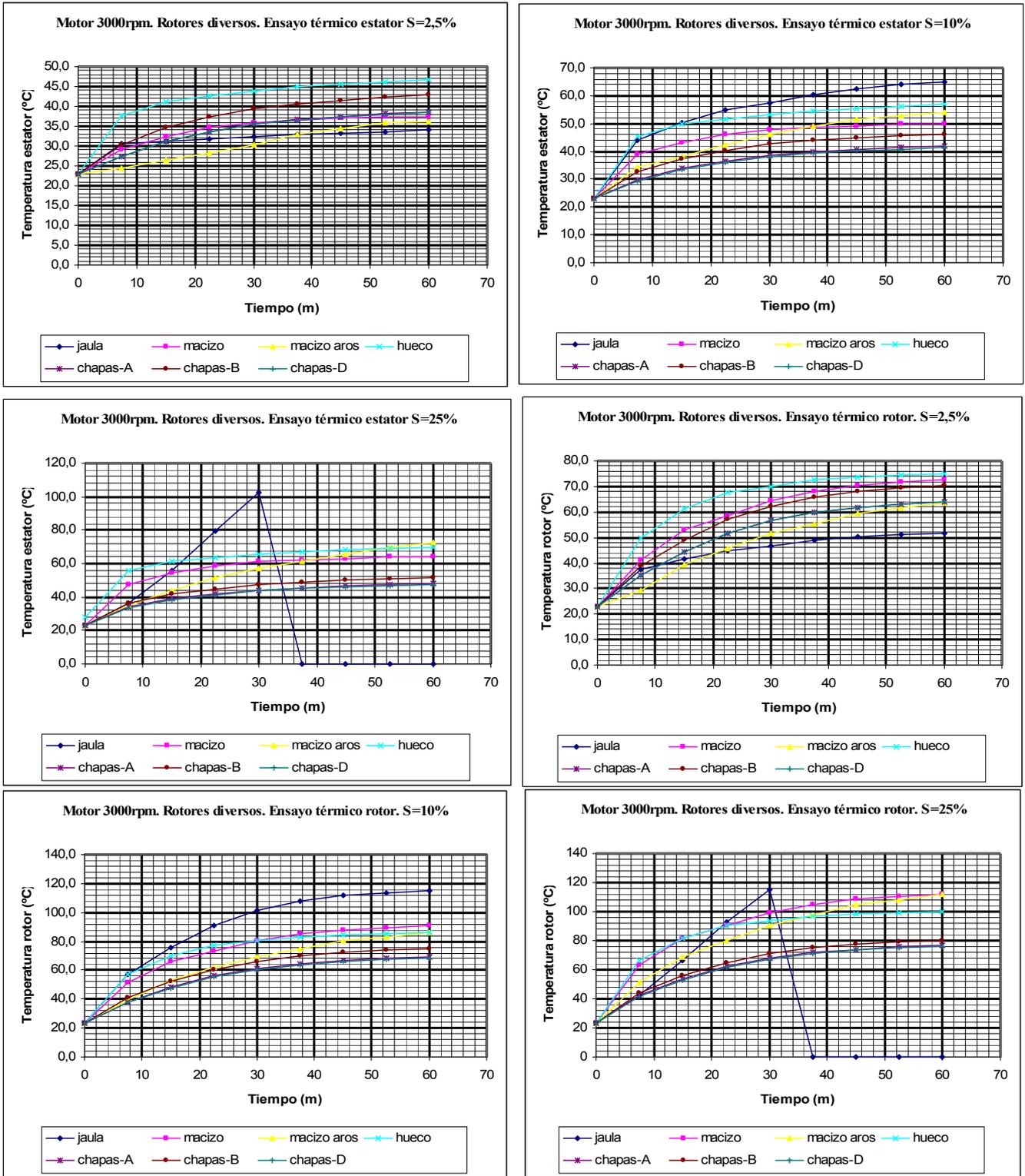


Figura 9.148. Temperatura del estator y del rotor de los motores equipados con algunos rotores para diversos deslizamientos.

De forma empírica y sólo para los motores analizados (jaula, macizo con aros y chapas tipo A), 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 ( $t$ , es el tiempo en minutos).

▪ **Deslizamiento 2.5%. Temperatura estator**

Motor jaula:  $\Theta_{estator} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0215 \cdot t^2 + 0.7705 \cdot t + 23.954$  (°C) [9.129]

Motor macizo con aros:  $\Theta_{estator} = -8 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0062 \cdot t^2 + 0.1345 \cdot t + 23.086$  (°C) [9.130]

Motor chapas A:  $\Theta_{estator} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.00116 \cdot t^2 + 0.7034 \cdot t + 22.920$  (°C) [9.131]

▪ **Deslizamiento 2.5%. Temperatura rotor**

Motor jaula:  $\Theta_{rotor} = 0.0003 \cdot t^3 - 0.0385 \cdot t^2 + 1.6614 \cdot t + 24.337$  (°C) [9.132]

Motor macizo con aros:  $\Theta_{rotor} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0074 \cdot t^2 + 1.1998 \cdot t + 22.346$  (°C) [9.133]

Motor chapas A:  $\Theta_{rotor} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0297 \cdot t^2 + 1.8584 \cdot t + 22.929$  (°C) [9.134]

▪ **Deslizamiento 25%. Temperatura estator**

Motor jaula:  $\Theta_{estator} =$  no definida

Motor macizo con aros:  $\Theta_{estator} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0249 \cdot t^2 + 1.7389 \cdot t + 23.077$  (°C) [9.135]

Motor chapas A:  $\Theta_{estator} = 0.0002 \cdot t^3 - 0.0315 \cdot t^2 + 1.4211 \cdot t + 23.689$  (°C) [9.136]

▪ **Deslizamiento 25%. Temperatura rotor**

Motor jaula:  $\Theta_{rotor} =$  no definida

Motor macizo con aros:  $\Theta_{rotor} = 0.0005 \cdot t^3 - 0.0661 \cdot t^2 + 3.809 \cdot t + 24.308$  (°C) [9.137]

Motor chapas A:  $\Theta_{rotor} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0497 \cdot t^2 + 2.6821 \cdot t + 23.566$  (°C) [9.138]

El motor equipado con rotor de chapas tipo A, no es precisamente el motor que sufre un menor calentamiento a altos regímenes sino al contrario, es uno de los motores que alcanzan mayor temperatura, ocupando el último lugar en cuanto a elevación de la temperatura del estator y del rotor con respecto a los motores de jaula y macizo con aros, aunque debe comentarse que no destaca en demasía de ellos, siendo su incremento moderado.

En cambio cuando el deslizamiento es alto (25%) el motor de chapas tipo A, pasa a ocupar el primer lugar en cuanto a motores con menor calentamiento (tanto del estator como del rotor), en esta ocasión el motor macizo con aros sufre un calentamiento importante y el motor de jaula ni tan siquiera puede llegar a funcionar debido a su elevada intensidad (6.877 A), que implica temperaturas inamisibles. El deslizamiento a partir del cual los motores de jaula de ardilla ya no pueden funcionar es del 15%.

Por tanto aquí se aprecia una de las características más notorias del motor de chapas, la pequeña variación que sufre la intensidad al aumentar la carga lo que permite su funcionamiento con deslizamientos elevados.

**9.3.3.2 Características térmicas de los motores para diversos deslizamientos**

Vamos a analizar ahora motor a motor (jaula, macizo con aros y chapas tipo A), el comportamiento que presentan al variar el deslizamiento y la velocidad como queda reflejado en las gráficas de las figuras 9.151 a 9.152. En este caso se resuelve para diferentes velocidades de los motores (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%).

En estas gráficas se observa que al variar los deslizamientos, para cada velocidad específica, las intensidades prácticamente no varían en los motores de chapas, en cambio se produce un ligero aumento en los motores macizos (en este caso con aros), y el aumento es mucho más significativo en

los motores de jaula, hasta tal punto que no permiten su funcionamiento. Las siguientes tablas y gráficas permiten apreciar esta evolución para los diversos motores analizados.

En primer lugar visualizaremos los resultados obtenidos para el motor de jaula, en los cuales se aprecia claramente el aumento que sufre la intensidad al aumentar la carga, hecho que se traduce en un aumento notable de la temperatura, que imposibilita su utilización en altos deslizamientos.

**Características motor de jaula con 3000rev/m**

n (rpm) - s(%)	I (A)	T Estat (°C)	T Rotor (°C)	n (rpm)	Pabsor (W)	Par (N·m)
1000-2,5	1,478	32,5	35	985	311	1,03
1000-10	2,010	51,3	77,2	915	993	6,67
1000-25	3,326	65	115	760	1904	10,77
1500-A-2,5	1,083	25	28	1470	481	2,16
1500-A-10	2,450	50	110	1360	1354	6,86
1500-A-25	4,175	77	140	1130	2470	10,59
1500-2,5	1,500	31	56	1475	801	1,76
1500-10	3,840	65	140	1350	2150	10,88
1500-25	6,555	ND	ND	1135	4157	16,12
3000-2,5	1,150	34	52	2935	641	1,57
3000-10	3,420	65	115	2700	2000	5,06
3000-25	6,450	ND	ND	2250	3953	7,43

Tabla IX.XXXX. Características eléctricas de los motores de inducción trifásicos.

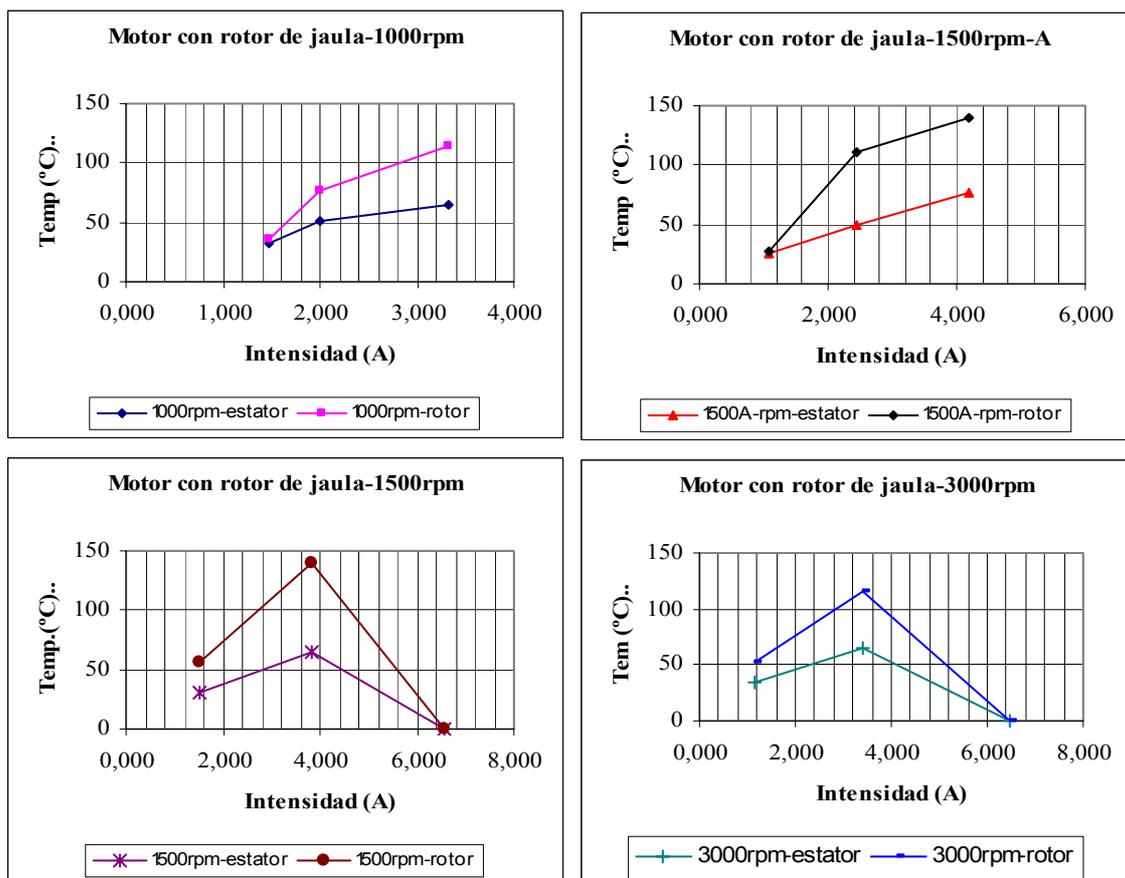


Figura 9.149. Temperaturas del rotor y estator para los deslizamientos y velocidades del motor jaula.

En los regímenes de 1500 y 3000 rpm la intensidad que se produce con el último deslizamiento (25%) ya no puede ser soportado por el motor siendo este régimen prohibitivo para el mismo. Aparte, en regímenes más bajos (1000 y 1500-A rpm) aunque el motor soporte perfectamente la intensidad, puede apreciarse que el calentamiento en los tres deslizamientos (2.5, 10 y 25%) no es lineal sino que

se produce una saturación o disminución de la pendiente de la temperatura alcanzada tanto en el rotor como en el estator al pasar de 10% al 25% de deslizamiento.

Si pasamos a analizar el motor macizo con aros para las mismas condiciones de trabajo se observa un cambio en el comportamiento. La intensidad sigue creciendo con el deslizamiento, pero este incremento no es tan acusado. Aparte, la progresión de la temperatura con el deslizamiento es prácticamente lineal, con lo cual puede predecirse su comportamiento siendo su regulación más fácil

Características motor macizo con aros a 3000 rev/m

n (rpm) - s(%)	I (A)	T Estat (°C)	T Rotor (°C)	n (rpm)	Pabsor (W)	Par (N·m)
1000-2,5	2,080	50	70	975	356	0,25
1000-10	2,168	60	95	905	467	1,13
1000-25	2,320	69,5	123,5	760	690	2,61
1500-A-2,5	1,300	33	35	1470	184	0,10
1500-A-10	1,429	36,7	56	1360	354	0,88
1500-A-25	1,850	47,3	117	1135	678	2,59
1500-2,5	2,250	64,5	126	1475	388	0,29
1500-10	2,570	74	138	1350	642	1,57
1500-25	3,040	86	146,5	1135	1083	3,87
3000-2,5	1,170	39	67,5	2930	265	0,29
3000-10	1,750	54	86	2700	784	1,31
3000-25	2,620	73	112	2260	1400	2,49

Tabla IX.XXXXI. Características eléctricas y térmicas del motor macizo con aros.

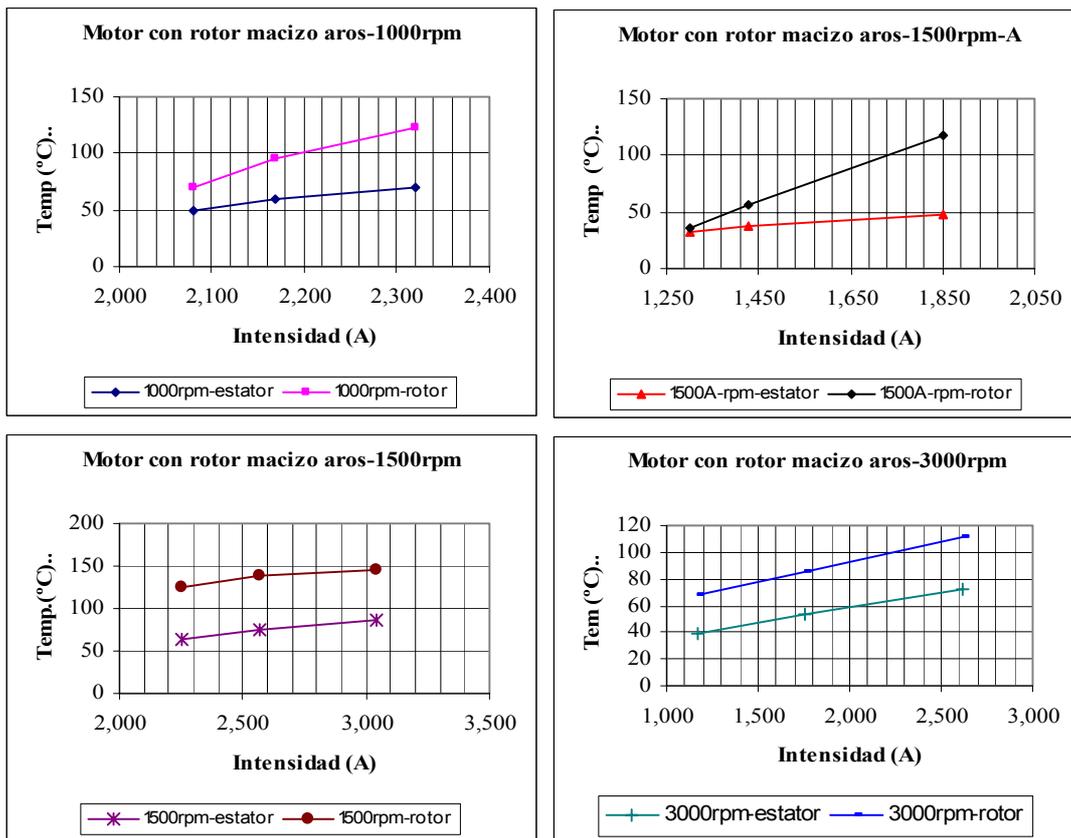


Figura 9.150. Temperatura del rotor y estator para diversos regímenes del motor macizo con aros.

Con este motor macizo con aros ya no existe el problema de intensidades elevadas a altos deslizamientos por lo que puede funcionar en estos regímenes aunque con temperaturas muy elevadas (la pendiente entre temperaturas e intensidades es aún elevada).

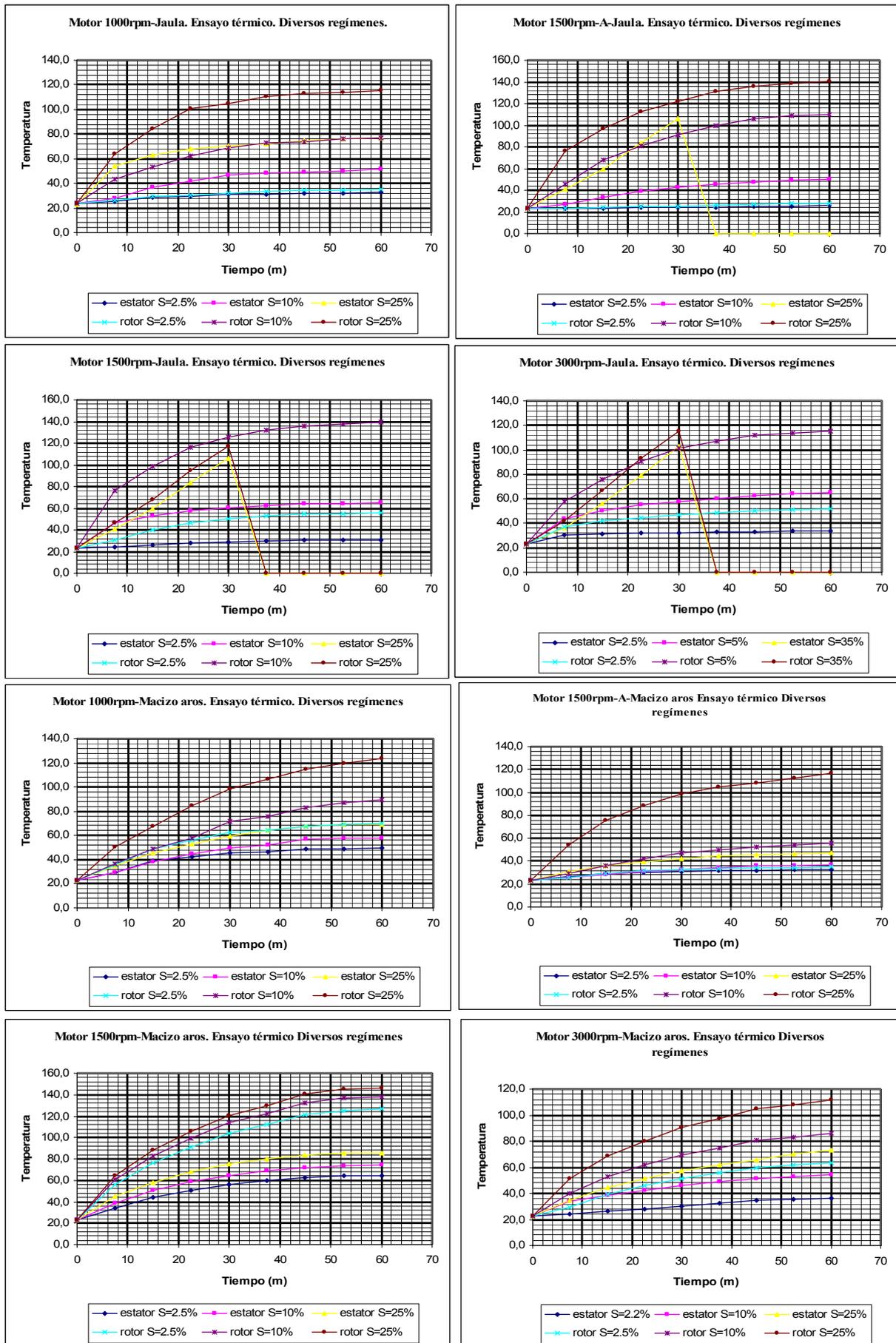


Figura 9.151. Temperatura del estator y rotor del motor de jaula y macizo aros para diversos deslizamientos.

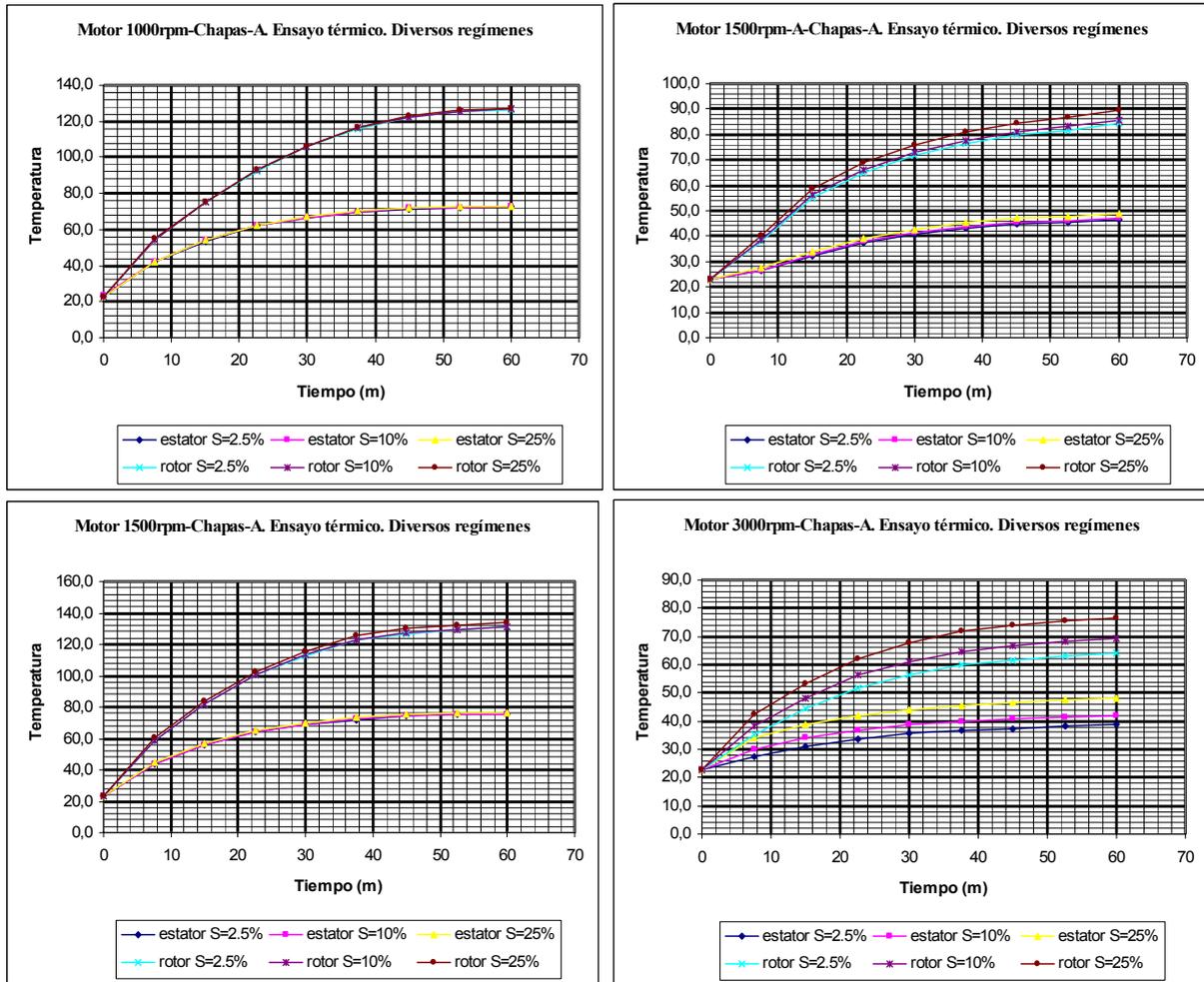


Figura 9.152. Temperatura del estator y rotor del motor de chapas tipo A, para diversos deslizamientos.

Finalmente, si analizamos las respuestas del motor de chapas tipo A, se observa un mayor parecido con el motor macizo con aros, quedando sus respuestas alejadas del motor de jaula de ardilla, principalmente por tres aspectos:

El primero de ellos es la linealidad que presenta el incremento de temperatura con respecto al aumento del deslizamiento. Ni tan siquiera el motor macizo presentaba una característica tan sencilla, lo que permite un mayor control y regulación de los sistemas de protección térmicos del motor.

Características motor de chapas tipo A

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	0,26
1000-10	2,710	73,1	126,7	915	700	0,98
1000-25	2,719	73,2	126,9	756	857	2,67
1500-A-2,5	2,013	46,5	84,5	1454	337	0,42
1500-A-10	2,049	47,6	86,3	1360	465	1,52
1500-A-25	2,109	48,8	89,5	1118	715	3,77
1500-2,5	3,234	75,4	131,1	1451	562	4,90
1500-10	3,298	76,1	132,8	1362	780	2,00
1500-25	3,393	76,5	134,4	1119	1171	5,41
3000-2,5	1,276	38,6	63,9	2893	302	0,39
3000-10	1,480	41,8	68,1	2715	580	1,25
3000-25	1,945	47,9	76,7	2229	1073	3,09

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

El segundo aspecto remarcable es el leve incremento que experimenta la intensidad (y por tanto la temperatura) al variar el deslizamiento. Dándose el caso que en algunos regímenes de bajas velocidades (1000 y 1500 rpm) este incremento es prácticamente nulo. Este es un aspecto fundamental que deberá ser analizado de forma más profunda, ya que permite grandes cargas sin aparentemente intensidades elevadas. En el régimen de 3000 rpm, aunque de forma débil, la intensidad ya experimenta un incremento con la carga.

El último aspecto remarcable, y que va unido al anterior, lo constituye el hecho que en ningún régimen de los probados el motor debía dejar de funcionar por problemas de calentamiento, ya que incluso con los largos periodos de prueba a los que se sometió la temperatura, aunque alta, se estabilizó permitiendo su funcionamiento sin problemas.

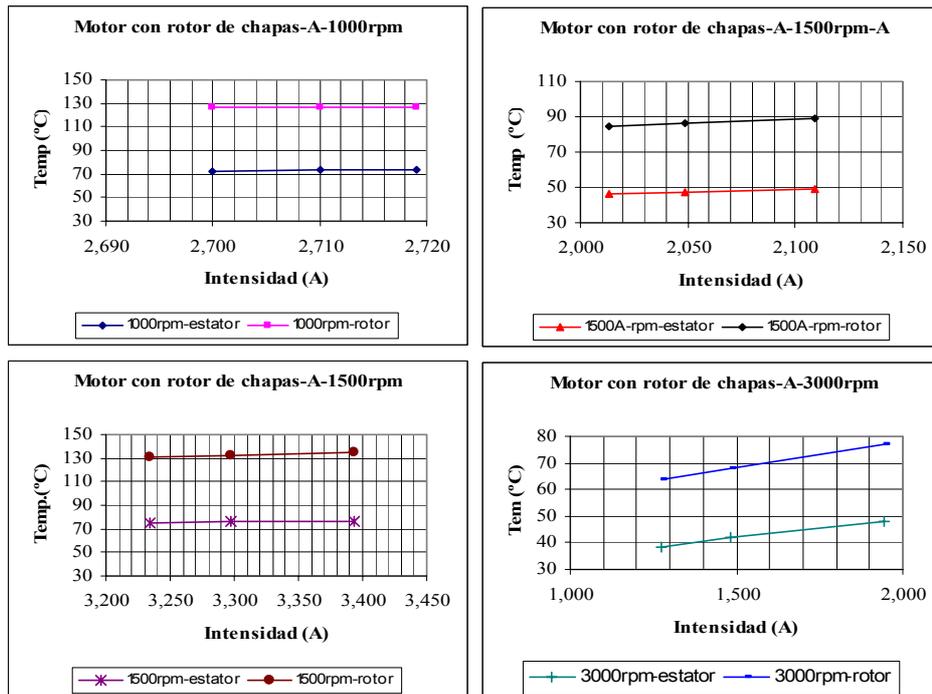


Figura 9.153. Temperatura del rotor y estator para diversos regímenes del motor de chapas tipo A.

### 9.3.3.3 Características térmicas de los motores para diversas velocidades

Si nos centramos finalmente en cada motor y representamos sus resultados de temperatura del estator y del rotor por separado para los dos deslizamientos extremos (2.5% y 25%) y para las cuatro velocidades probadas (1000, 1500-A, 1500 y 3000 rpm), obtendremos las figuras de 9.154 a 9.155.

La gradación para cada motor, comparados por regímenes y temperaturas, no ofrece el mismo resultado para las diversas máquinas. Así para los dos deslizamientos representados y para cada tipo de motor podemos dar una gradación de temperaturas máximas del estator y rotor respectivamente de mayor a menor temperatura de la forma que sigue.

- **Motor de jaula de ardilla** (ordenados de mayor a menor temperatura).
  - 2.5% de deslizamiento.
    - Estator: 1500 rpm, 3000 rpm, 1000 rpm y 1500-A rpm
    - Rotor: 1500 rpm, 3000 rpm, 1000 rpm y 1500-A rpm
  - 25% de deslizamiento.
    - Estator: **3000 rpm**, 1500 rpm, 1500-A rpm y 1000-A rpm
    - Rotor: **3000 rpm**, **1500 rpm**, 1500-A rpm y 1000 rpm

Los valores marcados en negrita indican que los motores no pudieron funcionar a estos regímenes.

- **Motor macizo con aros** (ordenados de mayor a menor temperatura).
  - 2.5% de deslizamiento.
    - Estator: 1500 rpm, 1000 rpm, 3000 rpm y 1500-A rpm
    - Rotor: 1500 rpm, 1000 rpm, 3000 rpm y 1500-A rpm
  - 25% de deslizamiento.
    - Estator: 1500 rpm, 3000 rpm, 1500-A rpm y 1000-A rpm
    - Rotor: 1500 rpm, 1500-A rpm, 3000 rpm y 1000 rpm
- **Motor de chapas tipo A** (ordenados de mayor a menor temperatura).
  - 2.5% de deslizamiento.
    - Estator: 1500 rpm, 1000 rpm, 1500-A rpm y 3000 rpm
    - Rotor: 1500 rpm, 1000 rpm, 1500-A rpm y 3000 rpm
  - 25% de deslizamiento.
    - Estator: 1500 rpm, 1000 rpm, 1500-A rpm y 3000-A rpm
    - Rotor: 1500 rpm, 1500-A rpm, 1500-A rpm y 3000 rpm

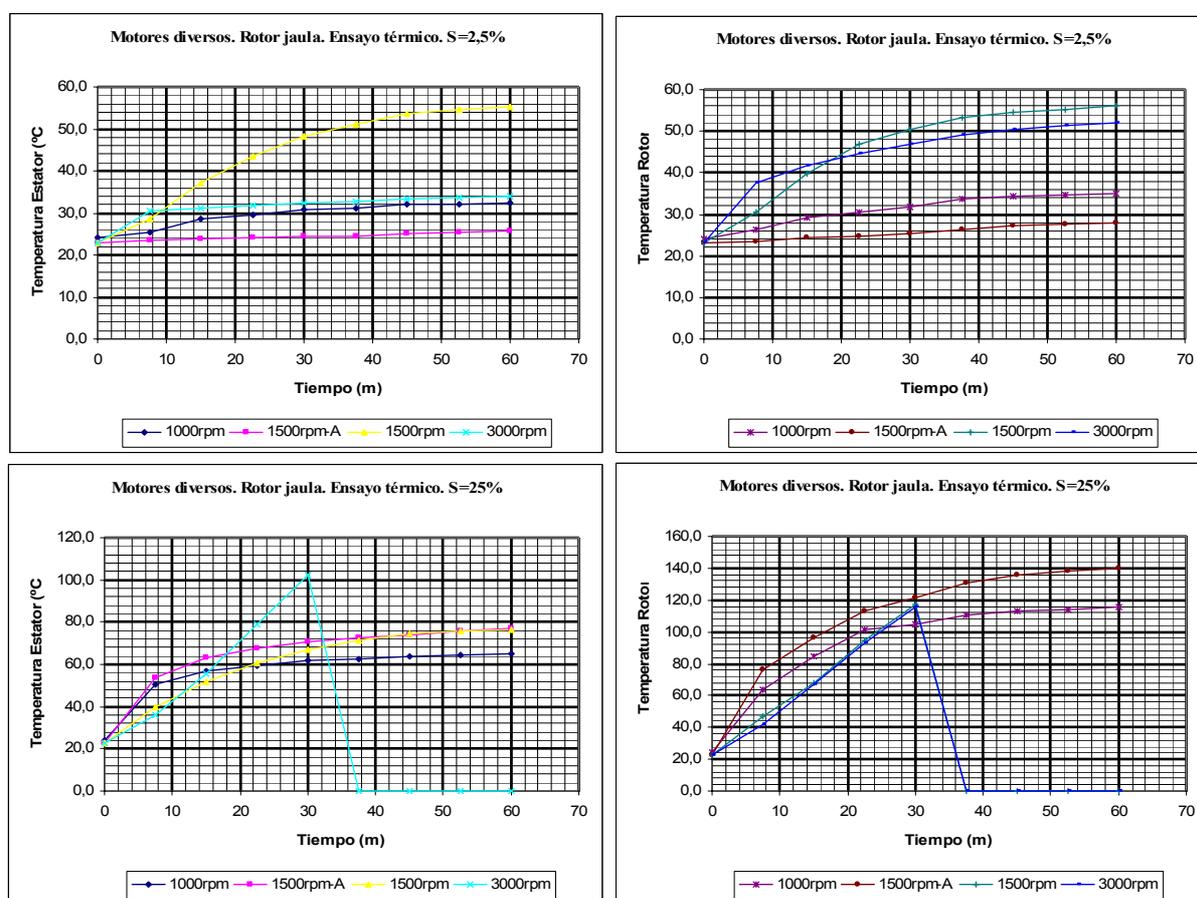


Figura 9.154. Temperatura del estator y rotor del motor de jaula para diversos deslizamientos y regímenes.

Para comprender estos resultados debe tenerse presente que a mayor velocidad más ventilación forzada presentara el motor, así por lógica los motores con menor velocidad deberían presentar temperaturas mayores pero esto no siempre es así ya que el factor dominante no es la velocidad sino la intensidad. Así por ejemplo, el motor de chapas presenta intensidades mayores a 1500 rpm (3.393 A) que no a 1000 rpm (2.719 A), pero también presenta velocidades mayores (500 rpm de más) siendo por tanto la ventilación más efectiva. Si comparamos valores se aprecia que el incremento de la intensidad entre los dos motores representa un 25% 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.

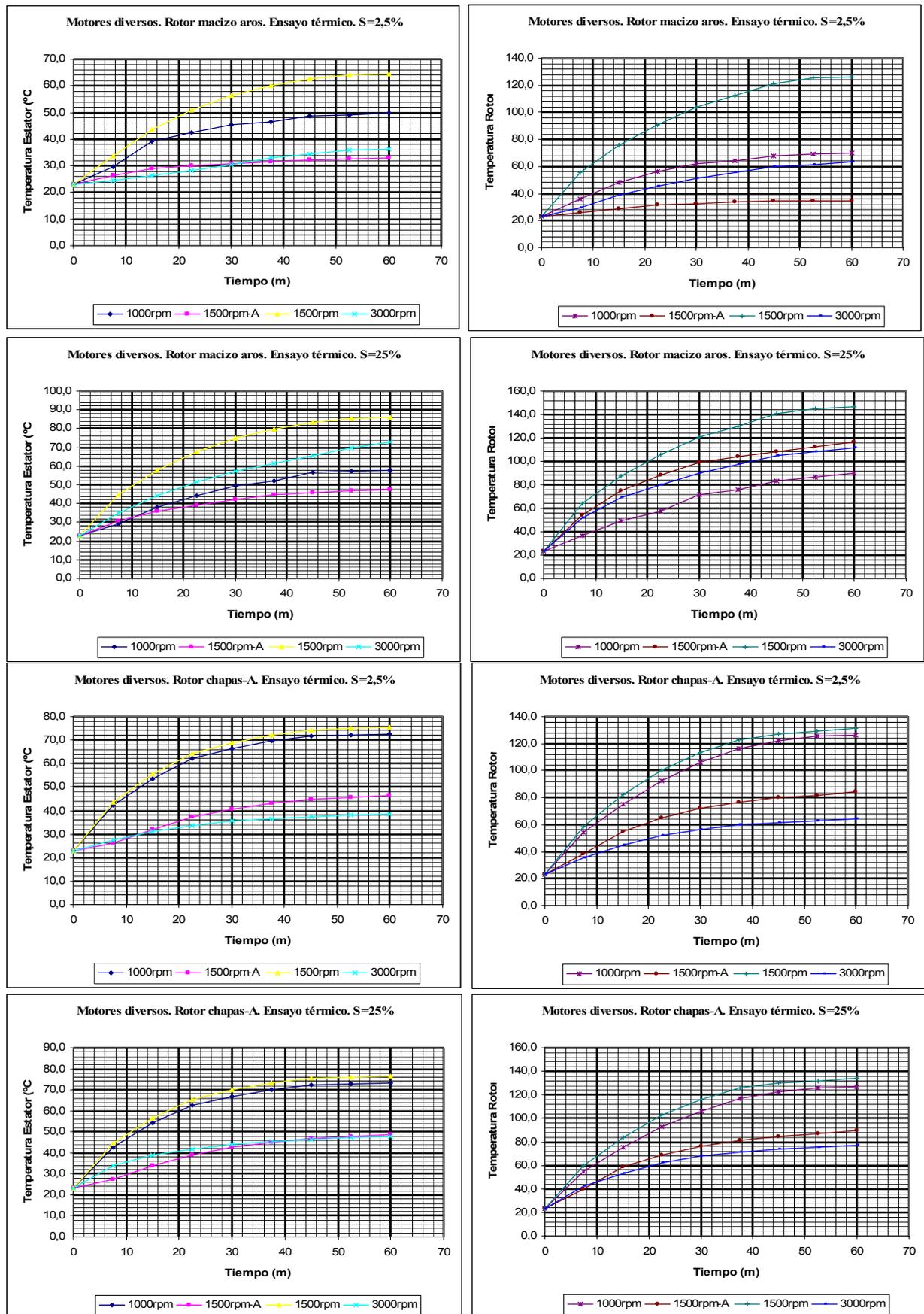


Figura 9.155. Temperatura del estator y rotor del motor macizo con aros y para el motor de chapas tipo A, para diversos deslizamientos y regímenes.

Por último cabe destacar que la dispersión entre las temperaturas a diversos regímenes es mayor en el motor de jaula, seguido por el motor macizo con aros y por el motor de chapas que resulta ser el más homogéneo.

### 9.3.3.4 Resistencias y capacidades térmicas de los diversos motores

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. En cambio, la capacidad térmica ( $C_s$ ), es un parámetro que nos proporciona información sobre el calentamiento y almacenamiento del calor.

En la tabla IX.XXXXIII, puede apreciarse un resumen de los valores térmicos obtenidos con diversos motores a 3000 rpm y con eficiencia máxima, es decir, donde obtienen su rendimiento eléctrico máximo. Este rendimiento no lo obtienen todos los modelos a la misma velocidad, así los motores de chapas este valor se obtiene alrededor de deslizamientos del orden del 20 al 27%, en cambio con el motor de jaula este valor se obtiene con un deslizamiento alrededor de un 6%, y los motores macizos se acercan a los valores de los motores de chapas, concretamente un 15-20%.

DATOS GENERALES	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Jaula	M. Aros	Macizo	Hueco	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-D
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)	65	72,9	63,9	70,1	47,9	51,5	47,5
Tr (°C)	115	111,8	112,1	100,1	76,7	80,2	76,2
Tss=(Ts-Tamb) (°C)	42,5	50,4	41,4	47,6	25,4	29,0	25,0
Trss=(Tr-Tamb) (°C)	92,5	89,3	89,6	77,6	54,2	57,7	53,7
U (V)	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
I (A)	3,334	2,6	2,442	2,879	1,945	2,333	1,904
Pabs (W)	2004	1400	1234	684	1073,0	1062,0	1050,0
T (kg cm)	51,5	25,4	20,2	12,1	31,5	23,8	29,0
n (rpm)	2651	2228	2193	2227	2229	2228	2208
w (rad/s)	277,6	233,3	229,6	233,2	233,4	233,3	231,2
To (N·m)	5,05	2,49	1,98	1,19	3,09	2,33	2,84
Po	1401,1	580,8	454,6	276,5	720,6	544,2	657,1
Pt=Pabs-Po	602,9	819,2	779,4	407,5	352,4	517,8	392,9
$\eta=(Po/Pabs) \cdot 100$	69,9	41,5	36,8	40,4	67,2	51,2	62,6
cos $\varphi$	0,91	0,82	0,77	0,36	0,84	0,69	0,84
To/I (N·m/A)	1,51	0,96	0,81	0,41	1,59	1,00	1,49
To/Pabs (N·m/W)	0,0025	0,0018	0,0016	0,0017	0,0029	0,0022	0,0027

ESTATOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Jaula	M. Aros	Macizo	Hueco	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-D
$R_s=(Tss/Pt)$ (°C/W)	0,0705	0,0615	0,0531	0,1168	0,0721	0,0560	0,0636
?s (m)	14	26,0	8,5	6,0	14,5	14,0	15,0
?s (s)	840	1560	510	360	870	840	900
$C_s=(\tau s/R_s)$	11916	15230	9601	3082	12071	14999	14143

ROTOR	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor	Rotor
Parámetros	Jaula	M. Aros	Macizo	Hueco	Tipo-A	Tipo-B	Tipo-D
$R_r=(Trss/Pt)$ (°C/W)	0,1534	0,1090	0,1150	0,1905	0,1538	0,1114	0,1367
$R_{rs}=R_r-R_s$ (°C/W)	0,0829	0,0475	0,0618	0,0736	0,0817	0,0554	0,0731
?r (m)	17,5	21,5	13,0	9,0	17,5	20,0	20,0
?r (s)	1050	1290	780	540	1050	1200	1200
$C_r=(\tau r/R_r)$	6843	8345	6785	2835	6827	10769	8779

Tabla IX.XXXXIII. Valores térmicos con régimen de eficiencia máxima para los diversos motores.

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 el par, la intensidad, la potencia, el rendimiento, etc. están representadas en esta tabla. La segunda subtabla esta encaminada a hallar los parámetros térmicos del estator: resistencia y capacidad térmica y constantes de tiempo térmicas. Finalmente, la tercera subtabla busca los mismos parámetros térmicos pero en esta ocasión del rotor.

Si nos referimos al estator vemos que la resistencia térmica presenta pocas variaciones entre los motores analizados. El mínimo valor lo presenta el motor macizo y macizo con aros, mientras que los valores más elevados corresponden al motor de chapas tipo *A*, y al motor de jaula de ardilla. En todo caso las diferencias extremas no pasan del 30%, y entre el motor de chapas y el motor de jaula se reducen al 8%.

En cuanto a la capacidad térmica del estator, y exceptuando el motor hueco, en los demás casos los valores se mantienen alrededor de los 12000 a 14000 SW/°C, considerándose perfectamente asumibles. Las diferencias son incluso menores cuando comparamos el motor de chapas con el de jaula, coincidiendo prácticamente los valores

Si ahora analizamos la respuesta del rotor podemos apreciar que la resistencia térmica del rotor al ambiente es del mismo valor (0.154 °C/W) en los motores de jaula y chapas tipo *A*, variando ligeramente en el rotor macizo con aros (0.115 °C/W). Por su parte la resistencia térmica entre el rotor y el estator sigue la misma tónica, prácticamente igual en los motores de jaula y chapas-*A* (0.082 °C/W) y ligeramente inferior en el motor macizo con aros (0.0618 °C/W).

En cuanto a la capacidad térmica del rotor los valores de los tres motores analizados no sufren variaciones hallándose alrededor de los 6800 SW/°C.

En definitiva, la influencia de los rotores se deja sentir en el estator (recordar que es único para todas las pruebas), situándose el motor de chapas con unos valores muy próximos a los del motor de jaula, siendo el comportamiento del motor macizo con aros el que más difiere de los anteriores aunque no de forma ostensible. No existen pues problemas térmicos de los motores de chapas en este régimen de funcionamiento ni en cuanto a parámetros del rotor ni en cuanto a parámetros del estator.

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

Si nos referimos al estator vemos que la resistencia térmica presenta pocas variaciones entre los motores analizados. El valor mínimo lo presenta el motor de jaula, seguido del motor macizo con aros, y del motor de chapas tipo *A*, el cual presenta un aumento del 25% sobre el valor del motor de jaula.

En cuanto a la capacidad térmica del estator existen marcadas diferencias entre los motores, así el motor de chapas tipo *A*, presenta 12686 S·W/°C mientras que el motor con rotor de jaula reduce este valor hasta los 6619 S·W/°C, siendo el motor con un valor más elevado el macizo con aros con 13269 S·W/°C.

Si analizamos la respuesta del rotor podemos apreciar que la resistencia térmica del rotor al ambiente es inferior en el motor de jaula (0.1622 °C/W) que en el motor de chapas (0.2232 °C/W), siendo esta parecida al motor macizo con aros (0.2341 °C/W). Por su parte la resistencia térmica entre el rotor y el estator sigue la misma tónica, siendo su valor para el motor de jaula de 0.2341 °C/W, y para el de chapas *A* de 0.1381 °C/W, mostrándose el motor macizo con aros con un valor algo superior (0.1557 °C/W).

En cuanto a la capacidad térmica del rotor los valores de los tres motores analizados están más igualados oscilando alrededor de los 5000 S·W/°C para los motores de chapas tipo A y jaula, y siendo ligeramente superiores en el motor macizo con aros (6665 S·W/°C)

En este caso, con deslizamientos próximos al punto nominal de funcionamiento de los motores, los resultados del motor de jaula son mejores que los de los modelos macizo con aros y chapas tipo A. En cambio con los deslizamientos de rendimiento máximo los valores térmicos de los modelos de jaula y chapas tipo A, prácticamente no presentan variaciones, destacando el motor macizo por un comportamiento más equilibrado.

<b>DATOS GENERALES</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>
<b>Parámetros</b>	<b>Jaula</b>	<b>M. Aros</b>	<b>Macizo</b>	<b>Hueco</b>	<b>Tipo-A</b>	<b>Tipo-B</b>	<b>Tipo-D</b>
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	23,0	23,0	23,0
Ts (°C)	34,0	36,3	37,5	46,9	38,6	42,9	38,5
Tr (°C)	51,9	63,7	72,8	75,1	63,9	70,5	63,9
Tss=(Ts-Tamb) (°C)	11,5	13,8	15,0	24,4	15,6	19,9	15,5
Trss=(Tr-Tamb) (°C)	29,4	41,2	50,3	52,6	40,9	47,5	40,9
U (V)	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
I (A)	1,227	1,018	1,061	1,260	1,276	1,537	1,275
Pabs (W)	641	265	244	133	302,0	290,0	307,0
T (kg cm)	16,0	3,0	3,0	1,6	4,0	3,0	3,7
n (rpm)	2800	2890	2887	2933	2893	2882	2887
w (rad/s)	293,2	302,6	302,3	307,1	302,9	301,7	302,3
To (N·m)	1,57	0,29	0,29	0,16	0,39	0,29	0,36
Po	459,8	89,0	88,9	48,2	118,8	88,7	109,6
Pt=Pabs-Po	181,2	176,0	155,1	84,8	183,2	201,3	197,4
$\eta=(Po/Pabs)\cdot 100$	71,7	33,6	36,4	36,2	39,3	30,6	35,7
cos $\varphi$	0,79	0,40	0,35	0,16	0,36	0,29	0,37
To/I (N·m/A)	1,28	0,29	0,28	0,12	0,31	0,19	0,28
To/Pabs (N·m/W)	0,0024	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0010	0,0012

<b>ESTATOR</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>
<b>Parámetros</b>	<b>Jaula</b>	<b>M. Aros</b>	<b>Macizo</b>	<b>Hueco</b>	<b>Tipo-A</b>	<b>Tipo-B</b>	<b>Tipo-D</b>
Rs=(Tss/Pt) (°C/W)	0,0635	0,0784	0,0967	0,2876	0,0851	0,0989	0,0785
?s (m)	7	33	14,5	8,5	18,0	16,0	22,6
?s (s)	420	1980	870	510	1080	960	1356
Cs=( $\tau$ s/Rs)	6619	13269	8997	1773	12686	9709	17267

<b>ROTOR</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>	<b>Rotor</b>
<b>Parámetros</b>	<b>Jaula</b>	<b>M. Aros</b>	<b>Macizo</b>	<b>Hueco</b>	<b>Tipo-A</b>	<b>Tipo-B</b>	<b>Tipo-D</b>
Rr=(Trss/Pt) (°C/W)	0,1622	0,2341	0,3243	0,6200	0,2232	0,2360	0,2072
Rrs=Rr-Rs (°C/W)	0,0988	0,1557	0,2276	0,3324	0,1381	0,1371	0,1287
?r (m)	13	26	17	10	19,0	18,0	21,5
?r (s)	780	1560	1020	600	1140	1080	1290
Cr=( $\tau$ r/Rs)	4808	6665	3145	968	5107	4576	6225

Tabla IX.XXXXIV. Valores térmicos con régimen nominal para los diversos motores.

En definitiva el motor con rotor de chapas tipo A, objeto de nuestro análisis, térmicamente es uno de los modelos menos favorables respecto a sus compañeros de chapas, pero cuando se compara con los motores macizos o con los de jaula, se comporta de forma más homogénea no destacando en estos aspectos térmicos y siendo las diferencias entre modelos poco significativas, no desentonando en demasía para desdeñarlo por razones térmicas.

No obstante, como mayor es el deslizamiento mejor respuesta ofrece el motor de chapas, mientras que con deslizamientos bajos, el motor de jaula responde francamente mejor, e incluso en algunos parámetros el motor macizo con aros pasa factura al motor de chapas tipo A.

### 9.3.4 ANÁLISIS MECÁNICO DE LOS MOTORES DE JAULA, MACIZO CON AROS Y CHAPAS TIPO A

Ya vimos en la comparación mecánica de los rotores de chapas que éstos no presentaban problemas en cuanto a funcionamientos prolongados, ni tampoco en cuanto a estabilidad de las chapas (uno de los puntos que despertaba mayor preocupación a priori), pero comparándolos con los motores de jaula o con sus homólogos macizos con aros, ¿cómo quedarían estos motores?

También en esta ocasión en primer lugar se analizarán las pérdidas totales mecánicas que engloban las pérdidas debidas al rozamiento de los cojinetes y las pérdidas debidas tanto al rozamiento del aire con el ventilador como al rozamiento del aire con el propio rotor cuando éste se encuentra en movimiento. Seguidamente, se calcularán 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 compararán los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica en largos periodos de funcionamiento continuo.

Recordar que las pruebas se han efectuado con el mismo estator (3000 rpm), al ser todos los estatores 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 modelos.

#### 9.3.4.1 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 las pérdidas por 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 en el ventilador y en el mismo rotor cuando éste se encuentra en funcionamiento. El banco de pruebas nos determina estas pérdidas simplemente 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.

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 para obtener así las pérdidas mecánicas debidas exclusivamente al rotor (chapas, eje y cojinetes propios).

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.XXXXV. Valores de las pérdidas mecánicas en el cojinete de la bancada.

VENTILADOR MOTOR				
Velocidad teórica (rpm)	Velocidad prueba (rpm)	Par (N·m)	Potencia Pérdidas (W)	Promedio Pérdidas ( $P_l$ ) (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.XXXXVI 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 analizados en este apartado, considerándose sus tres regímenes de funcionamiento (1000, 1500, y 3000 rpm). Es interesante contrastar el incremento que sufren las pérdidas totales al aumentar la velocidad de giro.

ROTOR JAULA DE ARDILLA				
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	0.300	32	10
	1009	0.302	32	
	1010	0.301	32	
1500	1492	0.351	55	15
	1491	0.352	55	
	1492	0.348	54	
3000	2994	0.419	132	32
	2992	0.406	127	
	2993	0.414	130	

Tabla IX.XXXXVII. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de jaula de ardilla.

ROTOR MACIZO CON AROS				
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	0.439	46	24
	1009	0.439	45	
	1010	0.429	43	
1500	1495	0.463	73	32
	1495	0.454	71	
	1496	0.449	70	
3000	2993	0.498	158	60
	2992	0.519	163	
	2993	0.511	160	

Tabla IX.XXXXVIII. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor macizo con aros.

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.XXXXIX. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes del rotor de chapas tipo A.

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

Tipo Motor	Pérdidas a 1000 rpm (W)	Pérdidas a 1500 rpm (W)	Pérdidas a 3000 rpm (W)
Rotor jaula	10	15	35
Macizo con aros	24	32	60
Chapas tipo A.	23	55	112

Tabla IX.L. Valores de las pérdidas mecánicas de los cojinetes de los rotores analizados.

De la tabla se desprende que las pérdidas por estos conceptos son más elevadas en el motor de chapas que en sus homólogos macizo con aros o jaula de ardilla. No obstante, en cada régimen la progresión es distinta, así, y tomando como base el motor con rotor de jaula, vemos que el rotor de chapas a 1000 rpm duplica el valor de las pérdidas, a 1500 rpm multiplica por cuatro las mismas, y a 3000 rpm triplica el valor de estas pérdidas. Para los mismos regímenes pero ahora comparando el motor macizo con el de jaula, vemos que las pérdidas del motor macizo se duplican en todos los regímenes.

Las pérdidas en los cojinetes son en todo caso asumibles ya que no representan un aumento sustancial de la potencia absorbida, máxime si consideramos, que el motor de chapas tipo *A*, era uno de los que presentaban pérdidas más elevadas. En efecto, si en esta comparación se hubiera tenido en cuenta el modelo de chapas *E*, por ejemplo, sus pérdidas serían del mismo orden que las del motor macizo con aros. Esto nos hace pensar más en problemas de elección y colocación de los cojinetes que no en problemas específicos de los rotores de chapas.

### 9.3.4.2 Momento de inercia de los rotores estudiados

Vamos a analizar en segundo lugar como se comportan los motores en cuanto a su momento de inercia. En este caso sólo se presentan las gráficas obtenidas para los tres motores analizados, ya que el resto de las gráficas están expuestas en los anexos de esta obra.

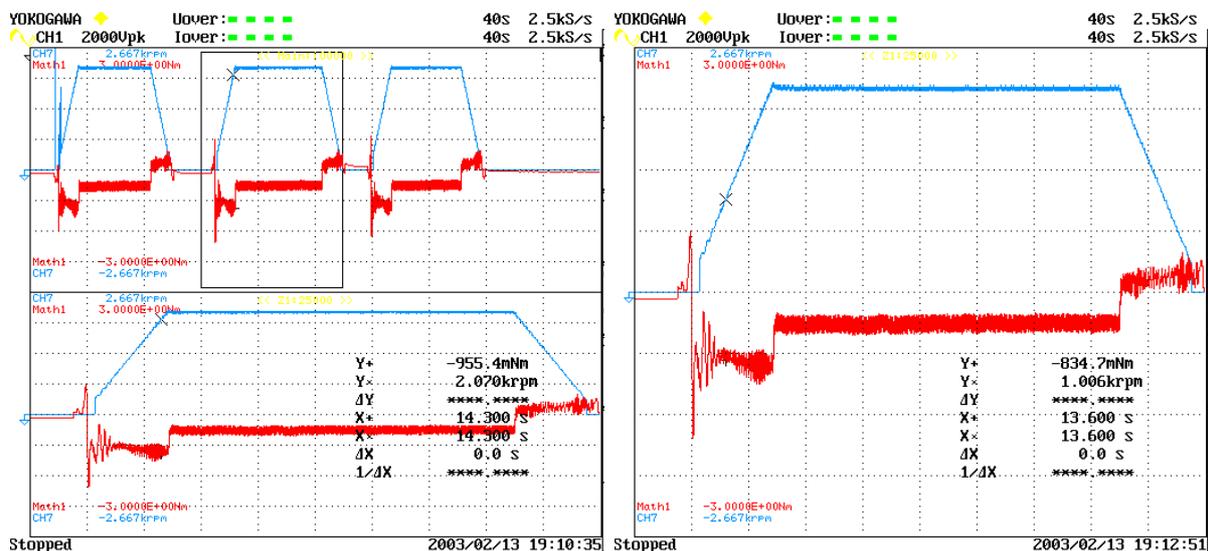


Figura 9.156 Evolución de la velocidad y del par en el rotor de jaula de ardilla.

Mientras que el cálculo teórico de los momentos de inercia no resulta difícil para el motor macizo con aros, y puede llegar a calcularse de forma bastante aproximada para el motor de jaula, el cálculo de los momentos de inercia para los motores de chapas 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 estos rotores. La forma en que se realizaron los ensayos ya fue comentada en el análisis mecánico realizado para los motores de chapas

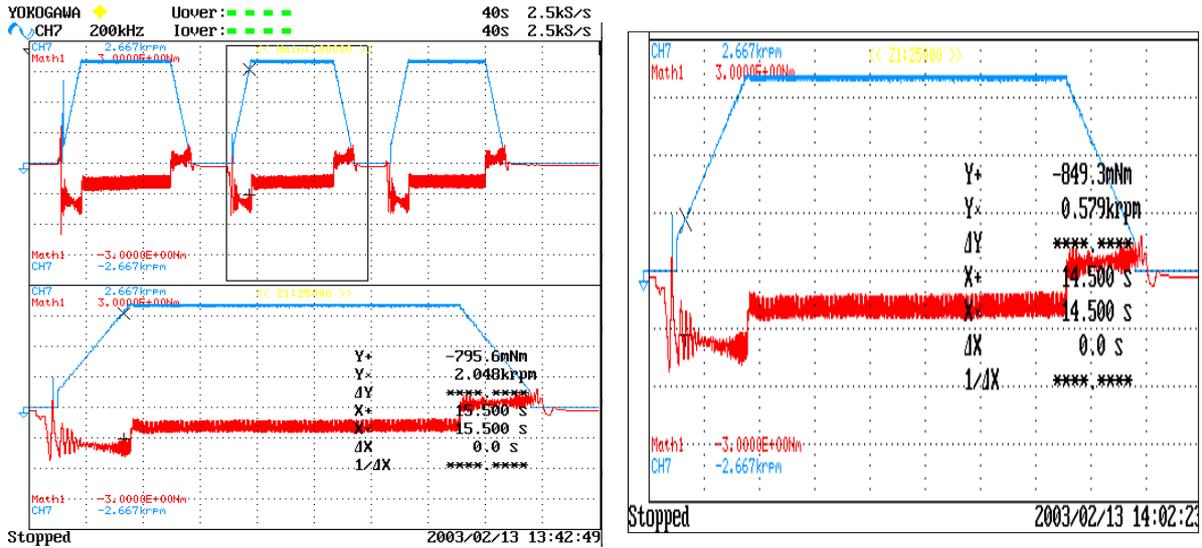


Figura 9.157. Evolución de la velocidad y del par en el rotor macizo con aros.

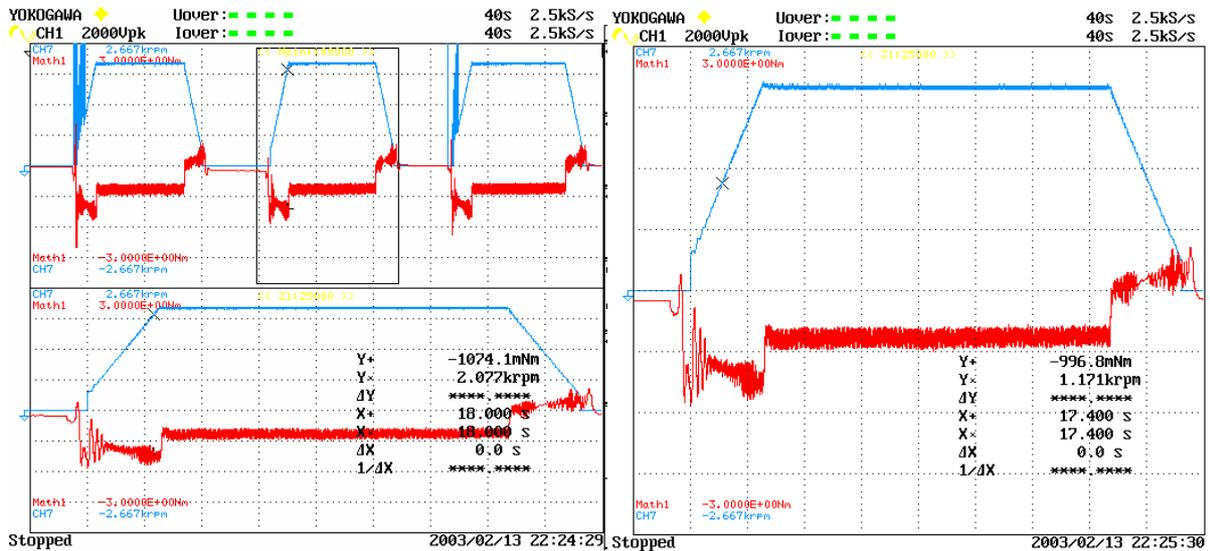


Figura 9.177. Evolución de la velocidad y del par en el rotor de chapas tipo A.

De forma resumida, las siguientes tablas muestran los parámetros de cálculo que permiten hallar el momento de inercia de algunos de los motores ensayados.

Tipo Rotor	$n_1$ (rpm)	$n_2$ (rpm)	$\Delta n$ (rpm)	$T_1$ (s)	$t_2$ (s)	$\Delta t$ (s)	Acelera. $\alpha = \Delta n / \Delta t$ ( $ev/s^2$ )	Acelera. $\alpha$ ( $rad/s^2$ )
Jaula	2070	565	1505	14.3	13.3	1.0	1505	157.6
Macizo	2087	584	1503	30.8	29.8	1.0	1503	157.4
Macizo aros	2048	579	1469	15.5	14.5	1.0	1469	153.8
Hueco	2036	527	1509	16.0	15.0	1.0	1509	158.0
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 D	2087	571	1516	17.5	16.5	1.0	1516	158.8

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

Tipo Rotor	Acelera. $\alpha$ (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 <sup>2</sup> )	Inercia (kg/m <sup>2</sup> ) $J = T / \alpha$
Jaula	157.6	0.834	0.387	0.4458	0.000113	$2.829 \cdot 10^{-3}$
Macizo	157.4	0.903	0.419	0.4825	0.000113	$3.066 \cdot 10^{-3}$
Macizo aros	153.8	0.984	0.468	0.5141	0.000113	$3.343 \cdot 10^{-3}$
Hueco	158.0	1.742	1.677	0.0638	0.000113	$0.419 \cdot 10^{-3}$
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 D	158.8	0.982	0.530	0.450	0.000113	$2.834 \cdot 10^{-3}$

Tabla IX.LII. Cálculo de la inercia de los diferentes rotores ensayados.

Si comparamos los momentos de inercia de los diversos rotores se aprecia que los rotores de chapas están en la línea del rotor de jaula de ardilla con inercias de valores parecidos ( $2.829 \cdot 10^{-3}$  kg/m<sup>2</sup> en el de jaula frente a los  $2.714 \cdot 10^{-3}$  kg/m<sup>2</sup> del rotor de chapas tipo A). El rotor macizo con aros presenta un momento de inercia algo más elevado ( $3.343 \cdot 10^{-3}$  kg/m<sup>2</sup>) siendo lógico este valor dada su masa y estructura.

En resumen, los momentos de inercia de los rotores de chapas no destacan de los rotores de jaula convencionales, por lo que no introducen problemas por este aspecto y pueden ser considerados mecánicamente válidos.

### 9.3.4.3 Resistencia mecánica de los rotores analizados en largos periodos de funcionamiento

Finalmente, cabe comparar como se comportan los motores de chapas en largos periodos de funcionamiento frente a los motores convencionales como el de jaula de ardilla o macizo con aros.

Las pruebas se han realizado bajo unas condiciones de trabajo estándar (sus condiciones nominales) para el régimen de giro más rápido y por tanto más proclive a sufrir deformaciones (3000 rpm). Realizándose todas las experiencias en el mismo banco de pruebas ya utilizado en otros análisis.

Con cada motor se efectuaron dos pruebas independientes haciéndolos funcionar durante cuatro horas ininterrumpidas entre las cuales se dejaron descansar el tiempo suficiente para que los motores volvieran a sus condiciones de funcionamiento inicial.

Como muestra de las tablas obtenidas, las cuales pueden consultarse en los anexos, se adjunta las tablas de funcionamiento de los motores equipados con rotores de jaula, macizo con aros y con rotor de chapas tipo A.

Motor 3000rpm. Rotor jaula. Ensayo mecánico. S=2,5%										
Tiempo (min)	U (V)	T ambi. (°C)	T. Estat (°C)	T. Rotor (°C)	Cos $\varphi$	P (W)	In (A)	n (rpm)	T (kg cm)	T (N·m)
30	380	20,0	20,0	20,0	0,79	600	1,140	2940	16,0	1,57
60	380	20,0	34,7	50,0	0,80	638	1,236	2885	16,0	1,57
90	380	20,0	34,3	51,2	0,79	639	1,246	2860	15,9	1,56
120	380	20,0	35,0	52,3	0,78	650	1,238	2850	15,8	1,55
150	380	20,0	35,6	54,0	0,79	655	1,249	2850	15,7	1,54
180	380	20,0	36,1	54,5	0,80	662	1,244	2850	15,9	1,56
210	380	20,0	36,6	55,3	0,79	664	1,257	2846	15,8	1,55
240	380	20,0	37,0	56,0	0,80	675	1,267	2840	16,0	1,57

Tabla IX.LIII. Prueba resistencia mecánica del motor con rotor de jaula a 3000 rpm con deslizamiento del 2.5%.

Motor 3000rpm. Rotor macizo con aros. Ensayo mecánico. S=2,5%										
Tiempo (min)	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	21,5	23,0	23,0	0,38	260	1,026	2932	3,0	0,29
60'	380	21,5	34,3	63,0	0,40	276	1,053	2823	3,1	0,30
90'	380	21,5	37,0	64,0	0,41	267	1,040	2803	3,0	0,29
120'	380	21,5	39,4	65,0	0,42	271	1,033	2790	2,9	0,28
150'	380	21,5	42,5	65,5	0,41	277	1,045	2783	3,0	0,29
180'	380	21,5	46,0	66,0	0,43	280	1,045	2772	3,0	0,29
210'	380	21,5	48,3	67,0	0,42	286	1,049	2770	2,9	0,28
240'	380	21,5	50,1	68,0	0,42	290	1,053	2765	3,1	0,30

Tabla IX.LIV. Prueba resistencia mecánica del motor con rotor macizo con aros a 3000 rpm con deslizamiento del 2.5%.

Motor 3000rpm. Rotor macizo sin aros. Ensayo mecánico. S=2,5										
Tiempo (min)	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	22,5	23,0	23,0	0,33	220	0,999	2931	2,7	0,26
60'	380	22,5	37,8	72,0	0,34	239	1,099	2852	2,6	0,25
90'	380	22,5	42,2	73,5	0,34	246	1,099	2832	2,6	0,25
120'	380	22,5	45,1	74,6	0,35	256	1,116	2812	2,5	0,25
150'	380	22,5	46,6	75,2	0,36	261	1,122	2800	2,8	0,27
180'	380	22,5	47,3	76,0	0,34	263	1,178	2791	2,8	0,27
210'	380	22,5	48,0	77,0	0,35	271	1,211	2791	2,8	0,27
240'	380	22,5	48,7	77,5	0,34	272	1,234	2781	2,9	0,28

Tabla IX.LV. Prueba resistencia mecánica del motor con rotor de chapas tipo A, con 3000 rpm con deslizamiento del 2.5%.

No están afectados la mayor parte de parámetros eléctricos y térmicos al cabo de las cuatro horas de funcionamiento en los modelos de chapas con lo que se concluye que no deben presentar problemas de rigidez mecánica ni de deformación de las chapas en los largos periodos de funcionamiento, 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
Jaula	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Macizo	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Macizo aros	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Hueco	Algún roce en la parte exterior del vaso de cobre. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas A	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas B	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.
Rotor chapas D	No presenta signos de rozamiento. Cilindridad perfecta.

Tabla IX.LVI. Estado final mecánico de la superficie del rotor y su cilindridad en diversos motores analizados al cabo de las cuatro horas de funcionamiento.

Con objeto de visualizar los resultados eléctricos obtenidos y para su más fácil comparación entre modelos, aparte de comprobar la evolución de las magnitudes analizadas de forma más cómoda, se han graficado estos resultados, los cuales pueden hallarse en los anexos, dándose en este apartado una muestra de ellos.

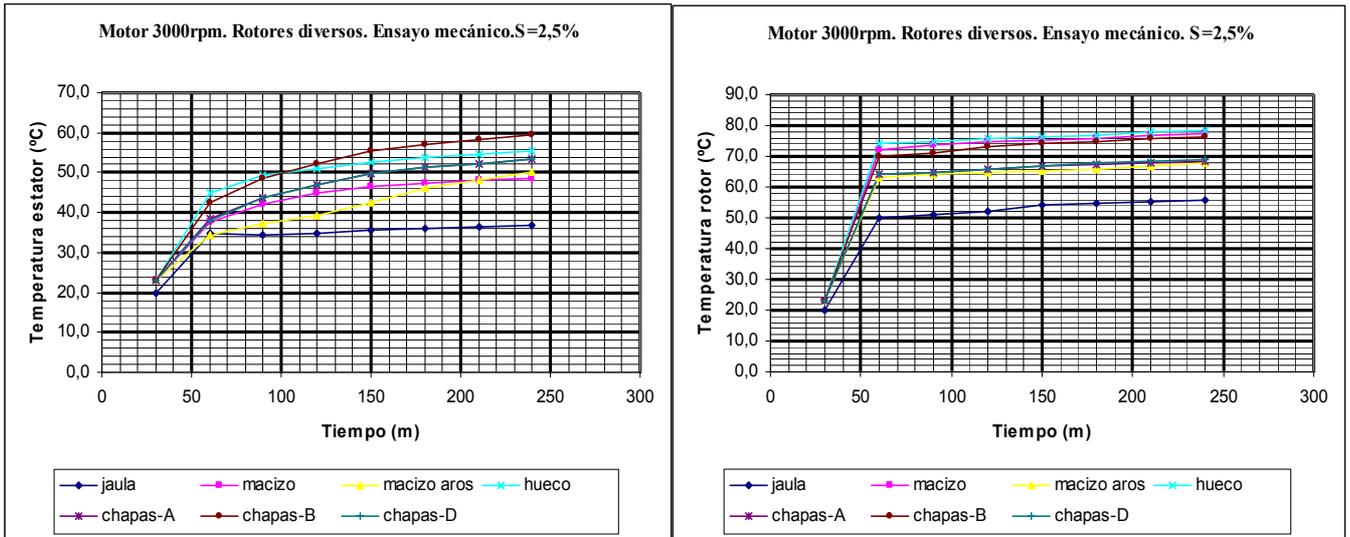


Figura 9.158. Diversos rotores a 3000 rpm. Temperatura del estator y rotor versus tiempo.

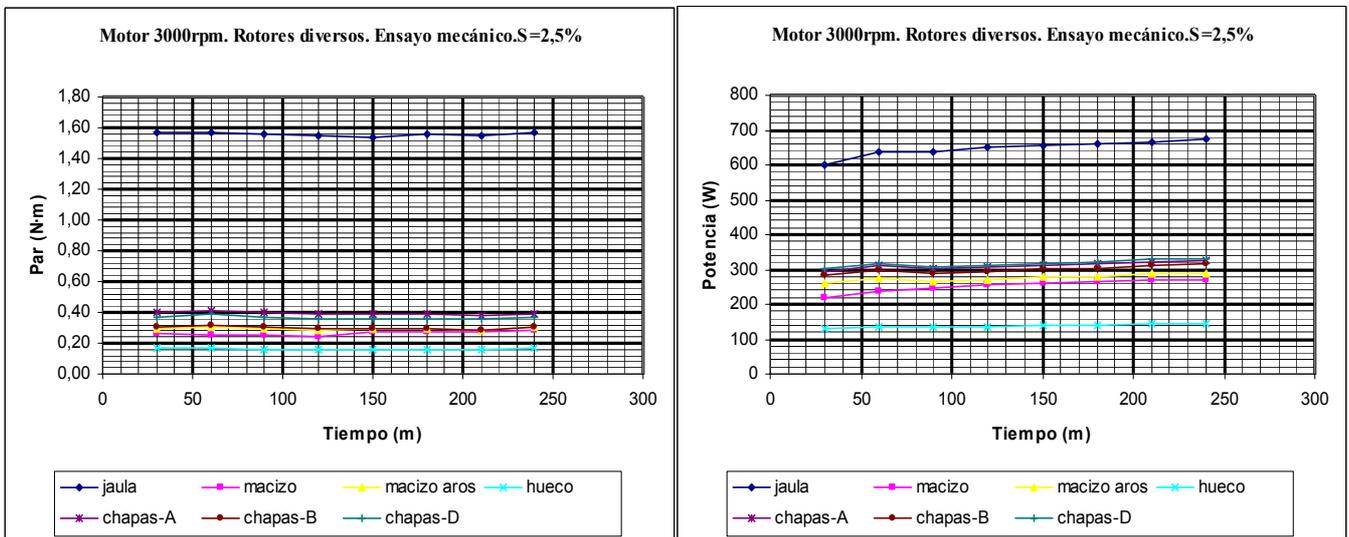


Figura 9.159. Diversos rotores a 3000 rpm. Par y potencia versus tiempo.

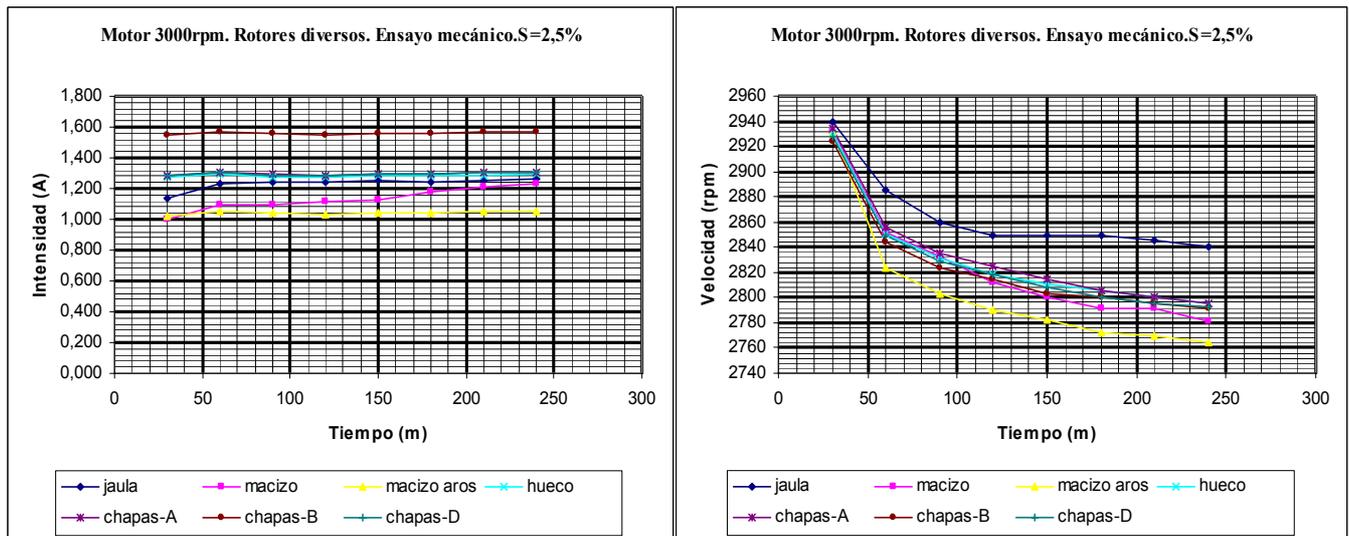


Figura 9.160. Diversos rotores a 3000 rpm. Intensidad y velocidad versus tiempo.