

TABLAS, FÓRMULAS Y GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

TABLAS, FÓRMULAS Y GRÁFICAS PARA EL CÁLCULO DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS

Lista de símbolos

a'	Número de ramas en paralelo de una fase del estator
\mathcal{A}_r	Capa de corriente de ranura. Es la densidad lineal de corriente media en un paso de ranura del estator cuando la ranura que abarca tiene Z_{n1} conductores recorridos por la corriente I_{r1N} .
b_δ	Ancho de la abertura de una ranura
B_M	Inducción máxima en el entrehierro
B_{t1M}	Inducción máxima en los dientes del estator
B_{t2M}	Inducción máxima en los dientes del rotor
B_{y1M}	Inducción máxima en el yugo del estator
B_{y2M}	Inducción máxima en el yugo del rotor
B_{ymed}	Inducción media en un yugo de la línea de campo que cruza el entrehierro a 30° del centro de un polo
C_0	Coeficiente de utilización
$\cos \varphi_{1N}$	Factor de potencia asignado
d_1	Diámetro interior del estator
d_m	Diámetro medio en los dientes. Es el que corresponde a la circunferencia que pasa a mitad de altura de los dientes. En el estator los dientes y ranuras están por encima del entrehierro y el diámetro medio del estator es mayor que su diámetro en el entrehierro (el diámetro interior del estator). En el rotor sucede lo contrario, pues los dientes y ranuras están por debajo del entrehierro y el diámetro medio del rotor es menor que su diámetro en el entrehierro (el diámetro exterior del rotor)
d_{ymed}	Diámetro a media altura de un yugo (sin incluir la altura de los dientes)
E_1	F.e.m. inducida en una fase del estator
E_{1N}	F.e.m. inducida en una fase del estator en condiciones asignadas
f_1	Frecuencia de las corrientes del estator
$F_{y,30^\circ}$	Tensión magnética en un yugo de la línea de campo que cruza el entrehierro a 30° del centro de un polo
H_{ymed}	Intensidad magnetizante media en un yugo de la línea de campo que cruza el entrehierro a 30° del centro de un polo
I_{1N}	Intensidad asignada en una fase del estator
I_{r1N}	Valor eficaz de la corriente de una rama en paralelo de una fase del devanado del estator cuando por la fase circula la corriente asignada ($I_{r1N} = \frac{I_{1N}}{a'}$)
J	Densidad de corriente por unidad de superficie en un conductor
k_{Fe}	Factor de empilado
K_1	Número de ranuras del estator
K_E	Relación entre E_{1N} y V_{1N} ($K_E = \frac{E_{1N}}{V_{1N}}$)
l_b	Longitud media de una bobina de un devanado
l_{cb}	Longitud media de una cabeza de bobina de un devanado
l_g	Longitud axial geométrica del entrehierro

l_v	Longitud común de los canales del estator y del rotor que están enfrentados
l_{v1}	Longitud de un canal radial de ventilación del estator
l_{v2}	Longitud de un canal radial de ventilación del rotor
$l_{y,30^\circ}$	Longitud en un yugo de la línea de campo que cruza el entrehierro a 30° del centro de un polo
l_δ	Longitud axial del entrehierro para el campo magnético principal
M_a	Par aparente interno ($M_a = \frac{S_\delta}{\Omega_1}$)
n_1	Velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto
n_{v1}	Número de canales radiales de ventilación en el estator
$n_{v1,2}$	Número de canales radiales del estator enfrentados a otros tantos canales del rotor
n_{v2}	Número de canales radiales de ventilación en el rotor
N_1	Número de espiras de una rama en paralelo de una fase del estator
p	Número de pares de polos de la máquina
P_m	Pérdidas mecánicas
P_{1N}	Potencia activa absorbida en condiciones asignadas
P_{LLN}	Pérdidas adicionales en condiciones asignadas
P_{1N}	Potencia activa absorbida en condiciones asignadas
S_δ	Potencia aparente del entrehierro ($S_\delta = 3 E_{1N} I_{1N}$)
t_{p1}	Paso polar medido en la circunferencia interior del estator ($t_{p1} = \frac{\pi d_1}{2p}$)
t_{pm}	Paso polar medido sobre la circunferencia de diámetro d_m ($t_{pm} = \frac{\pi d_m}{2p}$)
t_r	Paso de ranura del estator o del rotor, según sea el caso, medido como arco de su circunferencia en el entrehierro.
t_{r1}	Paso de ranura medido en la circunferencia interior del estator ($t_{r1} = \frac{\pi d_1}{K_1}$)
V_\square	Volumen prismático del inducido. Es el volumen del prisma de base cuadrada de lado d_1 y de altura l_δ ($V_\square = d_1^2 \cdot l_\delta$)
V_1	Tensión de una fase del estator
V_{1N}	Tensión de una fase del estator asignada
Z_{n1}	Número de conductores en una ranura del estator
Φ_M	Flujo por polo ($\Phi_M = \frac{l_\delta d_1}{p} B_M$)
Ω_1	Velocidad de sincronismo en rad/s
$\Omega_1/2\pi$	Velocidad de sincronismo en revoluciones por segundo ($\frac{\Omega_1}{2\pi} = \frac{n_1}{60} = \frac{f_1}{p}$)
δ_g	Entrehierro geométrico
η_N	Rendimiento asignado
ρ_{Fe}	Densidad de las chapas magnéticas (= 7600 Kg/m ³)
ξ_{b1}	Factor de bobinado del estator

Valores recomendados de los parámetros básicos

- **Inducción magnética:**

- Inducción máxima en el entrehierro, $B_M = 0,5 \div 0,95 \text{ T}$
- Inducción máxima en el yugo del estator, $B_{y1M} = 1,4 \div 1,7 \text{ T}$
- Inducción máxima en el yugo del rotor, $B_{y2M} = 1 \div 1,6 \text{ T}$
- Inducción máxima en los dientes del estator, $B_{t1M} = 1,4 \div 2,1 \text{ T}$
- Inducción máxima en los dientes del rotor, $B_{t2M} = 1,5 \div 2,2 \text{ T}$

- **Capa de corriente de ranura, \mathcal{A}_r :** ($\mathcal{A}_r = \frac{Z_{n1} I_{r1N}}{t_{r1}} = \frac{6 N_1 I_{1N}}{\pi d_1}$)

- Si $P \leq 10 \text{ kW}$: $\mathcal{A}_r = 10000 \div 17500 \text{ A/m}$
- Si $10 \text{ kW} \leq P < 100 \text{ kW}$: $\mathcal{A}_r = 20000 \div 30000 \text{ A/m}$
- Si $P > 100 \text{ kW}$: $\mathcal{A}_r = 30000 \div 40000 \text{ A/m}$

- **Densidad de corriente, J:**

- En el estator: $J_1 = 3 \div 8 \text{ A/mm}^2$
- En rotor de cobre: $J_2 = 3 \div 8 \text{ A/mm}^2$
- En rotor de aluminio: $J_2 = 3 \div 6,5 \text{ A/mm}^2$

Determinación del volumen prismático del inducido, V_\square

$$V_\square = d_1^2 \cdot l_\delta = \frac{S_\delta}{C_0 \left(\frac{\Omega_1}{2\pi} \right)} = \frac{M_a}{C_0}$$

$$C_0 = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \xi_{b1} B_M \mathcal{A}_r = 6,98 \xi_{b1} B_M \mathcal{A}_r$$

$$S_\delta = 3 E_{1N} I_{1N} = \frac{K_E P_N}{\eta_N \cos \varphi_{1N}}$$

$$M_a = \frac{S_\delta}{\Omega_1}$$

$$\left(\frac{\Omega_1}{2\pi} \right) = \text{Velocidad de sincronismo en revoluciones por segundo: } \frac{\Omega_1}{2\pi} = \frac{n_1}{60} = \frac{f_1}{p}$$

Estimación del parámetro K_E

$$K_E = \frac{E_{1N}}{V_{1N}} \approx 0,98 - 0,005p$$

Valor recomendado para el entrehierro geométrico, δ_g

$$\delta_g \approx 0,2 + 2 \sqrt{d_1 \cdot l_\delta}$$

(δ_g en mm; d_1 y l_δ en m)

Expresiones de la fuerza electromotriz (f.e.m.) del estator, E_1

$$E_1 = (\sqrt{2} \pi) N_1 \xi_{b1} f_1 \Phi_M = 4,44 N_1 \xi_{b1} f_1 \Phi_M$$

$$E_1 = (2\sqrt{2}) N_1 \xi_{b1} f_1 t_{p1} l_\delta B_M = 2,83 N_1 \xi_{b1} f_1 t_{p1} l_\delta B_M$$

$$E_1 = (\sqrt{2} \pi) N_1 \xi_{b1} \left(\frac{\Omega_1}{2 \pi} \right) (d_1 l_\delta) B_M = 4,44 N_1 \xi_{b1} \left(\frac{\Omega_1}{2 \pi} \right) (d_1 l_\delta) B_M$$

(Se pueden utilizar fórmulas análogas en el rotor)

Estimación de las pérdidas mecánicas, P_m y adicionales en carga asignada, P_{LLN}

- $p = 1$ par de polos:

$$P_m = \frac{3}{100} P_N$$

- $p = 2$ pares de polos:

$$P_m = \frac{1,2}{100} P_N$$

- $p = 3$ ó 4 pares de polos:

$$P_m = \frac{0,8}{100} P_N$$

- $P_N \leq 1$ kW:

$$P_{LLN} = P_{1N} \times 0,025$$

- 1 kW < $P_N < 10000$ kW:

$$P_{LLN} = P_{1N} \times (0,025 - 0,005 \log P_N)$$

(P_N en kW)

- $P_N \geq 10000$ kW:

$$P_{LLN} = P_{1N} \times 0,005$$

Longitud de la cabeza de bobina de un devanado, l_{cb}

Seguidamente se dan unas expresiones para el cálculo de la longitud l_{cb} según las diferentes formas que pueden tener las cabezas de bobina: de cadena, de corona o de horquilla. Los devanados de cadena son concéntricos. Los devanados de corona pueden ser imbricados u ondulados. Los devanados de horquilla son imbricados u ondulados y casi siempre de doble capa.

- Devanados de corona:

$$l_{cb} \approx \frac{4 d_m}{2 p} = 1,27 t_{pm}$$

- Devanados de cadena:

$$l_{cb} \approx \frac{4,5 d_m}{2 p} = 1,43 t_{pm}$$

- Devanados de horquilla y doble capa:

$$l_{cb} \approx \frac{5 d_m}{2 p} = 1,59 t_{pm}$$

Longitud media de una bobina de un devanado, l_b

- Devanados de corona:

$$l_b \approx 2(l_g + 1,27 t_{pm})$$

- Devanados de cadena:

$$l_b \approx 2(l_g + 1,43 t_{pm})$$

- Devanados de horquilla y doble capa:

$$l_b \approx 2(l_g + 1,59 t_{pm})$$

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN CIRCULAR

Tamaño nominal del conductor	Resistencia a 20°C (Ω/m)		Diámetro total para conductores esmaltados de Cu y Al (mm)			Diámetro total para conductores de cobre (mm) aislados con:						
						Papel		Algodón		Fibra de vidrio		
	IS: 4800(I)		IS: 4800 (II)		IS: 3454		IS: 450		IS: 4685			
Diáme- tro (mm)	Área (mm²)	Cu	Al	Fino	Medio	Grueso	Ordi- nario	Fino	Simple	Doble	Simple Capa	Doble capa
0,020	0,0003142	54,88000	-	0,025	0,027	-	-	-	-	-	-	
0,025	0,0004909	35,12000	-	0,031	0,034	-	-	-	-	-	-	
0,032	0,0008043	21,44000	-	0,040	0,043	-	-	-	-	-	-	
0,040	0,0012570	13,72000	-	0,050	0,054	-	-	-	-	-	-	
0,050	0,001964	8,781000	-	0,062	0,068	-	-	-	-	-	-	
0,063	0,003118	5,531000	-	0,078	0,085	-	-	-	-	-	-	
0,071	0,003960	4,355000	-	0,088	0,095	-	-	-	-	-	-	
0,080	0,005027	3,430000	-	0,098	0,105	0,116	-	-	-	-	-	
0,090	0,006363	2,710000	-	0,110	0,117	0,128	-	-	-	-	-	
0,100	0,007855	2,915000	-	0,121	0,129	0,141	-	-	-	-	-	
0,112	0,009853	1,750000	-	0,134	0,143	0,155	-	-	-	-	-	
0,125	0,012270	1,405000	-	0,149	0,159	0,171	-	-	-	-	-	
0,140	0,01540	1,120000	-	0,166	0,176	0,189	-	-	0,244	0,229	0,371	0,295
0,160	0,02011	0,857500	-	0,187	0,199	0,213	-	-	0,264	0,249	0,391	0,315
0,180	0,02545	0,677500	-	0,209	0,222	0,237	-	-	0,284	0,269	0,411	0,335
0,200	0,03142	0,548800	0,89130	0,230	0,245	0,261	-	-	0,304	0,289	0,431	0,355
0,224	0,03941	0,437500	0,71050	0,256	0,272	0,290	-	-	0,354	0,326	0,481	0,404
0,250	0,04909	0,351200	0,57040	0,284	0,301	0,320	0,500	0,425	0,380	0,352	0,507	0,430
0,280	0,06158	0,280000	0,45470	0,315	0,334	0,353	0,530	0,455	0,410	0,382	0,537	0,461
0,315	0,07794	0,221200	0,35930	0,352	0,371	0,391	0,565	0,490	0,445	0,417	0,572	0,496
0,355	0,09899	0,17420	0,28290	0,395	0,414	0,435	0,605	0,530	0,486	0,458	0,613	0,531
0,400	0,12570	0,13720	0,22280	0,442	0,462	0,483	0,650	0,575	0,531	0,503	0,658	0,582
0,450	0,15910	0,10840	0,17610	0,495	0,516	0,538	0,700	0,625	0,582	0,554	0,709	0,632
0,500	0,19640	0,08781	0,14260	0,548	0,569	0,591	0,750	0,675	0,632	0,604	0,759	0,683
0,560	0,24630	0,07000	0,11370	0,611	0,632	0,658	0,810	0,735	0,693	0,665	0,820	0,744
0,630	0,3118	0,05531	0,08982	0,684	0,706	0,730	0,880	0,805	0,763	0,736	0,891	0,814
0,710	0,3960	0,04355	0,07072	0,757	0,790	0,815	0,985	0,885	0,869	0,842	0,997	0,895
0,750	0,4418	0,03903	0,06338	0,809	0,832	0,858	1,025	0,925	0,910	0,882	1,037	0,935
0,800	0,5027	0,03430	0,05570	0,861	0,885	0,911	1,075	0,975	0,960	0,933	1,087	0,986
0,850	0,5675	0,03038	0,04934	0,918	0,937	0,964	1,125	1,025	1,011	0,983	1,138	1,036
0,900	0,6363	0,02710	0,04401	0,965	0,990	1,017	1,175	1,075	1,081	1,034	1,188	1,087
0,950	0,7089	0,02432	0,03950	1,017	1,041	1,070	1,225	1,125	1,112	1,084	1,239	1,137
1,000	0,7855	0,02195	0,03565	1,068	1,093	1,123	1,275	1,200	1,162	1,135	1,290	1,215
1,060	0,8826	0,01954	0,03173	1,130	1,155	1,184	1,335	1,260	1,225	1,195	1,350	1,275
1,120	0,9853	0,01750	0,02842	1,192	1,217	1,246	1,395	1,320	1,285	1,255	1,310	1,335
1,180	1,0937	0,015770	0,025600	1,254	1,279	1,308	1,455	1,380	1,345	1,315	1,470	1,395
1,250	1,2273	0,014050	0,022820	1,325	1,351	1,381	1,525	1,450	1,415	1,385	1,540	1,465
1,320	1,3687	0,012600	0,020460	1,397	1,423	1,453	1,595	1,520	1,485	1,460	1,615	1,535
1,400	1,5396	0,011200	0,018190	1,479	1,506	1,535	1,700	1,575	1,590	1,565	1,720	1,645
1,500	1,7674	0,009757	0,015840	1,581	1,608	1,638	1,800	1,675	1,695	1,665	1,820	1,745
1,600	2,0109	0,008575	0,013930	1,683	1,711	1,741	1,900	1,775	1,795	1,765	1,920	1,845
1,700	2,2701	0,007596	0,012340	1,785	1,813	1,844	2,000	1,875	1,895	1,865	2,020	1,945
1,800	2,5450	0,006775	0,011000	1,888	1,916	1,947	2,100	1,975	1,995	1,970	2,125	2,045
1,900	2,8357	0,006081	0,009876	1,990	2,018	2,049	2,200	2,075	2,095	2,070	2,225	2,150
2,000	3,1420	0,005488	0,008913	2,092	2,120	2,152	2,350	2,250	2,225	2,195	2,375	2,275
2,120	3,5304	0,004884	0,007932	2,214	2,243	2,275	2,470	2,370	2,345	2,315	2,495	2,395
2,240	3,9413	0,004375	0,007105	2,336	2,366	2,398	2,590	2,490	2,465	2,440	2,620	2,515
2,360	4,3749	0,003941	0,006401	2,459	2,488	2,522	2,710	2,610	2,585	2,560	2,740	2,635
2,500	4,9093	0,003512	0,005704	2,601	2,631	2,665	2,850	2,725	2,730	2,700	2,880	2,780
2,650	5,5162	0,003126	0,005077	2,754	2,784	2,819	3,000	2,875	2,830	2,850	3,035	2,930
2,800	6,1583	0,002800	0,004547	2,907	2,938	2,972	3,150	3,025	3,030	3,005	3,185	3,080
3,000	7,0695	0,002439	0,003961	3,110	3,142	3,176	3,350	3,225	3,235	3,205	3,385	3,285
3,150	7,7941	0,002212	0,003593	3,263	3,284	3,330	3,500	3,375	3,385	3,355	3,540	3,435
3,350	8,8153	0,001956	0,003177	3,466	3,498	3,534	3,700	3,575	3,585	3,560	3,740	3,635
3,550	9,8993	0,001742	0,002829	3,670	3,702	3,738	3,900	3,775	3,790	3,760	3,940	3,840
3,750	11,0461	0,001561	0,002535	3,873	3,905	3,942	4,100	3,975	3,990	3,965	4,145	4,040
4,000	12,5680	0,001372	0,002228	4,127	4,160	4,196	4,350	4,300	4,245	4,125	4,395	4,295
4,250	14,1881	0,001215	0,001974	4,380	4,414	4,451	4,600	4,550	4,495	4,470	4,650	4,545
4,500	15,9064	0,001084	0,001761	4,634	4,668	4,705	4,850	4,800	4,750	4,720	4,900	4,800
4,750	17,7209	0,000973	0,001580	4,889	4,923	4,961	5,100	5,050	5,000	4,975	5,155	5,050
5,000	19,6370	0,0008781	0,001426	5,142	5,177	5,215	5,350	5,300	5,225	5,225	5,405	5,305

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN RECTANGULAR (Área en mm²)

Grosor (mm)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	
Ancho (mm)																																
0,9	-	<u>0,67</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,0	-	-	<u>0,86</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,2	-	-	-	-	<u>1,3</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,4	0,98	1,12	1,26	1,40	-	-	<u>1,75</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,6	1,14	1,30	1,46	1,62	1,78	1,87	-	-	<u>2,35</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,8	1,30	1,48	1,66	1,84	2,02	2,13	2,31	2,48	-	-	<u>2,93</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,0	1,46	1,66	1,86	2,06	2,19	2,39	2,59	2,79	2,99	3,19	-	-	<u>3,69</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,2	1,62	1,84	2,06	2,21	2,43	2,65	2,87	3,09	3,31	3,53	3,65	-	-	<u>4,53</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,5	1,86	2,11	2,36	2,54	2,79	3,04	3,29	3,54	3,79	4,04	4,19	4,44	<u>4,69</u>	-	<u>5,94</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,8	2,10	2,38	2,66	2,87	3,15	3,43	3,71	3,99	4,17	4,45	4,75	5,01	5,29	585	-	<u>7,28</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,0	2,26	2,56	2,86	3,09	3,39	3,69	3,99	4,19	4,49	4,79	5,09	5,39	5,69	6,29	7,19	-	<u>8,44</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,2	2,42	2,74	3,06	3,31	3,63	3,95	4,27	4,49	4,81	5,13	5,45	5,77	6,09	6,73	7,69	8,41	-	<u>9,68</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,5	2,66	3,01	3,36	3,64	3,99	4,34	4,69	4,94	5,29	5,64	5,99	6,34	6,69	7,39	8,20	9,25	9,95	-	<u>11,69</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,8	2,90	3,28	3,66	3,97	4,35	4,73	5,11	5,39	5,77	6,15	6,53	6,91	7,29	8,05	8,95	10,10	10,90	11,60	-	<u>13,88</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4,0	3,06	3,46	3,86	4,19	4,59	4,99	5,39	5,69	6,09	6,49	6,89	7,29	7,69	8,25	9,45	10,70	11,50	12,30	13,50	-	<u>15,44</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4,5	3,46	3,91	4,36	4,74	5,19	5,64	6,09	6,44	6,89	7,34	7,79	8,24	8,45	9,35	10,70	12,10	13,00	13,90	15,20	-	17,10	19,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5,0	3,86	4,36	4,86	5,29	5,79	6,29	6,79	7,19	7,69	8,19	8,69	9,10	9,45	10,50	12,00	13,50	14,50	15,50	16,60	-	19,10	21,60	24,14	-	-	-	-	-	-	-	-	
5,5	4,26	4,81	5,36	5,84	6,39	6,94	7,49	7,94	8,49	9,04	9,59	10,10	10,50	11,60	13,20	14,90	16,00	16,70	18,40	-	21,10	23,85	26,60	29,30	-	-	-	-	-	-	-	
6,0	4,66	5,26	5,86	6,39	6,99	7,59	8,19	8,69	9,29	9,89	10,50	11,10	11,50	12,70	14,50	16,30	17,50	18,30	20,10	-	23,10	26,10	29,10	32,10	35,14	-	-	-	-	-	-	
6,5	5,06	5,71	6,36	6,94	7,59	8,24	8,89	9,44	10,10	10,70	11,40	12,00	12,50	13,80	15,70	17,70	19,00	19,90	21,90	-	25,10	28,40	31,60	34,90	38,10	41,40	-	-	-	-	-	
7,0	5,46	6,16	6,86	7,49	8,19	8,89	9,59	10,20	10,90	11,60	12,30	13,00	13,50	14,90	17,00	19,10	20,50	21,50	23,60	-	27,10	30,60	34,10	37,60	41,10	44,60	48,10	-	-	-		
7,5	5,86	6,61	7,36	8,04	8,79	9,54	10,30	10,90	11,70	12,40	13,20	13,90	14,50	16,00	18,20	20,50	22,00	23,10	25,40	-	29,10	32,90	36,60	40,40	44,10	47,90	51,60	55,40	-	-	-	
8,0	6,26	7,06	7,86	8,59	9,39	10,20	11,00	11,70	12,50	13,30	14,90	15,50	17,10	17,50	21,90	23,50	24,70	27,10	27,10	-	31,10	35,10	39,10	43,10	47,10	51,10	55,10	59,10	63,10	-		
9,0	7,06	7,96	8,86	9,69	10,60	11,50	12,40	13,20	14,10	15,00	15,90	16,80	17,50	19,30	22,00	24,70	26,50	27,90	30,60	-	35,10	39,60	44,10	48,60	53,10	57,60	62,10	66,60	71,10	80,10	-	
10,0	7,86	8,86	9,86	10,80	11,80	12,80	13,80	14,70	15,70	16,70	17,70	18,70	19,50	21,50	24,50	27,50	29,50	31,10	34,10	-	39,10	44,10	49,10	54,10	59,10	64,10	69,10	74,10	79,10	89,10	99,10	
11,0	8,66	9,76	10,90	11,90	13,00	14,10	15,20	16,20	17,30	18,40	19,50	20,60	21,50	23,70	27,00	30,30	32,50	34,30	37,60	-	43,10	48,60	54,10	59,60	65,10	70,60	76,10	81,60	87,10	98,10	109	
12,0	9,46	10,70	11,90	13,00	14,20	15,40	16,60	17,70	18,90	20,10	21,30	22,50	23,50	25,90	29,50	33,10	35,50	37,50	44,10	-	47,10	53,10	59,10	65,10	71,10	77,10	83,10	89,10	95,10	107	119	
13,0	10,30	11,60	12,90	14,10	15,40	16,20	18,00	19,20	20,50	21,80	23,10	24,40	25,50	28,10	32,00	35,90	38,50	40,70	44,60	-	51,10	57,60	64,10	70,60	77,10	83,60	90,10	96,60	103	116	129	
14,0	11,10	12,50	13,90	15,20	16,60	18,00	19,40	20,70	22,10	23,50	24,90	26,30	27,50	30,30	34,50	38,70	41,50	43,90	48,10	-	55,10	62,10	69,10	76,10	83,10	90,10	97,10	104	111	125	139	
15,0	11,90	13,40	14,90	16,30	17,80	19,30	20,80	22,20	23,70	25,20	26,70	28,20	29,50	32,50	37,00	41,50	44,50	47,10	51,60	-	59,10	66,60	74,10	81,60	89,10	96,50	104	112	119	134	149	
16,0	12,70	14,30	15,90	17,40	19,00	20,60	22,20	23,70	25,30	26,90	28,50	30,10	31,50	34,70	39,50	44,30	47,50	50,30	55,10	-	63,10	71,10	79,10	87,10	95,10	103	111	119	127	143	159	
18,0	-	16,10	17,90	19,60	21,40	23,20	25,00	26,70	28,50	30,30	32,10	33,90	35,50	39,10	44,50	49,90	53,50	56,70	62,10	-	71,10	80,10	89,10	98,10	107	116	125	134	143	161	179	
20,0	-	-	19,90	21,80	23,80	25,80	27,80	29,70	31,70	33,70	35,70	37,70	39,50	43,50	49,50	55,50	59,50	63,10	69,10	-	79,10	89,10	99,10	109	119	129	139	149	159	179	199	219
22,0	-	-	-	24,00	26,00	28,40	30,60	32,70	34,90	37,10	39,30	41,50	43,50	47,90	54,50	61,10	65,50	69,50	76,10	-	87,10	98,10	109	120	131	142	153	164	175	197	219	
25,0	-	-	-	-	32,30	34,80	37,20	39,70	42,20	44,70	47,20	49,50	54,50	62,00	69,50	74,00	79,10	86,60	-	99,10	112	124	137	149	162	174	187	199	224	249		

Subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón.

Doble subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón o papel.

Nota: Las áreas indicadas en esta tabla tienen en cuenta la reducción debida a que los bordes están redondeados.

Aumento de dimensiones por aislamiento en conductores rectangulares de cobre

Aislamiento: esmalte		Aislamiento: algodón	
Tipo de aislamiento	Aumento de dimensiones (micra)	Tipo de aislamiento	Aumento de dimensiones (mm)
Fino	50 (35 ÷ 60)	Doble capa ordinaria	0,48 (0,46 ÷ 0,51)
Medio	80 (60 ÷ 100)	Doble capa fina	0,40 (0,36 ÷ 0,43)
Grueso	130 (100 ÷ 150)		

(1 micra = 10^{-6} m = 10^{-3} mm)

Propiedades físicas del cobre y del aluminio

Características	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)
Resistividad a 20°C ($\Omega \text{mm}^2/\text{m}$)	$(1/58) = 0,017241$	$(1/35,7) = 0,028$
T_0 (°C)	235	225
Densidad a 20°C (kg/m^3)	8890	2703
Punto de fusión (°C)	1083	660

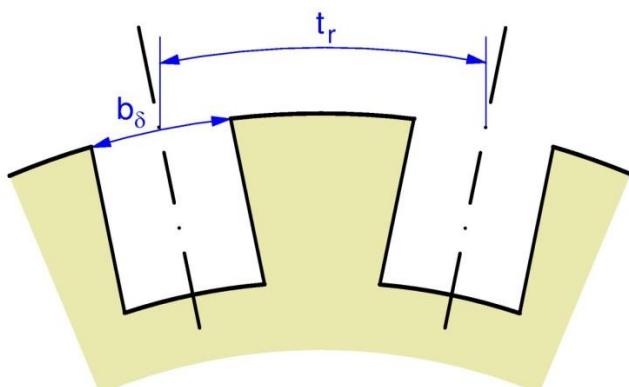
Valores del cociente longitud axial/paso polar $\frac{l_\delta}{t_{p1}}$ en máquinas asincrónas

Nº de pares de polos (p)	Nº de polos (2p)	Relación $\frac{l_\delta}{t_{p1}}$
1	2	1,0 (0,5 ÷ 1,2)
2	4	1,3 (0,8 ÷ 1,6)
3	6	1,4 (0,9 ÷ 1,8)
4	8	1,6 (1,0 ÷ 1,9)

$$\frac{l_\delta}{d_1} = \frac{\pi}{2p} \left(\frac{l_\delta}{t_{p1}} \right)$$

Factor de Carter, K_C

$$K_C = \frac{t_r}{t_r - \frac{b_\delta^2}{5\delta_g + b_\delta}}$$



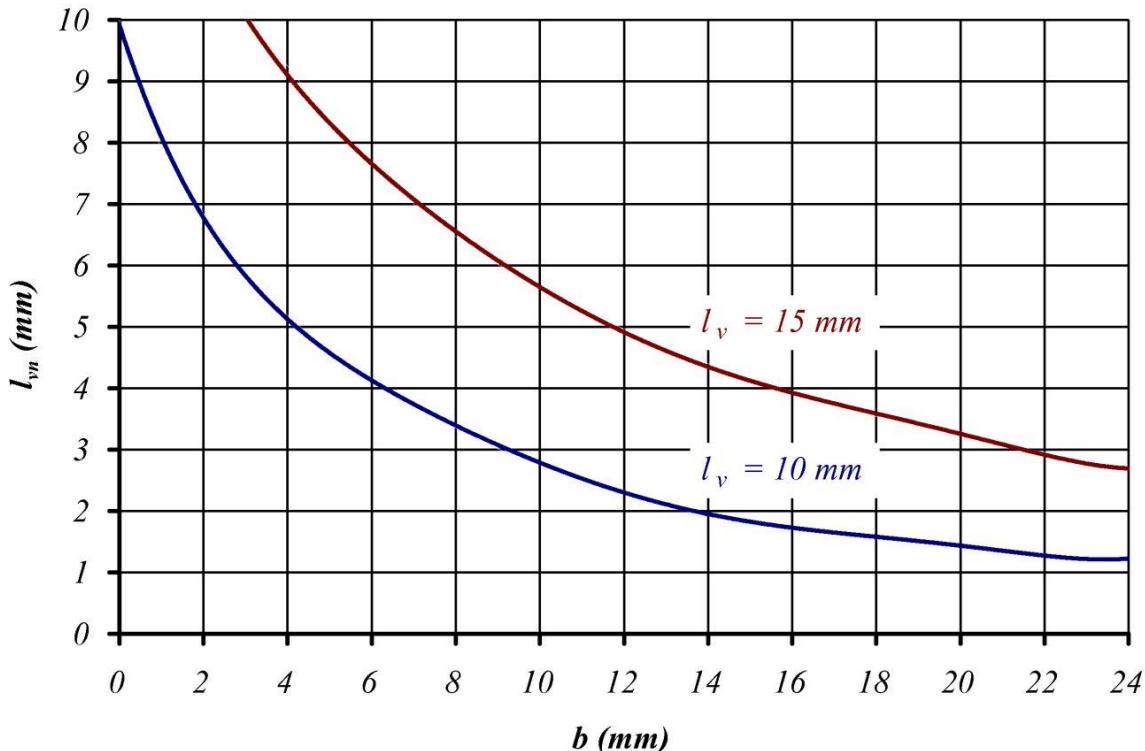
Longitud efectiva del entrehierro, l_δ

$$l_\delta = l_g + 2\delta_g - \left[(n_{v1} - n_{v1,2}) l_{v1} \kappa'_1 \right] - \left[(n_{v2} - n_{v1,2}) l_{v2} \kappa'_2 \right] - \left[n_{v1,2} l_v \kappa'_{1,2} \right]$$

$$\kappa'_1 = \frac{\frac{l_{v1}}{\delta_g}}{5 + \frac{l_{v1}}{\delta_g}} = \frac{l_{v1}}{5\delta_g + l_{v1}} ; \quad \kappa'_2 = \frac{\frac{l_{v2}}{\delta_g}}{5 + \frac{l_{v2}}{\delta_g}} = \frac{l_{v2}}{5\delta_g + l_{v2}}$$

$$\kappa'_{1,2} = \frac{\frac{2l_v}{\delta_g}}{5 + \frac{2l_v}{\delta_g}} = \frac{2l_v}{5\delta_g + 2l_v}$$

Longitud efectiva del circuito magnético de dispersión de ranura, l_n



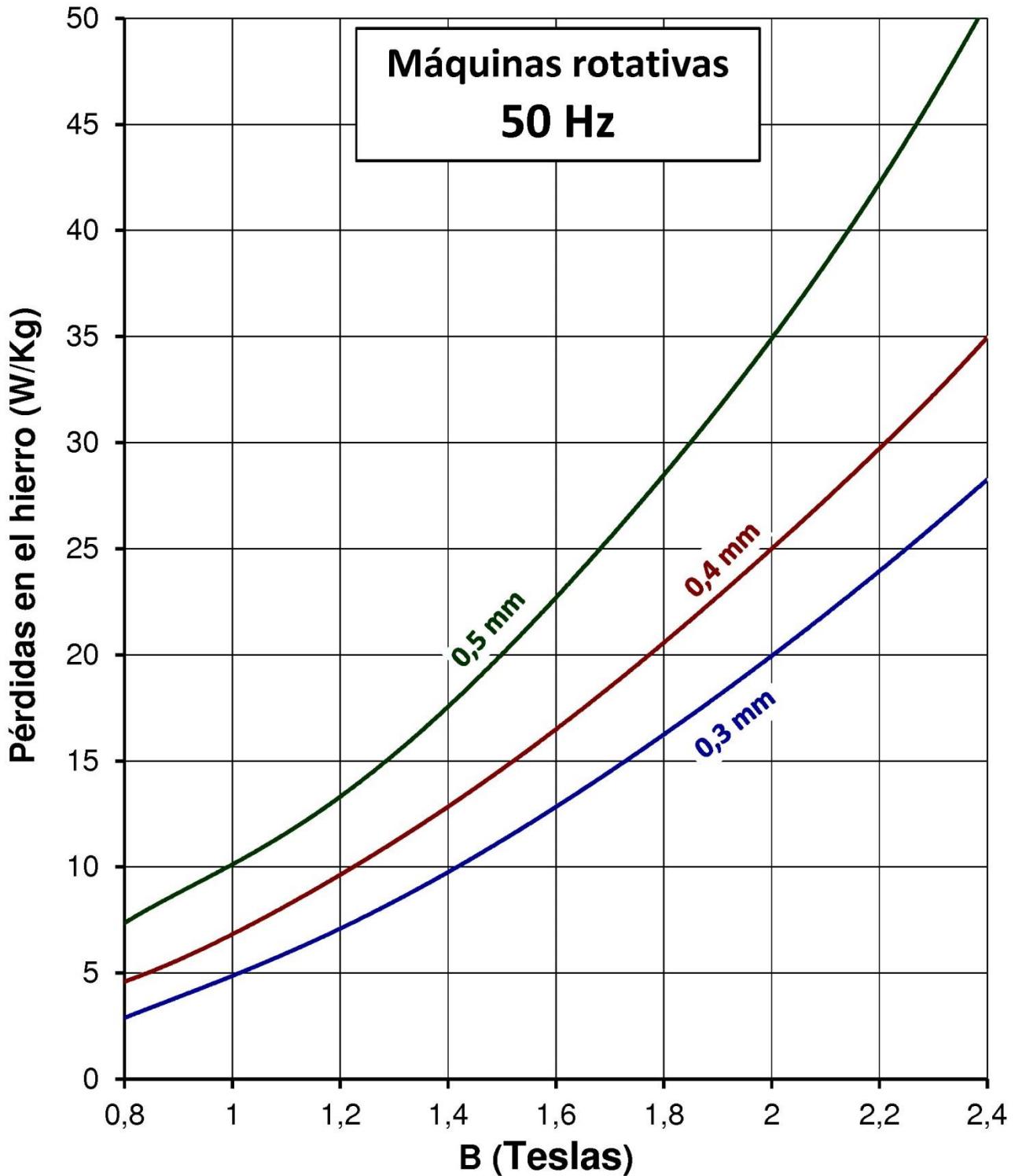
$$l_n = l_g - (n_v l_{vn})$$

Longitud útil del hierro, l_{Fe}

$$l_{Fe} = k_{Fe} [l_g - (n_v l_v)]$$

- $k_{Fe} = 0,97$ ($0,96 \div 0,98$) para chapas de 0,5 mm de espesor
- $k_{Fe} = 0,90$ ($0,90 \div 0,92$) para chapas de 0,3 ó 0,35 mm de espesor

Pérdidas en el hierro por unidad de masa

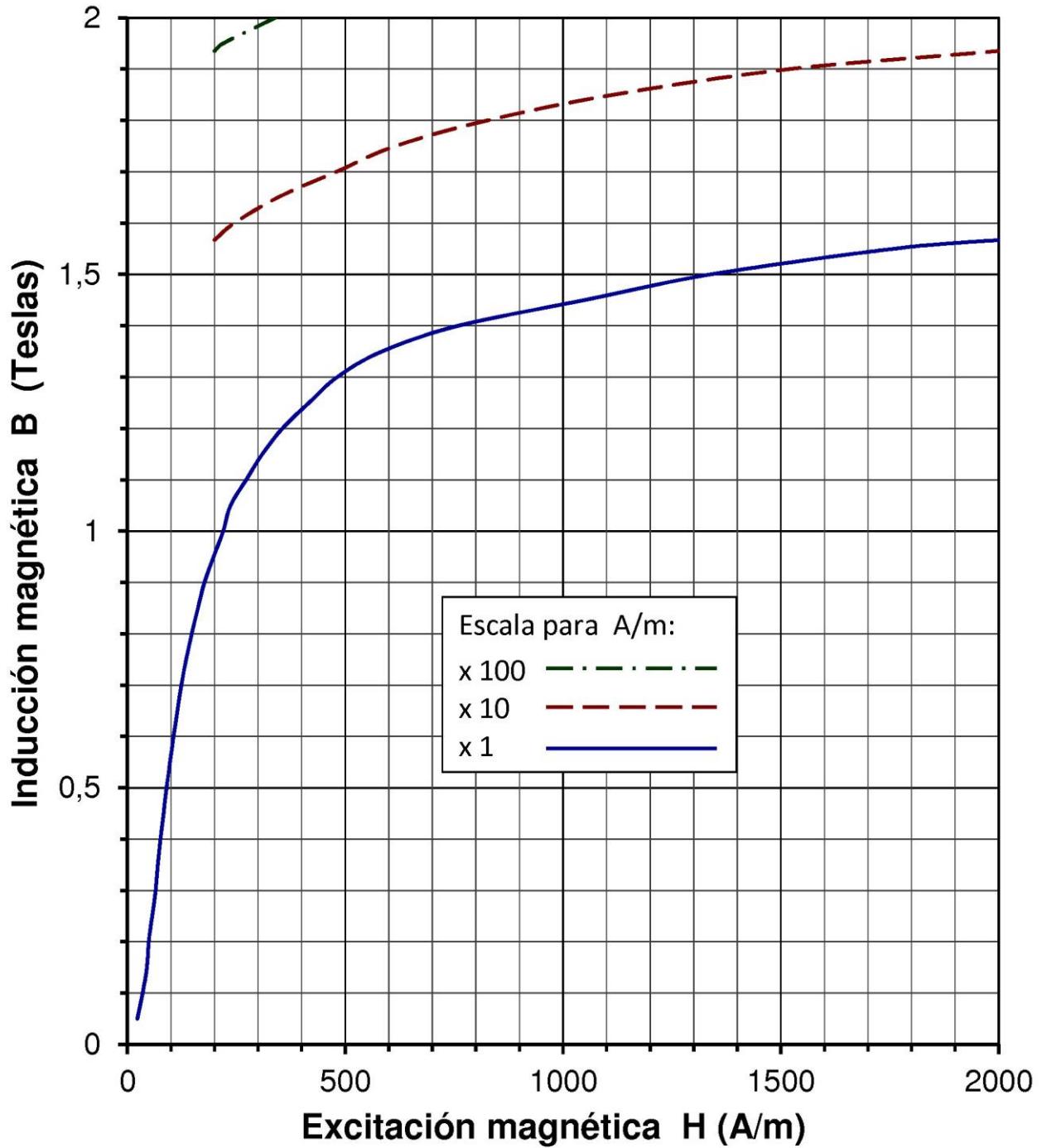


Se aplican los siguientes **factores de corrección** para tener en cuenta pérdidas en el hierro adicionales:

- 1,8 en los *dientes*
- $1,5 \div 1,7$ en los *yugos* (tomaremos el valor 1,6)

Densidad de las chapas magnéticas: $\rho_{Fe} = 7600 \text{ kg/m}^3$

Curva de magnetización para acero laminado



Tensión magnética en un yugo para la línea de inducción que cruza el entrehierro a 30° eléctricos del centro de un polo, $F_{y,30^\circ}$

- $F_{y,30^\circ} = H_{y\text{med}} \cdot l_{y,30^\circ}$
- Inducción media en el yugo de esta línea de campo: $B_{y\text{med}} = 0,8266 B_{yM}$
- Longitud en el yugo de esta línea de campo: $l_{y,30^\circ} = \frac{2}{3} \frac{\pi d_{y\text{med}}}{2p}$
($d_{y\text{med}}$ = Diámetro a media altura del yugo; B_{yM} = Inducción máxima en el yugo)

Combinaciones de los números de ranuras de estator (K_1) y de rotor (K_2) recomendadas en motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla

$p = 1$			$p = 2$			$p = 3$			$p = 4$			$p = 5$		
K_1	K_2		K_1	K_2		K_1	K_2		K_1	K_2		K_1	K_2	
18	16	22	24	18	30	24	28		24	30		60	48	52
				32									68	72
24	16	18	36	22	24	36	28	30	36	39	48	74		
	20	22		28	42		39	42		40	58	90	72	74
	28			44	60		44	46	48	60	72		76	78
30	22	34	48	38	44	54	44	46	72	58	62	102	104	
	16	24		56	58		48	62		82	84	106	108	
36	26	28		60	84		64	68		86	90	112		
	46	48					72	88		96		120	96	98
42	34	52	60	44	48	72	54	58	96	78	82	102	104	
				50	70		62	82		110	114	136	138	
48	40	52		72	74		84	86		118		142	144	
	58			84			88	90				146	148	
54	46	64	72	58	62		96		120	98	102	150	122	124
				82	86					138	142		126	128
				90		90	74	76		146	150		172	174
60	48	50					104	106					176	178
	52	70	84	70	90		110	112	144	118	122		182	184
				94	98					126	162		186	188
66	52	76		102		108	86	88		166	170	180	144	146
	82						92	94		174	178		148	152
72	58	82	96	78	110		122	124					154	156
				114	118		128	130					158	204
	88						134						206	208
						126	104	106					212	214
							110	142					216	218
							146	148					222	224
							152	154						
							158							

(Fuente: Corrales [4])

DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- a' Número de ramas en paralelo de una fase
- B Número total de bobinas simples
- b Número de bobinas simples de una fase por par de polos
- b_G Número de bobinas simples de un grupo polar
- G Número total de grupos polares
- G_f Número de grupos polares de una fase
- I Corriente total absorbida por una fase
- I_r Corriente que circula por cada una de las ramas en paralelo de una fase
- K Número total de ranuras
- m Número de fases
- N_r Número de espiras de una bobina simple
- N_f Número de espiras totales de una fase
- N Número de espiras efectivas en serie de una fase = Número de espiras de cada rama en paralelo de una fase
- p Número de pares de polos
- Q Número de ranuras por polo
- q Número de ranuras por polo y fase
- Z_f Número de conductores totales de una fase ($Z_f = 2 N_f$)
- Z Número de conductores efectivos en serie de una fase ($Z = 2 N$)

$$Q = m \cdot q$$

$$K = 2 \cdot p \cdot Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q$$

$$N_f = a' \cdot N$$

$$I = a' \cdot I_r$$

$$N = \frac{p}{a'} \cdot b \cdot N_r$$

$$N_f = p \cdot b \cdot N_r$$

$$B = m \cdot p \cdot b$$

$$B = G \cdot b_G$$

$$b \cdot N_r \cdot I_r = \left(\frac{N \cdot a'}{p} \right) \cdot \left(\frac{I}{a'} \right) = \frac{NI}{p}$$

$$G = m \cdot G_f$$

En **devanados de una capa** (como cada bobina ocupa dos ranuras):

$$K = 2B \rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2(m \cdot p \cdot b) \rightarrow q = b$$

En **devanados de dos capas** (con un lado de bobina por capa):

$$K = B \rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = m \cdot p \cdot b \rightarrow 2q = b$$

En **devanados por polos**:

$$G_f = 2p$$

En **devanados por polos consecuentes**:

$$G_f = p$$

FACTOR DE BOBINADO ξ_b EN DEVANADOS TRIFÁSICOS ($\xi_b = \xi_d \cdot \xi_a \cdot \xi_i$)

Factor de distribución ξ_d

q: Número de ranuras por polo y fase											
q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	∞	
ξ_d	1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,956	0,956	0,955	0,955	

Factor de acortamiento ξ_a

β : Ángulo de acortamiento (en grados eléctricos); afpp: Acortamiento expresado como fracción del paso polar																				
β	0	12	15	18	20	22,5	24	30	36	40	45	48	54	60	67,5	72	75	80	84	90
afpp	0	1/15	1/12	1/10	1/9	1/8	2/15	1/6	1/5	2/9	1/4	4/15	3/10	1/3	3/8	2/5	5/12	4/9	7/15	1/2
ξ_a	1	0,995	0,991	0,998	0,985	0,981	0,978	0,966	0,951	0,940	0,924	0,914	0,891	0,866	0,831	0,809	0,793	0,766	0,743	0,707

Factor de inclinación ξ_i

α_i : Ángulo (eléctrico) de inclinación de las ranuras (se indica en grados y en radianes)																				
α_i (grad)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
α_i (rad)	0,017	0,035	0,052	0,070	0,087	0,105	0,122	0,140	0,157	0,175	0,192	0,209	0,227	0,244	0,262	0,279	0,297	0,314	0,332	0,349
ξ_i	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,996	0,996	0,995	0,995	
α_i (grad)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
α_i (rad)	0,367	0,384	0,401	0,419	0,436	0,454	0,471	0,489	0,506	0,524	0,541	0,559	0,576	0,593	0,611	0,628	0,646	0,663	0,681	0,698
ξ_i	0,994	0,994	0,993	0,993	0,992	0,991	0,991	0,990	0,989	0,989	0,988	0,987	0,986	0,985	0,985	0,984	0,983	0,982	0,981	0,980
α_i (grad)	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
α_i (rad)	0,716	0,733	0,750	0,768	0,785	0,803	0,820	0,838	0,855	0,873	0,890	0,908	0,925	0,942	0,960	0,977	0,995	1,012	1,030	1,047
ξ_i	0,979	0,978	0,977	0,976	0,974	0,973	0,972	0,971	0,970	0,969	0,967	0,966	0,965	0,963	0,962	0,961	0,959	0,958	0,956	0,955

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR. 2009. *UNE-EN 60034-2-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de pérdidas y de rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción)*. Madrid: AENOR.
- [2] BOLDEA, I. y NASAR, S. A. 2002. *The Induction Machine Handbook*. New York: CRC Press. (Ver el siguiente libro).
- [3] BOLDEA, I. y NASAR, S. A. 2010. *The Induction Machine Design Handbook*. New York: CRC Press. Es una versión actualizada del libro anterior [2].
- [4] CORRALES MARTÍN, J. 1982. *Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I: Fundamentos de cálculo*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [5] Deshpande, M. V. 2011. *Design and testing of electrical machines*. New Delhi (India). PHI Learning Private Limited, 2011.
- [6] PYRHÖNEN, JUHA y otros. 2010. *Design of rotating electrical machines*. West Sussex (Inglaterra): John Wiley & Sons Ltd.
- [7] RAPP, J. 1997. *Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos*. Bilbao: Editado por el autor.
- [8] ROLAND DAVID. 1971. *Cálculo de máquinas eléctricas rotativas. Tomo I*. Madrid: Sección de publicaciones de la E.T.S.I. Industriales de Madrid.
- [9] SACCHI, J. y RIFALDI, A. 1995. *Cálculo y diseño de máquinas eléctricas*. La Plata (Argentina): Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. http://davinci.ing.unlp.edu.ar/sispot/1_LyP - Intro.html.
- [10] SHANMUSGASUNDARAM, A.; GANDADHARAN, G.; PALANI, R. 2012. *Electrical Machine Design Data Book*. New Delhi (India). New Age International Publishers.
- [11] UPADHYAY, K. G. 2008. *Design of electrical machines*. New Delhi (India): New Age International Publishers.

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta
Universidad de Cantabria (España)
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

*Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*