

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DEL MOTOR

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez expuestos los capítulos dedicados a los objetivos, los aspectos constructivos, la teoría básica de máquinas eléctricas o el capítulo dedicado a los ensayos realizados, es el momento de abrir otro bloque de capítulos que podríamos calificar de análisis, conclusiones y resultados. Los objetivos de estos capítulos son los análisis tanto constructivos como los referentes a los análisis de los resultados obtenidos mediante las sucesivas simulaciones o por medio de los ensayos efectuados en el laboratorio.

Si bien hasta ahora se habían analizado todas las posibles combinaciones entre los rotores y estatores construidos (cuatro estatores combinados con once rotores) que arrojaban un total de cuarenta y cuatro motores diferentes, a partir de ahora y la vista de los resultados obtenidos previamente, solamente se analizarán los motores que han dado mejores prestaciones en conjunto, es decir: eléctricas, magnéticas, térmicas y mecánicas. Considerando estas cuatro condiciones el mejor motor con rotor de chapas que se ha obtenido es el motor de inducción trifásico a 3000 rpm con rotor de chapas tipo *A*. Se realizará por tanto el análisis de este motor comparándose con sus más directos rivales, el motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla y el motor macizo con aros.

6.2 ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DEL MOTOR A 3000 rpm CON ROTOR DE CHAPAS TIPO *A*

En primer lugar se efectuará un análisis constructivo del motor a 3000 rpm con rotor de chapas tipo *A*, que incluirá las ecuaciones constructivas tanto del estator como del rotor. Aparte, se indicará los bobinados que lleva incorporado este estator, así como sus datos fundamentales. La geometría del motor, en su conjunto, también tendrá cabida en este apartado.

Para completar el estudio constructivo se realizará una optimización de los materiales empleados en la construcción del motor (rotor y estator), dando sus características principales así como las graficas que definen sus propiedades eléctricas y magnéticas más relevantes. Finalmente se calculará el factor de calidad del motor de chapas propuesto con una breve explicación que define a este factor.

6.2.1 Ecuaciones constructivas del motor

Siguiendo los razonamientos dados en la actualidad para la construcción de máquinas eléctricas se exponen a continuación las ecuaciones que definen mecánicamente y eléctricamente al estator. Posteriormente se expondrá el tipo de bobinado elegido así como sus características principales, y por último, se darán las ecuaciones constructivas referentes al rotor de chapas.

6.2.1.1 Ecuaciones que definen la geometría del estator a 3000 rpm con rotor de chapas tipo *A*

Aunque en parte el estator ya estaba construido, si se realizaron algunas modificaciones en el mismo, por lo que se ha considerado necesario incluir las ecuaciones características que definen su proceso constructivo, el cual no difiere sustancialmente de los estatores de los motores asíncronos trifásicos convencionales. De forma que se dan las ecuaciones más importantes que permitirían su completo diseño constructivo, aunque recordamos que parte de estos parámetros ya venían definidos al adquirir estos motores.

Los datos de las potencias, rendimientos, factores de potencia, etc. han sido obtenidos mediante los ensayos experimentales del motor de 3000 rpm con el rotor de chapas tipo *A*. A partir de estos datos se

han aplicado las ecuaciones^[L-16] correspondientes obteniéndose diversas magnitudes eléctricas, número de conductores, inducciones en diversos puntos del estator, etc. Cada una de estos parámetros son cotejados con los que se obtuvieron experimentalmente.

Datos principales

- Potencia útil: $P = 0.375CV = 0.275kW = 275W$
- Tensión: $U = 220V / 380V$ conexiones Δ/Y respectivamente.
- Velocidad síncrona: $N_1 = 3000rpm$
- Frecuencia: $f = 50Hz$
- Número de fases: $m_1 = 3$
- Rotor: de chapas en espiral.
- Eje: horizontal.
- Construcción: protegida contra goteo
- Aislamiento térmico: F
- Pares de polos: $p = \frac{f \cdot 60}{N_1} = \frac{50 \cdot 60}{3000} = 1$
- Rendimiento: $\eta = 57\%$
- Factor de potencia: $\cos \varphi = 0.52$
 $\text{sen } \varphi = 0.86$
- Tensión por fase: $U_1 = 220V$
- Intensidad de fase: $I_1 = \frac{P}{m_1 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{275}{3 \cdot 220 \cdot 0.57 \cdot 0.52} = 1.410A$ ($1.232A$ con rotor sin anillos)
- Deslizamiento (supuesto): $s = 3.33\%$
- Velocidad en carga (supuesta): $N_2 = N_1 \left(\frac{f-s}{f} \right) = 3000 \left(\frac{50-3.33}{50} \right) = 2800rpm$

Estator.

- **Inducido (valores provisionales).**
- Diámetro: para $P = 0.275kW$ y $2p = 2polos$, entonces $D = 80mm$
- Inducción teórica: para $D = 80mm$ y $2p = 2polos$, entonces $\hat{B}'_{\infty} = 0.66T$
- Número de conductores por ranura: $Z_n = 55$
- Carga lineal específica: para $P = 0.25kW$, entonces $q_1 = \frac{n_1 \cdot Z_n \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{36 \cdot 55 \cdot 1.410}{\pi \cdot 8} = 1101A/cm$
- Ranuras por polo y fase: $n_{pf(1)} = \frac{n_1}{2p \cdot q} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6$ por polo: $n_{p(1)} = n_{pf(1)} \cdot m_1 = 6 \cdot 3 = 18$
- Número de ranuras: $n_1 = 2p \cdot m_1 \cdot n_{pf(1)} = 2 \cdot 3 \cdot 6 = 36ranuras$
- Devanado: simple capa, paso $y_{n1} = 12$
- Factor de distribución: para $n_{pf(1)} = 6$, entonces $\xi_{d1} = 0.956$
- Factor de acortamiento: para $\frac{y_{n1}}{n_{p1}} = \frac{12}{18}$, entonces $\xi_{y1} = 0.866$
- Factor de bobinado: $\xi_1 = \xi_{d1} \cdot \xi_{y1} = 0.956 \cdot 0.866 = 0.827$

- Constante de la máquina: $C = 1.165 \cdot \xi_1 \left(\frac{q_1}{100} \widehat{B}_{\infty} \right) = 1.165 \cdot 0.827 \cdot \left(\frac{111}{100} \cdot 0.66 \right) = 0.705 \frac{\left(\frac{VA}{dm^3} \right)}{r/m}$
- Potencia aparente en bornes: $P_b = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0.275}{0.57 \cdot 0.52} = 0.965 kVA$
- Par ficticio en bornes $M_b = \frac{P_b}{\left(\frac{N_1}{1000} \right)} = \frac{0.965}{3} = 0.322 \frac{VA}{r/m}$
- Volumen prismático: $V_{prisma} = \frac{M_b}{C} = \frac{0.322}{0.705} = 0.456 dm^3$
- Longitud total geométrica de la armadura: $L = \frac{V_{prisma}}{D^2} = \frac{0.456}{(0.8)^2} = 0.712 dm$

▪ **Inducido (valores adoptados)**

- Diámetro en el entrehierro: $D = 80 mm$
- Longitud total: $L = 70 mm$
- Canales de ventilación radial: $n_{e(1)} = 0$
- Longitud axial por canal: $\varepsilon_{c(1)} = 0$
- Longitud bruta de hierro: $L_{h(1)} = L - n_{c(1)} \cdot \varepsilon_{c(1)} = 70 mm$
- Longitud neta de hierro: $L_{Fe(1)} = k_{Fe} L_{h(1)} = 0.96 \cdot 70 = 67.2 mm$
- Paso polar: $\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 80}{2} = 126 mm$
- Velocidad periférica: $v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \cdot 0.08 \cdot 2800}{60} = 11.71 m/s$

▪ **Número de conductores y flujo en el entrehierro**

- Conductores por ranura: para una $f = 50 Hz$ $Z_{n(1)} = \frac{45 \cdot U_1}{\xi_1 \cdot n_{p1} \cdot (DL) \cdot \widehat{B}_{\infty}} = \frac{45 \cdot 220}{0.827 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 0.66} = 54$
- Conductores totales: $Z_1 = n_1 \cdot Z_{n(1)} = 36 \cdot 54 = 1944 cond$
- Inducción teórica definitiva: $\widehat{B}_{\infty} = \frac{Z_{n(1)}}{Z_n} \widehat{B}'_{\infty} = \frac{54}{55} \cdot 0.66 = 0.648 T$ ($0.58 T$ con rotor sin anillos)
- Carga lineal especif: $q_{1-aros} = \frac{Z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{1944 \cdot 1.410}{\pi \cdot 8} = 109 A/cm$ $q_{1-sin aros} = \frac{Z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{1944 \cdot 1.232}{\pi \cdot 8} = 95.3 A/cm$
- Flujo teórico senoidal equivalente, para una femm igual a la tensión U_1 :

$$\widehat{\Phi}_{\infty} = \frac{2 \cdot (\tau_p \cdot L)}{\pi} \widehat{B}_{\infty} = \frac{2 \cdot (0.126 \cdot 0.07)}{\pi} \cdot 0.648 = 0.00364 Wb$$

▪ **Dimensiones de los conductores y ranuras (provisionales)**

- $(q_1 \Delta_1 / \Delta \Theta_1)$ admisible en las cabezas de las bobinas para $v = 11.71 m/s$, tendremos:

$$\frac{(q \cdot \Delta)_1}{\Delta \theta_1} = 16 \frac{(A/mm)(A \cdot mm^2)}{^{\circ}C}$$

- Incremento de la temperatura admisible en las cabezas de las bobinas:
 - Suponiendo aislamiento clase F: $\Delta \Theta_{med} = 100^{\circ}C$

- Margen de seguridad: 40°C.
- Temperatura en las cabezas de bobina: $\Delta\Theta = 60^\circ\text{C}$

$$(q_1 \cdot \Delta_1)_{admissible} = \left(\frac{(q\Delta)}{\Delta\theta_1} \right) \Delta\Theta_1 = 16 \cdot 60 = 960$$

- Densidad de corriente admisible: $\Delta_1 = \frac{(q_1 \cdot \Delta_1)}{q_1} = \frac{960}{109} = 8.81 \text{ A/mm}^2$
- Sección del conductor-fase: $S_{f(1)} = \frac{I_1}{\Delta_1} = \frac{1.410}{8.810} = 0.161 \text{ mm}^2$ (adoptamos 0.331 mm^2 experimental)
- Inducción teórica aparente máxima en los dientes para la tensión U_1 : $\widehat{B}_{dMo(1)} = 1.8 \text{ T}$
- Factor de corrección lineal para los dientes: $K_{Fe(1)} = \frac{L}{L_{Fe(1)}} = \frac{70}{67.2} = 1.041$
- Paso de ranura en el entrehierro: $\tau_{\delta(1)} = \frac{\pi \cdot D}{n_1} = \frac{\pi \cdot 80}{36} = 6.98 \text{ mm}$
- Grueso del diente en el entrehierro: $t_{o(1)} = K_{Fe(1)} \cdot \tau_{\delta(1)} \frac{B_{\delta o}}{\widehat{B}_{dMo(1)}} = 1.041 \cdot 6.98 \frac{0.648}{1.8} = 2.617 \text{ mm}$
- Anchura de ranura: $a_1 = \tau_{\delta(1)} - t_{o(1)} = 6.98 - 2.617 = 4.362 \text{ mm}$
- Aislamiento de barras: *tipo F*
- Incremento diametral de espesor: 0.1mm
- Grosor del manguito de ranura: $e = 0.4 \text{ mm}$

▪ Disposición de los conductores definitiva.

- Número de vías: $2a = 1$
- Conductores en paralelo por vía: 1
- Conductor individual: 0.65 mm, esmaltado con C.P.V. 0.05 mm
- Sección por fase: 0.331 mm^2
- Densidad corriente: $\Delta_{1-aros} = \frac{I_{1-aros}}{S_{f(1)}} = \frac{1.410}{0.331} = 4.25 \text{ A/mm}^2$ $\Delta_{1-no\ aros} = \frac{I_{1-no\ aros}}{S_{f(1)}} = \frac{1.232}{0.331} = 3.722 \text{ A/mm}^2$
- Conductores individuales por ranura: 55
- Índice: $(q_1 \cdot \Delta_1) = (109 \cdot 4.25) = 465$
- Calentamiento de las cabezas de bobina: $\Delta\theta_1 = 60 \frac{(q_1 \cdot \Delta_1)}{3000} = 60 \cdot \left(\frac{465}{3000} \right) = 9.3^\circ \text{ C}$
- Calentamiento medio del bobinado: $\Delta\theta_1 \approx 9.3 + 40 = 49.3^\circ \text{ C}$

▪ Trazado de la ranura definitivo.

- Diámetro mínimo en los dientes: $D_{o(1)} = D + 2(h_{\delta(1)} + h_{v(1)}) = 80 + 2(0.5 + 1.5) = 84 \text{ mm}$
- Diámetro medio en los dientes: $D_{m(1)} = D_{o(1)} + h_{r(1)} = 84 + 13 = 97 \text{ mm}$
- Diámetro máximo en los dientes: $D_{M(1)} = D_{m(1)} + h_{r(1)} = 97 + 13 = 110 \text{ mm}$
- Paso mínimo de ranura: $\tau_{o(1)} = \frac{\pi \cdot D_{o(1)}}{n_1} = \frac{\pi \cdot 84}{36} = 7.33 \text{ mm}$
- Paso medio de ranura: $\tau_{m(1)} = \frac{\pi \cdot D_{m(1)}}{n_1} = \frac{\pi \cdot 97}{36} = 8.46 \text{ mm}$
- Paso máximo de ranura: $\tau_{M(1)} = \frac{\pi \cdot D_{M(1)}}{n_1} = \frac{\pi \cdot 110}{36} = 9.6 \text{ mm}$

- Anchura mínima de ranura: $a_{o(1)} = 3mm$
- Anchura media de ranura: $a_{m(1)} = \frac{a_{o(1)} + a_{M(1)}}{2} = \frac{3+6}{2} = 4.5mm$
- Anchura máxima de ranura: $a_{M(1)} = 6mm$
- Grosor mínimo del diente: $t_{o(1)} = \tau_{o(1)} - a_{o(1)} = 7.33 - 3 = 4.33mm$
- Grosor medio del diente: $t_{m(1)} = \tau_{m(1)} - a_{m(1)} = 8.46 - 4.5 = 3.96mm$
- Grosor máximo del diente: $t_{M(1)} = \tau_{M(1)} - a_{M(1)} = 9.6 - 6 = 3.6mm$
- Parámetro: $k_{io(1)} = k_{Fe(1)} \frac{\tau_{o(1)}}{t_{o(1)}} - 1 = 0.96 \frac{7.33}{4.33} - 1 = 0.625$
- Parámetro: $k_{im(1)} = k_{Fe(1)} \frac{\tau_{m(1)}}{t_{m(1)}} - 1 = 0.96 \frac{8.46}{3.96} - 1 = 2.05$
- Parámetro: $k_{iM(1)} = k_{Fe(1)} \frac{\tau_{M(1)}}{t_{M(1)}} - 1 = 0.96 \frac{9.6}{3.6} - 1 = 1.56$
- Inducción aparente teórica máxima en los dientes con tensión $U_1=220V$:

$$\widehat{B}'_{dMo} = K_{Fe(1)} \frac{\tau_{\delta(1)}}{t_{o(1)}} \widehat{B}_{\delta\infty} = 1.041 \frac{6.98}{4.33} 0.648 = 1.088T$$

▪ **Utilización de las ranuras**

- Sección de ranura (excepto cuña): $A_{r(1)} = h_{r(1)} \cdot a_{m(1)} = 13 \cdot 4.5 = 58.5mm^2$
- Sección del aislamiento de ranura y entre capas: devanado de una capa.
 $A_{ar(1)} = (2 \cdot h_{r(1)} + 3 \cdot a_{m(1)}) e_1 = (2 \cdot 13 + 3 \cdot 4.5) \cdot 0.4 = 15.8mm^2$
- Espacio libre para conductores aislados: $A'_{ca(1)} = A_{r(1)} - A_{ar(1)} = 58.5 - 15.8 = 42.7mm^2$
- Sección transversal prismática de los conductores aislados.

Hilos/ranura: 55 hilos ranura

Diámetro aislado del hilo = 0.7 mm

Sección cuadrada de un hilo aislado = 0.49mm²

Sección cuadrada del conjunto $A_{ca(1)} = 26.95mm^2$

- Factor de utilización del espacio disponible: $f_{o(1)} = \frac{A_{ca(1)}}{A'_{ca(1)}} = \frac{26.95}{42.7} = 0.63$
- Factor de utilización de la ranura: $f_{u(1)} = \frac{55 \cdot 0.49 \cdot 100}{100} = 26.9\%$

▪ **Cálculo del yugo (definitivo)**

- Inducción teórica admisible con la tensión U_1 : $\widehat{B}_{yo} \geq 1.6T = 1.5T$
- Altura del yugo: $h_y = \frac{K_{Fe(1)}}{2} \left(\frac{D}{p} \right) \frac{\widehat{B}_{\delta\infty}}{\widehat{B}_{yo}} = \frac{1.041}{2} \left(\frac{80}{1} \right) \frac{0.648}{1.5} = 18mm$
- Diámetro medio del yugo: $D_{ym} = D_{M(1)} + h_y = 13 + 18 = 31mm$
- Diámetro exterior del yugo: $D_{yM} = D_{M(1)} + 2h_y = 13 + 2 \cdot 18 = 49mm$
- Longitud media de las líneas de fuerza: $l_y \approx \frac{\pi \cdot D_{yM}}{4p} = \frac{\pi \cdot 49}{4 \cdot 1} = 38.48mm$

▪ **Entrehierro**

- Altura radial del entrehierro:

Para $D=8\text{cm}$ y $p=1$ par de polos, entonces $\delta=0.25\text{mm}$

Normal : $\delta=0.25\text{mm}$

Para $P=0.35\text{CV}$ y $p=1$ par de polos, entonces:

Re forzado : $\delta=0.45\text{mm}$

Elegimos para mayor seguridad mecánica y reducir al mismo tiempo la reactancia: $\delta=0.3\text{mm}$

▪ **Dimensiones complementarias del estator**

▪ **Longitud media de conductor**

- Salientes de manguito:

Manguito corto: $a_{c(1)} = 10 + 5.5 \cdot U = 10 + 5.5 \cdot 0.38 = 12.9\text{mm}$ adoptamos: $a_{c(1)} = 15\text{mm}$

Manguito largo: $a_{L(1)} = 15 + 7.5 \cdot U = 15 + 7.5 \cdot 0.38 = 17.85\text{mm}$ adoptamos: $a_{L(1)} = 20\text{mm}$

- Juego entre bobinas: $j_1 = 2.5 + 0.4U = 2.5 + 0.4 \cdot 0.38 = 2.65\text{mm}$ adoptamos: $j_1 = 3\text{mm}$
- Distancia entre fases: $c_1 = 4U = 4 \cdot 0.38 = 1.52\text{mm}$ adoptamos: $c_1 = 5\text{mm}$
- Distancias a masa: $b_1 = 5 \cdot U = 5 \cdot 0.38 = 1.9\text{mm}$ adoptamos: $b_1 = 10\text{mm}$
- Longitud media de las cabezas de bobina:

$$\text{Devanado de corona } (\tau): L_{cb(1)} \approx \frac{4 \cdot D_{m(1)}}{2 \cdot p} \approx \frac{4.5 \cdot D}{2p} = \frac{4.5 \cdot 8}{2 \cdot 1} = 18$$

- Longitud media de conductor: $l_{m(1)} = L + L_{cb(1)} = 70 + 18 = 88\text{mm}$

▪ **Vuelo de las cabezas de bobina.**

- Saliente de bobina:

Devanado de corona: $v_1 = (3 \cdots 5)h_{l(1)} = 3 \cdot 1.5 = 4.5\text{mm}$

▪ **Constantes óhmicas del estator.**

▪ **Resistencia y pérdidas óhmicas a 75°C.**

- Resistividad a 75°C: $\rho_1 = \frac{1}{58} = 0.0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

- Pérdidas relativas por efecto Joule y caída óhmica:

$$\dot{p}_{J(1)-\text{anillos}} = \dot{u}_{R(1)-\text{anillos}} = \frac{R_1 \cdot I_1}{U_1} 100 = \frac{270 \cdot \rho_1}{\xi_1 D} \left(\frac{l_{m(1)}}{L} \right) \frac{\Delta_1}{\widehat{B}_{\infty}} = \frac{270 \cdot \frac{1}{58}}{0.827 \cdot 8} \left(\frac{\frac{88}{70}}{\frac{3000}{1000}} \right) \frac{4.250}{0.648} = 1.95\%$$

$$\dot{p}_{J(1)-\text{sin anillos}} = \dot{u}_{R(1)-\text{sin anillos}} = \frac{R_1 \cdot I_1}{U_1} 100 = \frac{270 \cdot \rho_1}{\xi_1 D} \left(\frac{l_{m(1)}}{L} \right) \frac{\Delta_1}{\widehat{B}_{\infty}} = \frac{270 \cdot \frac{1}{58}}{0.827 \cdot 8} \left(\frac{\frac{88}{70}}{\frac{3000}{1000}} \right) \frac{3.722}{0.580} = 1.89\%$$

- Pérdidas relativas por efecto Joule y caída óhmica absoluta:

$$u_{R(1)} = R_1 \cdot I_1 = \dot{u}_{R(1)} \frac{U_1}{100} = 1.95 \frac{220}{100} = 4.29\text{V} / \text{fase}$$

$$p_{J(1)} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \dot{p}_{J(1)} \frac{p_b}{100} = 1.95 \frac{965}{100} = 18.81\text{W}$$

- Resistencia óhmica del arrollamiento: $R_1 = \frac{u_{R(1)}}{I_1} = \frac{4.29}{1.410} = 3.06\Omega$ a 75°C

- Pérdidas adicionales en el cobre del estator. (con 55 hilos distribuidos en 11 estratos de 5 hilos cada uno)**

En las barras individuales

- Altura de una barra: $h_{c(1)} = 0.7\text{mm}\Phi$
- Número de estratos por ranura: $\nu_1 = 11$
- Altura de cobre por ranura: $H_{c(1)} = \nu_1 \cdot h_{c(1)} = 11 \cdot 0.9 = 10\text{mm}$
- Altura de la bobina por ranura: $H_1 \approx 15\text{mm}$
- Ancho de cobre por ranura: $a_{c(1)} = u_1 \cdot b_{c(1)} = 5 \cdot 0.7 = 3.5\text{mm}$

- Resistividad a 75°C : $\rho_1 = \frac{1 \Omega \cdot \text{mm}^2}{58 \text{ m}}$

- Parámetro α_1 (tomado para a_l la anchura media de ranura):

$$\alpha_1 = 0.2\pi \sqrt{\frac{H_{c(1)} \cdot a_{c(1)} \cdot f}{H_1 \cdot a_1 \cdot 1000 \rho_1}} = 0.2\pi \sqrt{\frac{10 \cdot 3.5 \cdot 50 \cdot 58}{15 \cdot 4.5 \cdot 1000}} = 1.286\text{cm}^{-1}$$

- Altura ficticia: $\zeta_1 = \alpha_1 \cdot h_{c(1)} = 1.286 \cdot 0.7 = 0.9\text{cm}$

- Factor de corrección por acortamiento de paso: para $\frac{\gamma_{n(1)}}{n_{p(1)}} = \frac{12}{18} = 0.827$

- Longitud axial efectiva en la dispersión de ranuras:

Para $\varepsilon_{o(1)} = 4\text{mm}$ y $a_{m(1)} = 4.5\text{mm}$, entonces, $\varepsilon_{n(1)} = 1.45\text{mm}$

$$L_{n(1)} = L - n_{c(1)} \cdot \varepsilon_{n(1)} = 70 - 1.45 \cdot 1 = 68.2\text{cm}$$

- Incremento de pérdidas en las barras individuales a 75°C :

Simple capa: $k_1 = \left(\frac{\nu_1 - 0.2}{9} \zeta_1^4 \right) \frac{L_{n(1)}}{l_{m(1)}} = 0.59$ por ser los conductores de hilo.

- Incremento de pérdidas entre las barras en paralelo a 75°C .

$$k'_1 = \left(\frac{\nu_1^2 - 1}{9} k_{y(1)} \cdot \zeta_1^4 \right) \frac{L_{n(1)}}{l_{m(1)}} = \left(\frac{11^2 - 1}{9} \right) 0.92 \cdot 0.3^4 \frac{68.4}{88} = 0.082$$

Por ser redondos los conductores: $k'_1 = 0.082 \cdot 0.59 = 0.041$ valor despreciable.

- Incremento relativo de caída de resistencia y de pérdidas en el devanado.

A 75°C $k_I = 0$

- Caída de tensión y pérdidas en la resistencia del estator**

- A 75°C , $k_I = 0$.

$$\dot{u}_{R(1)} = (1 + k_1) \cdot \dot{u}_{R(1)} = (1 + 0.59) \cdot 1.95 = 3.10\% \text{ de } U_1$$

$$\dot{p}_{J(1)} = (1 + k_1) \cdot \dot{p}_{J(1)} = (1 + 0.59) \cdot 1.95 = 3.10\% \text{ de } P_1$$

$$u_{R(1)} = R_1 \cdot I_1 = \dot{u}_{R(1)} \frac{U_1}{100} = 3.1 \frac{220}{100} = 6.82 \text{ V/fase}$$

$$p_{J(1)} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \dot{p}_{J(1)} \frac{P_b}{100} = 3.1 \frac{965}{100} = 29.9 \text{ W/fase}$$

- A 20°C , $k_I = 0$, $k_{\theta I} = 0.82$.

$$\dot{i}_{R(1)} = \left[1 + \left(\frac{k_1}{k_{\theta(1)}} \right)^2 \right] (k_{\theta(1)} \cdot \dot{i}_{R(1)}) = \left[1 + \left(\frac{0}{0.82} \right)^2 \right] (0.82 \cdot 1.95) = 1.60\% \text{ de } U_1$$

$$\dot{p}_{R(1)} = \left[1 + \left(\frac{k_1}{k_{\theta(1)}} \right)^2 \right] (k_{\theta(1)} \cdot \dot{p}_{J(1)}) = \left[1 + \left(\frac{0}{0.82} \right)^2 \right] (0.82 \cdot 1.95) = 1.60\% \text{ de } P_1$$

$$u_{R(1)} = R_1 \cdot I_1 = \dot{i}_{R(1)} \frac{U_1}{100} = 6.17 \cdot 1.408 = 1.60 \frac{220}{100} = 3.52V / \text{fase}$$

$$p_{J(1)} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \dot{p}_{J(1)} \frac{P_b}{100} = 1.60 \cdot \frac{965}{100} = 15.44W \text{ totales}$$

- A la temperatura de servicio $\vartheta=115^\circ\text{C}$, $k_I=0$ y $k_{\delta I}=1.13$

$$\dot{i}_{R(1)} = \left[1 + \left(\frac{k_1}{k_{\theta(1)}} \right)^2 \right] (k_{\theta(1)} \cdot \dot{i}_{R(1)}) = \left[1 + \left(\frac{0}{1.13} \right)^2 \right] (1.13 \cdot 1.95) = 2.20\% \text{ de } U_1$$

$$\dot{p}_{R(1)} = \left[1 + \left(\frac{k_1}{k_{\theta(1)}} \right)^2 \right] (k_{\theta(1)} \cdot \dot{p}_{J(1)}) = \left[1 + \left(\frac{0}{1.13} \right)^2 \right] (1.13 \cdot 1.95) = 2.20\% \text{ de } P_1$$

$$u_{R(1)} = R_1 \cdot I_1 = \dot{i}_{R(1)} \frac{U_1}{100} = 2.20 \frac{220}{100} = 4.84V$$

$$p_{J(1)} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \dot{p}_{J(1)} \frac{P_b}{100} = 2.2 \frac{965}{100} = 21.23kW$$

- **Constantes inductivas del estator**

- **Dispersiones de flujo en las cabezas de bobina**

$$\lambda_{Cb} = n_{pf} \left(0.67 \frac{L_{cb}}{L} - 0.43 \frac{y_n \cdot \tau_m}{L} \right) = 6 \left(0.67 \frac{8}{7.27} - 0.43 \frac{12 \cdot 0.698}{7.28} \right) = 1.455 \left[\frac{\text{M/Gb}}{\text{cm}} \right] = 1.828 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Wb/Av}}{\text{m}} \right]$$

N_{pf} = número de ranuras por polo y fase = 6

L_{cb} = Longitud de cabezas de bobinas = $8 \cdot R / 2p = 8 \cdot 4 / 2 = 8$ cm

R = radio del estator = 4cm.

$2p$ = número de polos = 2

Y_n = paso de bobina: calculado en el capítulo I (estatores) = 15

τ_m = paso medio de ranuras (cm) = $2\pi \cdot R / n = 2 \cdot \pi \cdot 4 / 36 = 0.698$ cm

n = número de ranuras = 36

L = longitud del rotor = 7.27 cm

- **Dispersiones de flujo en Zig-Zag**

$$\lambda_z = \frac{n_p \cdot \tau_p}{\pi^2 \delta \cdot K_C \cdot k_s \cdot K_L} \sum \left(\frac{\xi_v}{v} \right)^2$$

n_p = número de ranuras por polo.

τ_p = paso polar en cm = $2\pi \cdot R_{\text{estator}} / 2$

δ = entrehierro en cm.

$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2}$ Factor de Carter (tanto del estator como del rotor)

$$K_{C1} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}} \qquad K_{C2} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}}$$

a_{δ} = anchura de salida de la ranura.

$k_s = 1.33$ (normalmente)

K_L = factor de longitud del rotor, $K_L = 1/(K_{Fe} \cdot K_v) = 1/K_{Fe}$ ya que $K_v = 1$ al no tener canales de ventilación.

ξ_v = factor de bobinado para el (v) armónico.

v = armónico.

$$\sum \left(\frac{\xi_v}{v} \right)_{jaula}^2 = \sum \left(\frac{1}{\frac{n_{ranuras-rotor} \cdot v \pm 1}{p}} \right)^2 \qquad \sum \left(\frac{\xi_v}{v} \right)_{chapas}^2 = \sum \left(\frac{1}{\frac{n_{chapas} \cdot v \pm 1}{p}} \right)^2$$

p = pares de polos.

▪ **Motor de jaula:**

$n_p = 18$

τ_p = paso polar en cm = $2\pi \cdot R_{estator} / 2 = 2 \cdot \pi \cdot 4 / 2 = 12.56$ cm

δ = entrehierro en cm = 0.03cm.

$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2}$ Factor de Carter (tanto del estator como del rotor)

$$K_{C1} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{36}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{36} + 0.3 - \frac{3}{4} \cdot 2.5} = 1.29$$

$$K_{C2} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{\delta}} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{26}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{26} + 0.3 - \frac{3}{4} \cdot 1} = 1.05$$

$$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2} = 1.29 \cdot 1.05 = 1.35$$

a_{δ} = anchura de salida de la ranura (1 mm tomado de las ranuras del estator).

$k_s = 1.33$ (normalmente)

K_L = factor de longitud del rotor, $K_L = 1/(K_{Fe} \cdot K_v) = 1/K_{Fe} = 1.03$. ($K_{Fe} = 0.975$ factor de empilado)

ξ_v = factor de bobinado para el (v) armónico.

v = armónico.

$$\lambda_z = \frac{n_p \cdot \tau_p}{\pi^2 \cdot \delta \cdot K_C \cdot k_s \cdot K_L} \sum \left(\frac{1}{\frac{n_{ranuras-rotor} \cdot v \pm 1}{p}} \right)^2 = \frac{18 \cdot 12.56}{\pi^2 \cdot 0.03 \cdot 1.35 \cdot 1.33 \cdot 1.03} \cdot 0.0057 = 2.35 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 2.953 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

▪ **Motor de chapas tipo-A:**

$n_p = 18$

τ_p = paso polar en cm = $2\pi \cdot R_{estator} / 2 = 2 \cdot \pi \cdot 4 / 2 = 12.56$ cm

δ = entrehierro en cm = 0.03cm.

$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2}$ Factor de Carter (tanto del estator y del rotor)

a_{δ} = anchura de salida de la ranura (en este caso será el espesor de la chapa 0.5 mm).

$k_s = 1.33$ (normalmente)

$K_L =$ factor de longitud del rotor, $K_L = 1/(K_{Fe} \cdot K_v) = 1/K_{Fe} = 1.03$. ($K_{Fe} = 0.975$ factor de empilado)

$\xi_v =$ factor de bobinado para el (v) armónico.

$v =$ armónico.

$$K_{C1} = \frac{\tau_\delta}{\tau_\delta + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_\delta} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_\delta} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{36}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{36} + 0.3 - \frac{3}{4} \cdot 2.5} = 1.29$$

$$K_{C2} = \frac{\tau_\delta}{\tau_\delta + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_\delta} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{estator}}{n} + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_\delta} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{26}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 40}{26} + 0.3 - \frac{3}{4} \cdot 0.5} = 1.08$$

$$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2} = 1.29 \cdot 1.08 = 1.39$$

Por tanto tendremos:

$$\lambda_z = \frac{n_p \cdot \tau_p}{\pi^2 \delta \cdot K_C \cdot k_s \cdot K_L} \sum \left[\frac{1}{\frac{n_{ranuras-rotor} \cdot v \pm 1}{p}} \right]^2 = \frac{18 \cdot 12.56}{\pi^2 \cdot 0.03 \cdot 1.39 \cdot 1.33 \cdot 1.03}$$

$$\left[\left(\frac{1}{\frac{150}{1} \cdot 1 \pm 1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\frac{150}{1} \cdot 2 \pm 1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\frac{150}{1} \cdot 3 \pm 1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\frac{150}{1} \cdot 4 \pm 1} \right)^2 \right] = 0.0252 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 3.167 \cdot 10^{-8} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

▪ **Dispersiones de flujo en las ranuras**

$$\lambda = \frac{h_{ranura}}{3 \cdot a_{ancho-ranura}}$$

$h_{ranura} =$ altura de la ranura del rotor.

$$\lambda_{jaula} = \frac{h_{ranura}}{3 \cdot a_{ancho-ranura}} = \frac{15.2}{3 \cdot 5} = 1.01 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 1.269 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

$$\lambda_{chapas} = \frac{h_{ranura}}{3 \cdot a_{ancho-ranura}} = \frac{4.58}{3 \cdot 0.5} = 3.05 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 3.833 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

▪ **Dispersiones de flujo totales**

$$\lambda_{total-jaula} = \lambda_z + \lambda + \lambda_{CB} = 1.455 + 2.35 + 1.01 = 4.815 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 6.051 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

$$\lambda_{total-chapas} = \lambda_z + \lambda + \lambda_{CB} = 1.455 + 0.0252 + 3.05 = 4.5302 \left[\frac{M/Gb}{cm} \right] = 5.693 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Wb/Av}{m} \right]$$

▪ **Caída de reactancia estática**

▪ Caídas de reactancia:

▪ **Motor jaula**

$$\dot{e}_{X(1)} = \frac{E_{X(1)}}{U_1} 100 = \frac{5.58}{\xi_1 \cdot m_1 \cdot n_{pf(1)}} \cdot \left(\frac{q_1}{100} \right) \frac{\lambda_{X(1)}}{\widehat{B}_{\infty}} = \frac{5.58}{0.827 \cdot 3 \cdot 6} \cdot \left(\frac{109}{100} \right) \frac{4.485}{0.648} = 2.830\% \text{ de } U_1$$

$$E_{X(1)} = \dot{e}_{X(1)} \frac{U_1}{100} = 2.830 \frac{220}{100} = 6.22V / \text{fase}$$

▪ **Motor chapas con anillos**

$$\dot{e}_{X(1)} = \frac{E_{X(1)}}{U_1} 100 = \frac{5.58}{\xi_1 \cdot m_1 \cdot n_{pf(1)}} \cdot \left(\frac{q_1}{100} \right) \frac{\lambda_{X(1)}}{\widehat{B}_{\infty}} = \frac{5.58}{0.827 \cdot 3 \cdot 6} \cdot \left(\frac{109}{100} \right) \frac{4.532}{0.648} = 2.857\% \text{ de } U_1$$

$$E_{X(1)} = \dot{e}_{X(1)} \frac{U_1}{100} = 2.857 \frac{220}{100} = 6.27V / \text{fase}$$

▪ **Motor chapas sin anillos**

$$\dot{e}_{X(1)} = \frac{E_{X(1)}}{U_1} 100 = \frac{5.58}{\xi_1 \cdot m_1 \cdot n_{pf(1)}} \cdot \left(\frac{q_1}{100} \right) \frac{\lambda_{X(1)}}{\widehat{B}_{\infty}} = \frac{5.58}{0.827 \cdot 3 \cdot 6} \cdot \left(\frac{95.3}{100} \right) \frac{4.532}{0.580} = 2.791\% \text{ de } U_1$$

$$E_{X(1)} = \dot{e}_{X(1)} \frac{U_1}{100} = 2.791 \frac{220}{100} = 6.140V / \text{fase}$$

▪ **F.e.m. a plena carga estator con rotor con anillos**

▪ **Motor jaula**

▪ F.e.m. relativa y absoluta: $\dot{E} \approx 100 - \dot{i}_{R(1)} \cdot \cos \varphi - \dot{e}_{X(1)} \cdot \text{sen} \varphi = 100 - 1.90 \cdot 0.52 - 2.830 \cdot 0.85 = 96.6\%$

$$E = 0.966 \cdot 220 = 212.5V / \text{fase}$$

▪ **Motor chapas con anillos**

▪ F.e.m. relativa y absoluta: $\dot{E} \approx 100 - \dot{i}_{R(1)} \cdot \cos \varphi - \dot{e}_{X(1)} \cdot \text{sen} \varphi = 100 - 1.95 \cdot 0.52 - 2.857 \cdot 0.85 = 96.56\%$

$$E = 0.9656 \cdot 220 = 212.4V / \text{fase}$$

▪ **Motor chapas sin anillos**

▪ F.e.m. relativa y absoluta: $\dot{E} = 100 - \dot{i}_{R(1)} \cdot \cos \varphi - \dot{e}_{X(1)} \cdot \text{sen} \varphi = 100 - 1.89 \cdot 0.52 - 2.791 \cdot 0.85 = 96.64\%$

$$E = 0.9664 \cdot 220 = 212.6V / \text{fase}$$

6.2.1.2 Bobinados utilizados

La elección del tipo de bobinado^{L-30} se realizó en función de que las características eléctricas y magnéticas fueran lo más parecidas posibles a las obtenidas con otros motores los cuales también fueron rebobinados a posteriori.

La elección no fue fácil ya que dada la idéntica geometría del estator para los cuatro motores (1000, 1500, 1500-A, y 3000 rpm), intentar que las inducciones de flujo magnético, índices de saturación, o densidades de corriente fueran equivalentes y permitieran su posterior comparación requería el empleo de conductores, aislantes, número de espiras por ranura, tipo de bobinado, capas, etc. muy específicos.

En el apartado 3.2, del capítulo III, de esta obra se detallan los cuatro bobinados escogidos para sendos motores con sus características principales, remitiendo al lector al citado apartado para su consulta. En

esta sección solamente se analizará el bobinado correspondiente al motor de 3000 rpm, que es el motor objeto de estudio en este capítulo.

6.2.1.2.1 Bobinado del estator a 3000 rpm

El bobinado que incorpora el motor rebobinado a 3000 rpm es un bobinado^{L-30} concéntrico por polos de una capa, con un número de espiras por ranura de 55, sin problemas magnéticos de saturación. El número de bobinas es de 18, dispuestas en 6 grupos con lo que el número de bobinas por grupo es de 3, con una amplitud del grupo de 12. El diámetro del hilo de cobre escogido es de 0.70 mm con una cubierta grado 2 de clase H esmaltada de 0.05 mm.

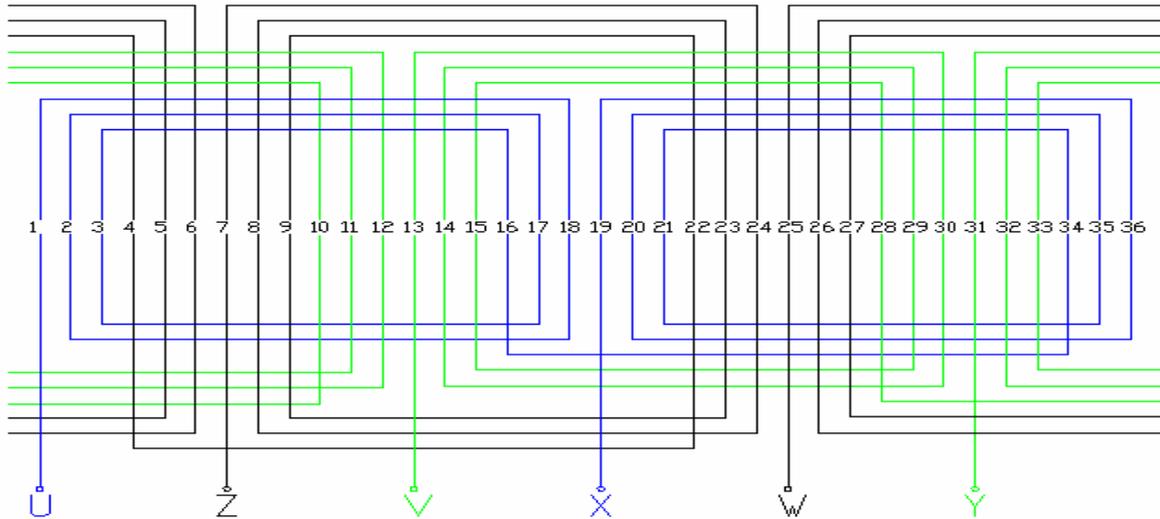


Figura 6.1. Bobinado concéntrico por polos con 18 bobinas correspondiente al motor de 3000 rpm.

Los cálculos de los diferentes parámetros y magnitudes que intervienen en este motor^{M-10} quedan reflejados en la siguiente tabla, donde en la primera fila se incluyen las especificaciones técnicas dadas en la placa de características original.

<i>Motor 3Ph</i>	<i>TYPE: T 90S-4-AB3</i>	<i>IP55 IS. CL-F IEF 34-1</i>	<i>Número: 9122258</i>
<i>Tipo de bobinado</i>	Bobinado concéntrico por polos con 36 ranuras y 2 polos		
<i>Forma</i>	Concéntrico por polos con bobinas distribuidas en una capa		
<i>Número ranuras</i>	$K=36$		
<i>Número de polos</i>	$2p=2$		
<i>Número de fases</i>	$Q=3$		
<i>Número de ranuras por polo y fase</i>	$K_{pq} = \frac{K}{2pq} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6$		
<i>Número de bobinas</i>	$B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18$		
<i>Grupos de bobinado</i>	$G = 2pq = 2 \cdot 3 = 6$		
<i>Número de bobinas por grupo</i>	$U = \frac{B}{G} = \frac{18}{6} = 3$		
<i>Amplitud del grupo</i>	$M=(q-1) \cdot 2U=(3-1) \cdot 2 \cdot 3=12$		
<i>Pasos de bobina</i>	$Y_{1B}=1-18 \quad Y_{2B}=2-17 \quad Y_{3B}=3-16$		
<i>Paso de principios</i>	$Y_{120} = \frac{K}{3 \cdot p} = \frac{36}{3 \cdot 1} = 12$		
<i>Principios bobinas</i>	$U-1; \quad V-13; \quad W-25$		
<i>Tipo hilo</i>	Cobre esmaltado de 0.70mm de diámetro con 55 espiras por ranura		

Inducción en el entrehierro (T)	$B_e = \frac{V_{fase} \cdot P_{pares-polos}}{4.44 \cdot f \cdot D_{rotor} \cdot L_{long-núcleo} \cdot K_{bobinado} \cdot N_{espiras-fase}} = \frac{220 \cdot 1}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.08 \cdot 0.0704 \cdot 0.956 \cdot 6 \cdot 55} = 0.5580T$
Inducción en la corona (T)	$B_c = \frac{1.05 \cdot D_{rotor}}{p_{polos} \cdot h_{corona}} B_e = \frac{1.05 \cdot 80}{2 \cdot 12} \cdot 0.558 = 1.336T$
Espiras por bobina	$N_e = 55$
Velocidad (rpm)	$N = 2840$ (2810 valor real)
Frecuencia (Hz)	50 (50 valor real)
Tensión Y-Δ (V)	380-410/220-240
Potencia útil (CV/W)	1.5/1100 (1105 valor real)
Potencia total (W)	1400 valor real
Intensidad Y-Δ (A)	3.7-6.4 (2.4-4.2 valor real)
Par nominal (N·m)	$T_n = \frac{P_{util}}{n \cdot \frac{2\pi}{60}} = \frac{1100}{2840 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 3.70$ (3.70 valor real)
Cos φ	0.78 (0.90 valor real)
Rendimiento (%)	78.2 valor real
Par/In (N·m/A)	1.56 valor real
Par/Pabs (N·m/W)	0.0026 valor real

Tabla VI.I. Datos técnicos del motor a 3000 rpm.

Con la inclusión de este bobinado se consiguió que las inducciones en el entrehierro y en la cabeza de la corona se mantuvieran dentro de valores aceptables, no saturándose en motor salvo en condiciones muy específicas. Aparte, como puede apreciarse en la tabla, una vez efectuados los ensayos experimentales, puede comprobarse que los valores (si exceptuamos una ligera variación del valor de la intensidad y del cos φ) son muy similares a los obtenidos mediante los ensayos realizados en los laboratorios. Finalmente también se han añadido algunas otras magnitudes halladas también en los ensayos para tener un mayor conocimiento de la respuesta del motor en sus condiciones de funcionamiento normal.

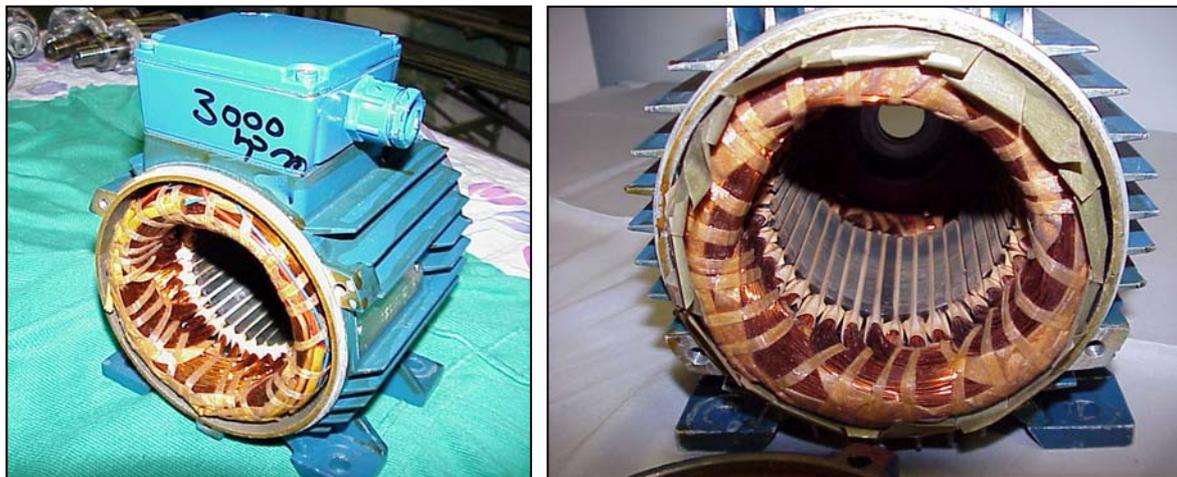


Figura 6.2. Vistas del motor bobinado a 3000 rpm. Obsérvese la configuración del bobinado.

6.2.1.3 Ecuaciones que definen la geometría del rotor de chapas tipo A

Si bien los estatores sólo sufrieron ligeras modificaciones para adaptarlos a sus nuevos regímenes de funcionamiento, en el caso de los rotores, si exceptuamos el de jaula de ardilla que ya venía con los motores originales, el resto fueron construidos totalmente, tanto los macizos con y sin aros, como el hueco diamagnético, como los rotores de chapas objeto de estudio.

Las ecuaciones convencionales^{L-16} aplicables al rotor de jaula de ardilla, no son aplicables o sólo en parte cuando el rotor está constituido por chapas enrolladas alrededor del eje. De alguna forma, podemos considerar un paralelismo entre las ranuras del rotor de jaula con los espacios con aire que

quedan entre las chapas en espiral, asimismo, las varillas del rotor de jaula tienen su equivalencia en las propias chapas del rotor estudiado.

Como en el caso del estator se parte de unos datos de potencias, rendimientos, factores de potencia, etc. que han sido obtenidos mediante los ensayos experimentales del motor de 3000 rpm con el rotor de chapas tipo A. A partir de estos datos se han aplicado las ecuaciones correspondientes obteniéndose diversas magnitudes eléctricas, número de conductores, inducciones en diversos puntos del estator, etc. Cada una de estos parámetros son cotejados con los que se obtuvieron experimentalmente.

▪ Rotor de chapas tipo A (3000 rpm)

▪ Datos fundamentales

- Número de chapas: $n_{(2)} = 150$ chapas
- Rendimiento mecánico: $\eta_m = 0.57$
- Deslizamiento: $s = 0.033(3.33\%)$
- Paso de ranuras referido al diámetro exterior del entrehierro (entre chapa y chapa):

$$\tau_{s(2)} = \frac{\pi \cdot D}{n_2} = \frac{\pi \cdot 80}{150} = 1.675 \text{ mm}$$

- Factor de distribución:

$$\xi_{dv-2} = \frac{\text{sen}\left(v \frac{90^\circ}{m_2}\right)}{n_{pf} \cdot \text{sen}\left(v \frac{90^\circ}{m_2 \cdot n_{pf-2}}\right)} = \frac{\text{sen}\left(1 \frac{90^\circ}{75}\right)}{1 \cdot \text{sen}\left(1 \frac{90^\circ}{(75 \cdot 1)}\right)} = \frac{\text{sen}(1.2)^\circ}{1 \cdot \text{sen}(1.2)^\circ} = 1$$

Con:

$n_2 =$ número total de ranuras del rotor = número de chapas del rotor = 150

$2 \cdot p =$ número de polos = 2

$v =$ orden del armónico (1, para la onda fundamental)

$m_2 =$ número de fases del rotor = $(Z_2/2 \cdot p) = (n_2/2 \cdot p) = (150/2) = 75$

$n_{pf-2} =$ número de ranuras por polo y fase = $(n_2/(2p \cdot m_2)) = 150/(2 \cdot 75) = 1$

- Factor de paso:

$$\xi_{yv-2} = \cos\left[v \left(1 - \frac{y_{n-2}}{n_{p-2}}\right) 90^\circ\right] = \cos\left[1 \left(1 - \frac{74}{75}\right) 90^\circ\right] = 0.998$$

Con:

$y_n =$ paso medio de ranuras = $(m_2 - 1) \cdot 2 \cdot U = (m_2 - 1) \cdot 2 \cdot ((n_2/2)/(2p \cdot m_2)) = (150 - 1) \cdot 2 \cdot ((150/2)/(2 \cdot 75)) = 74$

$n_{p-2} =$ número de ranura por polo = $(n_2/2 \cdot p) = (150/2) = 75$

- Factor total:

$$\xi_2 = \xi_{d2} \cdot \xi_{y2} = 1 \cdot 0.998 = 0.998$$

- Potencia eléctrica del rotor.

$$P_{12} = \frac{P_{total}}{\eta(1-s)} = \frac{275}{0.57(1-0.033)} = 500 \text{ W}$$

- Corriente de carga primaria pasada al rotor.

$$I'_2 = \frac{P_{12}}{m_1 \cdot E \cdot \cos \varphi_2} = \frac{500}{3 \cdot 212 \cdot 0.32} = 2.46 \text{ A / fase}$$

- Intensidad de las chapas.

$$I_{chapas} = I_2' \frac{Z_1 \xi_1}{n_2 \xi_2} = 2.46 \frac{1980 \cdot 0.827}{150 \cdot 0.998} = 26.85 A / chapa$$

- Longitud de las chapas:

$$L_2 = \frac{R_E^2 - R_i^2}{2 \cdot R_i} = \frac{40^2 - 15^2}{2 \cdot 15} = 45.83 mm$$

- Superficie media chapas:

$$s_x = L_2 \cdot e_{chapas} = 45.83 \cdot 0.5 = 22.91 mm^2$$

- Densidad media de las chapas:

$$\bar{J}_{chapas} = \frac{I_{chapas}}{s_x} = \frac{26.85}{22.91} = 1.17 A / mm^2$$

- Densidad máxima de las chapas (cuando el radio de cálculo es igual a R_E):

$$\bar{J}_{2-m\acute{a}x} = 2.5 A / mm^2 \text{ según programa}$$

- Densidad mínima de las chapas (cuando el radio de cálculo es igual a R_i):

$$\bar{J}_{2-m\acute{a}x} = 0.01 A / mm^2 \text{ según programa}$$

- Densidad de corriente en los anillos:

$$\bar{J}_{anillos} = 4 A / mm^2 \text{ al ser de Al}$$

- Densidad referida al primario:

$$\bar{J}_{1-2} = \bar{J}_b \frac{I_1}{I_2'} = 1.14 \frac{1.410}{2.46} = 0.653 A / mm^2$$

- Superficie anillos:

$$S_{anillos} = \frac{I_{rotor}}{\bar{J}_{anillos}} = a \cdot b = 7.5 \cdot 5 = 37.5 mm^2$$

- Corriente por chapa que se deriva hacia los anillos:

$$I_{chapa-anillo} = 0.10 \cdot I_{chapa} = 0.10 \cdot 26.85 = 2.685 A$$

- Corriente en los anillos:

$$I_{anillos} = \frac{n_2 \cdot I_{chapas-anillos}}{2 \cdot \pi \cdot 2p} = \frac{150 \cdot 2.685}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 65 A$$

○ Constantes óhmicas

- Longitud activa de los anillos:

$$L_a = 8 \cdot 2 = 16 mm$$

- Longitud efectiva del rotor:

$$L_b = L + L_a = 72 + 16 = 88 mm$$

- Caída de tensión en el rotor:

$$u_{r21} = \frac{R_2' \cdot I_1}{U_1} = \frac{270 \cdot \rho_1}{\xi_2 \cdot D} \frac{L_b}{N_1} \frac{\Delta_{21}}{\hat{B}_\delta} = \frac{270 \cdot 0.0172}{0.998 \cdot 8} \frac{88}{3000} \frac{0.653}{0.648} = 0.195\%$$

- Resistencia del rotor:

$$R_2' = \frac{u_{r21} \cdot U_1}{I_1} = \frac{0.195 \cdot 220}{1.408} = 30.53 \Omega \quad R_2 = R_2' \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{Z_2 \cdot \xi_2}{Z_1 \cdot \xi_1} \right)^2 = 30.53 \left(\frac{150 \cdot 0.998}{1980 \cdot 0.827} \right)^2 = 0.255 \Omega$$

- **F.e.m. a plena carga**

- **Motor jaula**

- F.e.m. relativa y absoluta: $E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{m_1}{m_2}\right) \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot \xi_2}{Z_1 \cdot \xi_1}\right) = 212.5 \cdot \left(\frac{3}{75}\right) \cdot \left(\frac{150 \cdot 0.998}{1980 \cdot 0.827}\right) = 0.7770V$
 $\dot{E}_2 = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \cdot 100 = \left(\frac{0.7770}{212.5}\right) \cdot 100 = 0.365\%$

- **Motor chapas con anillos**

- F.e.m. relativa y absoluta: $E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{m_1}{m_2}\right) \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot \xi_2}{Z_1 \cdot \xi_1}\right) = 212.4 \cdot \left(\frac{3}{75}\right) \cdot \left(\frac{150 \cdot 0.998}{1980 \cdot 0.827}\right) = 0.7767V$
 $\dot{E}_2 = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \cdot 100 = \left(\frac{0.7767}{212.4}\right) \cdot 100 = 0.366\%$

- **Motor chapas con anillos**

- F.e.m. relativa y absoluta: $E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{m_1}{m_2}\right) \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot \xi_2}{Z_1 \cdot \xi_1}\right) = 212.6 \cdot \left(\frac{3}{75}\right) \cdot \left(\frac{150 \cdot 0.998}{1980 \cdot 0.827}\right) = 0.7774V$
 $\dot{E}_2 = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \cdot 100 = \left(\frac{0.7774}{212.6}\right) \cdot 100 = 0.365\%$

6.2.2 Optimización de los materiales

Hasta aquí hemos dado las ecuaciones y parámetros constructivos tanto del estator como del rotor, indicándose, asimismo, el bobinado correspondiente con sus características más relevantes. Pero aunque se han nombrado los materiales constructivos no se han tratado en profundidad.

En esta sección se detallarán tanto gráficamente como mediante tablas las características más remarcables de cada uno de los materiales^{L-15} constructivos utilizados en el diseño del estator y de alguno de los rotores, se ha intentado simplificar al máximo su representación siempre que sea posible, ya que estos materiales, en general, son de uso común y por tanto, consultables en catálogos comerciales.

6.2.2.1 Materiales constructivos del estator

6.2.2.1.1 Chapas núcleo estator

Las chapas^{M-7} que forman el estator disponen de las características generales garantizadas que seguidamente se exponen. Aparte estas características se corresponden con las principales normas.

Espesor (mm)	Calidad Selon NF C 28900-oct /83 EURONORM 106.84	Propiedades garantizadas							Masa volumétrica norma kg/dm ³	
		Pérdidas totales máximas en W/kg a 50Hz		Inducción magnética mínima en Teslas para una chapa (AC o DC) (A/m)			Anisotropía de las partes % máxima	Funcionamiento mínimo		Número de pliegues mínimo
		1 T	1.5 T	2500	5000	10000				
0.5	FeV-350-50HA	1.5	3.5	1.5	1.6	1.71	±14	0.97	5	7.65

Tabla VI.II. Propiedades generales de la chapa utilizada en el estator.

En cuanto a sus características mecánicas^{M-7} podemos destacar las mostradas en la siguiente tabla, en la cual, y para el espesor de 0.5 mm nos indica la calidad, límites elásticos, durezas y resistencias a la ruptura.

Espesor (mm)	Calidad	Resistencia a la ruptura (N/mm ²)	Límite de elasticidad (N/mm ²)	Elongación 80mm (%)	Dureza Hv 5
0.5	FeV 350-50 HA	460-500	330-380	20-30	160-180

Tabla VI.III. Propiedades mecánicas de la chapa utilizada en el estator.

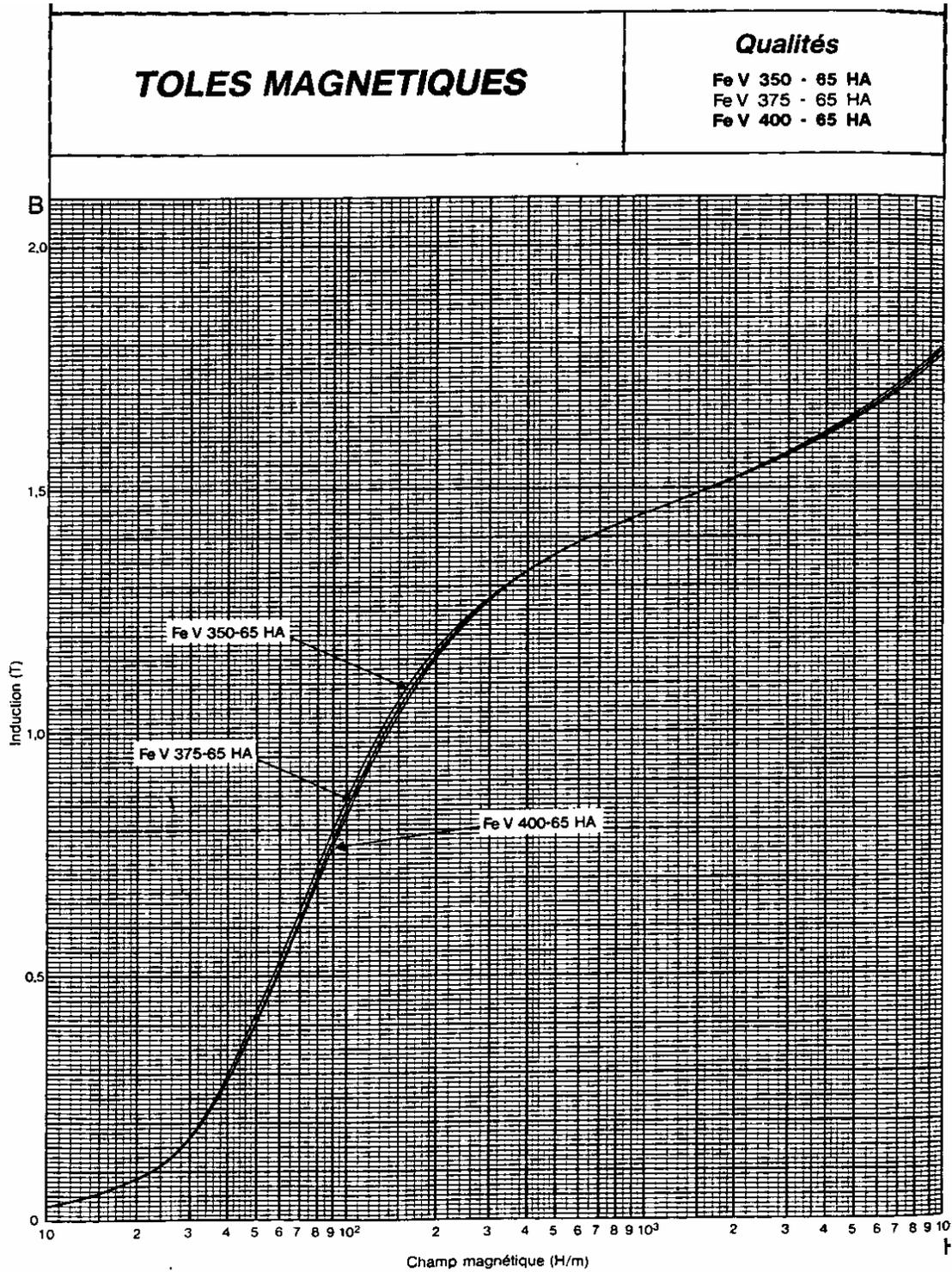


Figura 6.3. Chapa magnética del estator. Inducción versus campo magnético.

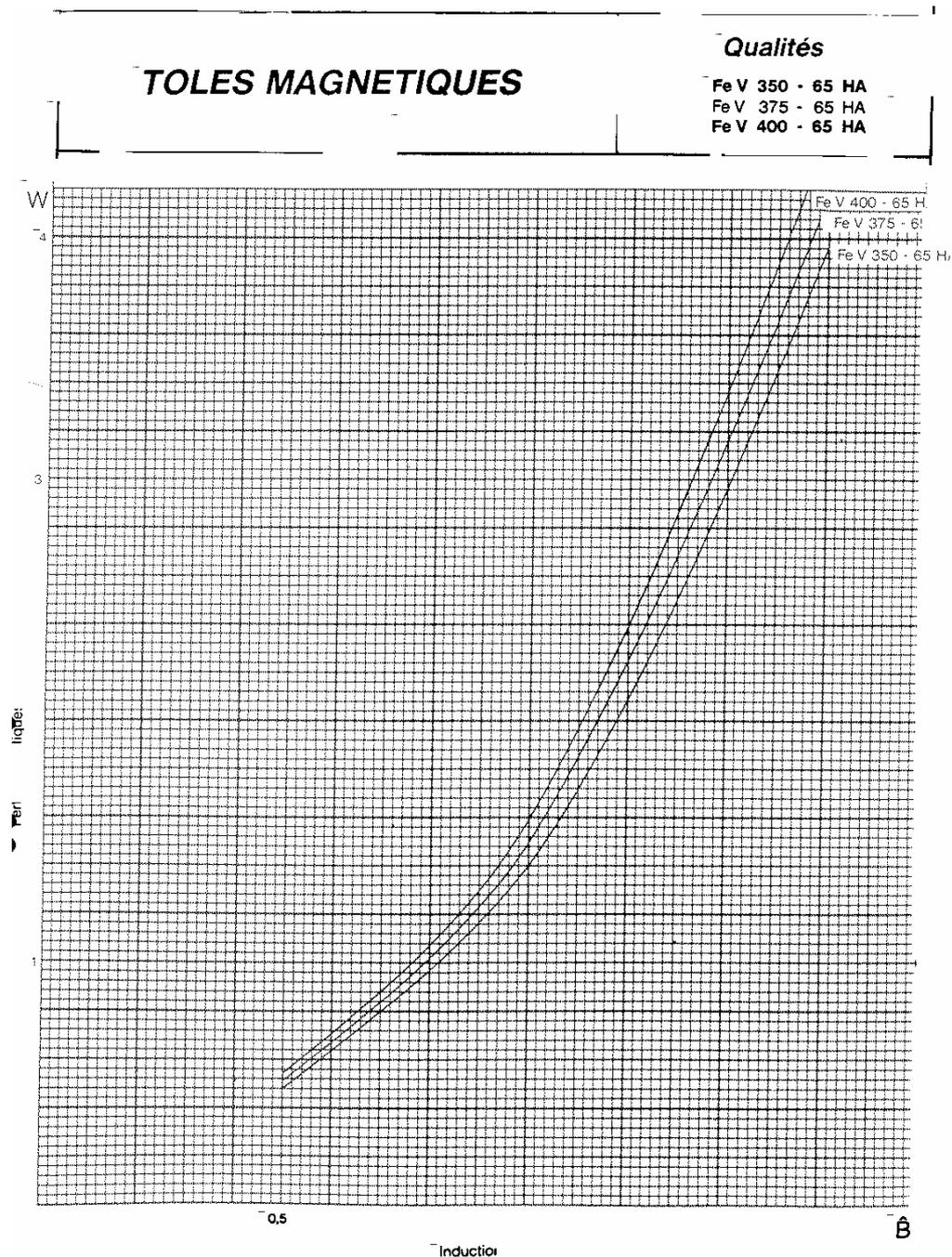


Figura 6.4. Chapa magnética del estator. Pérdidas específicas (W/kg) a 50 Hz en función de la inducción (T).

6.2.2.1.2 Revestimiento entre las chapas del estator

Por su parte el revestimiento entre las chapas^{M-7} obedece a la denominación *Ugisol C3*, código *P*. Este revestimiento es un barniz especial a base de resinas fenólicas. Su utilización está limitada a usos concretos dado su elevado precio. En cuanto a su naturaleza orgánica, este revestimiento presenta una buena elasticidad y una durabilidad superior al del código *S*. Su dureza al rayado es de *9 H*.

Se recomienda su utilización en espesores comprendidos entre $1\mu\text{m}$ y $4\mu\text{m}$ como máximo. Aplicado en capas finas, este barniz presenta buenas propiedades para la soldadura. Si el espesor asciende a $4\mu\text{m}$ su resistencia, incluso con altas temperaturas, al aislamiento es buena.

Nombre	Clasificación norma ASTM A 345	Naturaleza	Color	Código	Espesor Mm/cara	Número de caras aisladas	Resistencia aislante $\Omega\text{cm}^2/\text{cara}$	Resistencia temperatura		Propiedades principales
								Continuo	Intermitente	
Ugisol 3	C-3	fenólica	dorada	P 24	2 a 4	1 o 2	25	180°C	450°C	Aislada

Tabla VI.IV. Características del revestimiento entre las chapas del estator.

6.2.2.1.3 Chapas troqueladas estator

Las chapas del estator son de un motor convencional^{M-7} y no han sido diseñadas ni construidas por nosotros. Estos estatores como ya se ha comentado en varias ocasiones se rebobinaron para conseguir toda la gama de velocidades, pero no se modificó su circuito magnético manteniéndose las chapas de origen. Por tanto valga de ejemplo la chapa mostrada en la siguiente figura que se corresponde con cualquiera de los tres estatores utilizados.

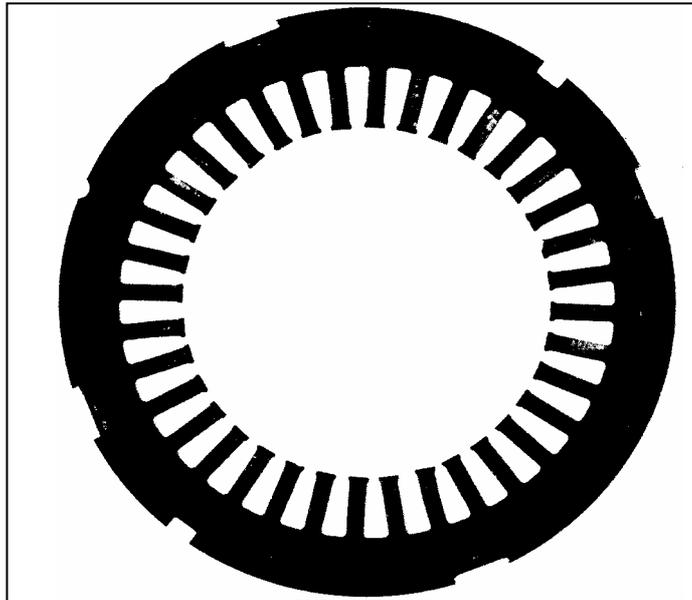


Figura 6.5. Detalle de una de las chapas del estator donde se visualiza el troquelado practicado.

6.2.2.1.4 Manguito aislante núcleo estator-conductores

El aislamiento^{M-6} de las ranuras se forma a base de los mismos productos que el usado en la separación de las barras. Con la mayoría de productos aislantes se consiguen resistencias mecánicas al rasgado que los hacen especialmente útiles en máquinas pequeñas bobinadas con hilo como las tratadas en esta investigación, donde al introducir éstos se deteriora con facilidad el forro de las mismas. Asimismo las propiedades dieléctricas están prácticamente aseguradas.

En nuestro caso se ha escogido como material aislante para las ranuras (manguitos) la mecanita moldeable, la cual presenta unas propiedades mecánicas y dieléctricas más que razonables para el uso al que están destinados los motores. En la siguiente tabla se indican sus características principales.

Material	Clase	Notas	Fuente	Temp (°C)	Tiempo (min)	Espesor (mm)	Tensión disruptiva (KV) U_a	Rigidez dieléctrica E_a (kV/mm)
micanita moldeable al aire	B	Natural secada o forzada	Aislamabar	100	1	0.15	5.7	38

Tabla VI.V. Principales propiedades de la micanita moldeable al aire.

6.2.2.2 Materiales constructivos de los conductores del estator

6.2.2.2.1 Conductores estator

Los conductores^{M-6} que forman el bobinado del estator son de cobre con un diámetro de 0.7 mm, del cual corresponden al cobre 0.65 mm y 0.025 mm al barniz o aislante cuyas características están detalladas más adelante. En cuanto a las características principales del conductor de cobre se resumen en la siguiente tabla.

Material	Diámetro (mm)	Diámetro Cu (mm)	Espesor barniz	Densidad Cu (kg/dm ³)	Densidad barniz (kg/dm ³)	Peso (kg/km)	Denominación
Cobre con acetol-moldeable	0.7	0.65	0.025	8.9	1.2	2.61	NB-20288176

Tabla VI.VI. Características conductores bobinados del estator.

6.2.2.2.2 Aislamiento de los conductores del estator

La tensión disruptiva entre los conductores esmaltados^{M-6} del estator es muy elevada si se considera el ligerísimo espesor de la película aislante. Los esmaltes sintéticos presentan además una gran resistencia mecánica a la erosión y perfecta plasticidad para la manipulación de los conductores, son resistentes al aceite caliente y ocupan un mínimo espacio, todo lo cual los ha hecho prácticamente insustituibles en los bobinados de las máquinas corrientes, siendo el recubrimiento más utilizado.

En nuestro caso se ha utilizado un esmaltado con acetal-polivinilo para capa normal con las características que se detallan en la siguiente tabla.

Diámetro hilo (mm)	Tensión de perforación (kV)	Esmaltado capa normal			Esmaltado capa fuerte		AA	SS	V	Am
		Δd_{min}	Δd_{med}	$\Delta d_{máx}$	Δd_{min}	$\Delta d_{máx}$	Δd	Δd	Δd	Δd
0.65 Cu	0.65-1.2	0.033	0.060	0.078	0.075	0.110	0.20	0.20	0.175	0.30

Tabla VI.VII. Características del esmalte utilizado en los conductores del estator (Acetal-Polivinilo)

6.2.2.3 Materiales constructivos de las chapas del rotor tipo A

En la construcción de los diversos rotores se han utilizado numerosos materiales como queda reflejado en el capítulo III, apartado 3.3.2, y al cual nos remitimos para obtener información sobre el resto de materiales. En este apartado se expondrá solamente el material empleado en la construcción del rotor de chapas tipo A.

6.2.2.3.1 Materiales constructivos de las chapas del núcleo del rotor tipo A

Las chapas^{M-6} que forman el núcleo del rotor tipo A, disponen de las características generales garantizadas que seguidamente se exponen. Aparte estas características se corresponden con las principales normas establecidas.

Espesor (mm)	Calidad Selon NF C 28900-oct /83 EURONORM 106.84	Propiedades garantizadas							Masa volumétrica norma kg/dm ³	
		Pérdidas totales máximas en W/kg a 50Hz		Inducción magnética mínima en Teslas para una chapa (AC o DC) (A/m)			Anisotropía de las partes % máxima	Funcionamiento mínimo		Número de pliegues mínimo
		1 T	1.5 T	2500	5000	10000				
0.5	FeV-470-50HA	2.0	4.7	1.52	1.62	1.73	±12	0.97	10	7.70

Tabla VI.VIII. Propiedades generales de la chapa utilizada en el núcleo del rotor tipo A.

En cuanto a sus características mecánicas^{M-6,M-7} podemos destacar las mostradas en la siguiente tabla, en la cual, y para el espesor de 0.5 mm nos indica la calidad, límites elásticos, durezas y resistencias a la ruptura.

Espesor (mm)	Calidad	Resistencia a la ruptura (N/mm ²)	Límite de elasticidad (N/mm ²)	Elongación 80mm (%)	Dureza Hv 5
0.5	FeV 470-50 HA	430-460	260-300	25-35	135-160

Tabla VI.IX. Propiedades mecánicas de la chapa utilizada en el núcleo del rotor tipo A.

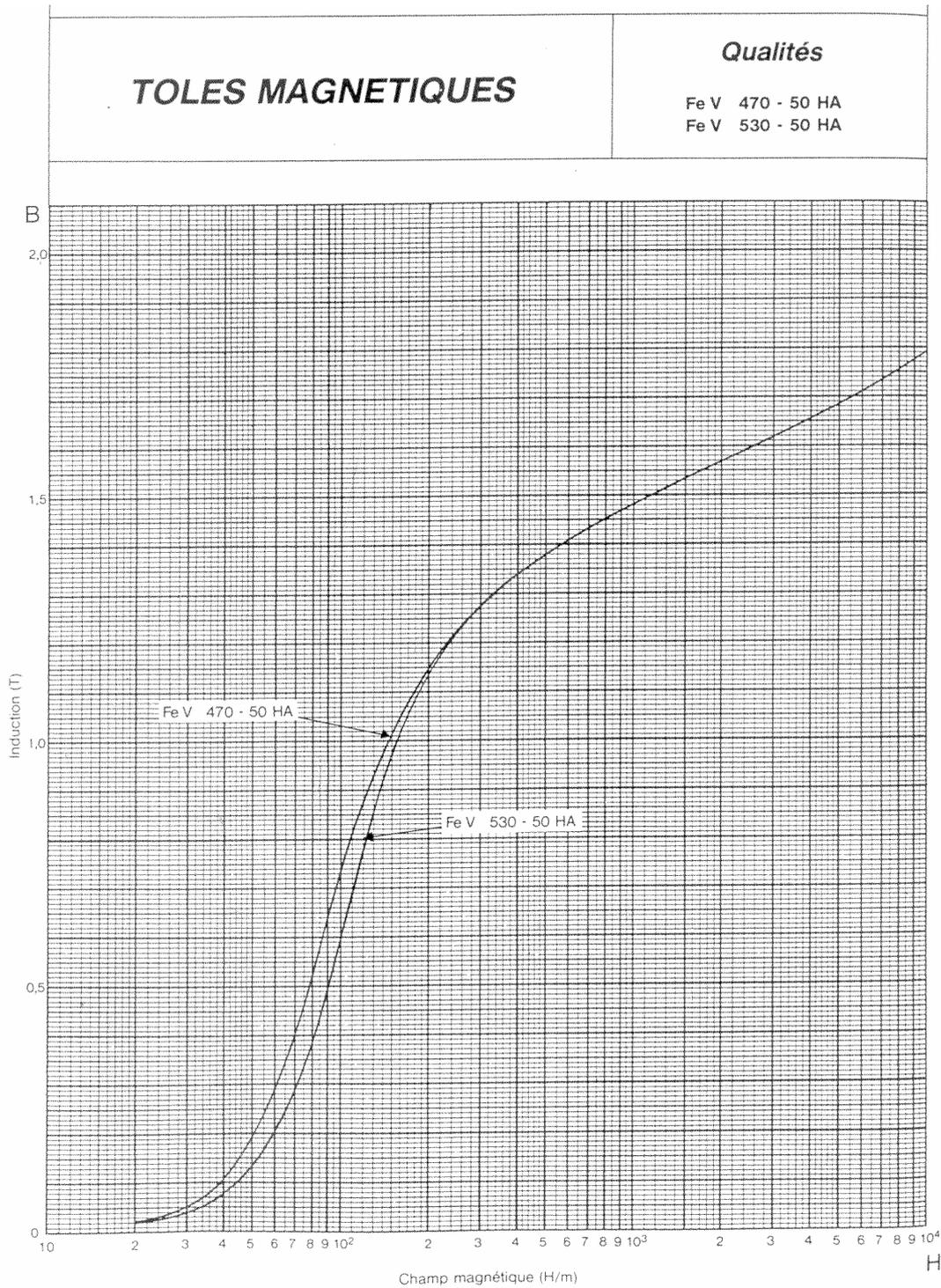


Figura 6.6. Chapa magnética del rotor tipo A. Inducción versus campo magnético.

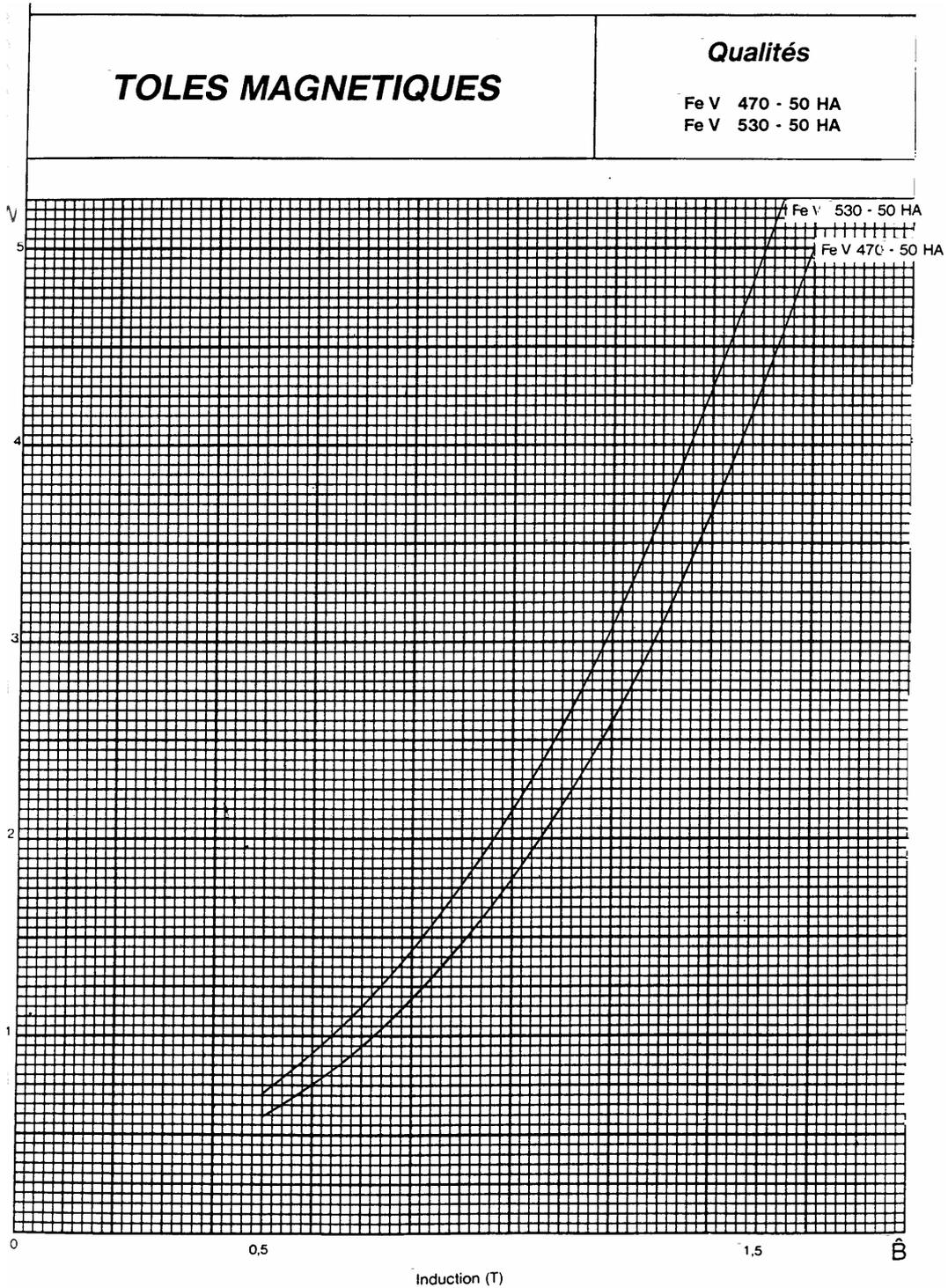


Figura 6.7. Chapa magnética del rotor tipo A. Pérdidas específicas (W/kg) a 50 Hz en función de la inducción (T).

6.2.3 Factor de calidad (G)

6.2.3.1 Introducción

Una forma de evaluar la facilidad con que una máquina es capaz de transformar la energía entre sus más diversas formas nos la proporciona el factor de calidad^[L-40] (G).

En el caso de que la máquina sea eléctrica el factor de calidad vendrá dado por la facilidad que ofrece esta máquina para obtener una corriente (I) a partir de una fuerza electromotriz (E), y asimismo, con la facilidad de obtener un flujo a partir de una cierta corriente (I').

Con estos requisitos es posible establecer una primera relación general que nos expresa el factor de calidad (G), en función de las intensidades, flujos y fuerzas electromotrices de una máquina eléctrica.

$$G \propto \left(\frac{I}{E}\right) \left(\frac{\Phi}{I'}\right) \quad [6.1]$$

Pero el factor de calidad no sólo es proporcional a estos parámetros, sino también dependerá de los materiales y de la distribución. Asimismo el factor de calidad debe ser independiente de las condiciones de trabajo.

$$G \propto \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{1}{R_m}\right) \propto \left(\frac{1}{R}\right) \cdot L \quad [6.2]$$

Donde:

R : resistencia eléctrica

R_m : reluctancia magnética

L : inductancia

Los términos empleados hasta el momento radican en el par generado en la máquina, pero falta incluir todavía un término que regula el factor de calidad: la velocidad en la que se genera este rendimiento de par adimensional. Una vez realizadas estas modificaciones la expresión queda de la siguiente forma:

$$G \propto \left(\frac{1}{R}\right) \cdot L \cdot \omega = \frac{L \cdot \omega}{R} = \tau \cdot \omega \quad [6.3]$$

Finalmente es necesario definir qué inductancias y resistencias están involucradas en los valores R y L . Estos factores dependen del tipo de máquina que se esté analizando. En el caso de una máquina asíncrona los valores de resistencia hacen referencia a la corriente que es posible obtener a partir de una fuerza electromotriz creada; esta relación es equivalente a la inversa de la resistencia rotórica. En cuanto al flujo que es posible obtener a partir de una corriente es evidente que vendrá referido a la inversa de la reluctancia magnética obtenida con el circuito magnético creado en el motor. Esta reluctancia se cuantifica eléctricamente como una reactancia magnetizante. Para cada tipo de máquina se obtendrán unos valores de R y L diferentes, lo que repercutirá en una variación del factor de calidad.

Para un motor lineal también es posible hallar el factor de calidad en función de la resistencia e inductancia pertinentes. Pensemos en el factor de calidad del tipo:

$$G \propto \left(\frac{A_e}{\rho \cdot l_e}\right) \left(\frac{\mu_0 \cdot A_m}{l_m}\right) \cdot f \quad [6.4]$$

De forma que calculamos el área resistiva del motor como:

$$A_e = p \cdot t \quad [6.5]$$

Donde:

p : paso polar.

t : espesor de la lámina rotórica.

Igualmente el área de paso del flujo vendrá dada por:

$$A_m = p \cdot w \quad [6.6]$$

Siendo:

p : paso polar

w : espesor del motor lineal

En cuanto a la longitud del circuito eléctrico será w , y la longitud del circuito magnético será la parte del entrehierro llamada g . De esta forma cuantificamos el factor de calidad como:

$$G = \frac{p \cdot t}{\rho \cdot w} \cdot \frac{\mu_0 \cdot p \cdot w}{g} \cdot f = \frac{p^2 \cdot \mu_0 \cdot f}{\left(\frac{\rho}{t}\right) \cdot g} \quad [6.7]$$

Donde $\frac{\rho}{t}$ es la resistividad superficial del rotor.

6.2.3.2 Efectos del valor del factor de calidad

Si evaluamos el rendimiento de una máquina asíncrona mediante la siguiente expresión y considerando que ésta es válida cuando la reactancia $X_2=0$ y la resistencia R_m tiende a infinito tendremos.

$$\eta = \frac{1-s}{1 + \left(\frac{1}{s}\right) \cdot \left[\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(s^2 + \left(\frac{1}{G}\right)^2 \right) \right]} \quad [6.8]$$

Cuando una máquina asíncrona es de muy buena calidad su factor de calidad^{L-40} G puede ser superior a 100. Por tanto, es posible obtener una relación lineal entre el factor de calidad G , y la relación de resistencias R_2/R_1

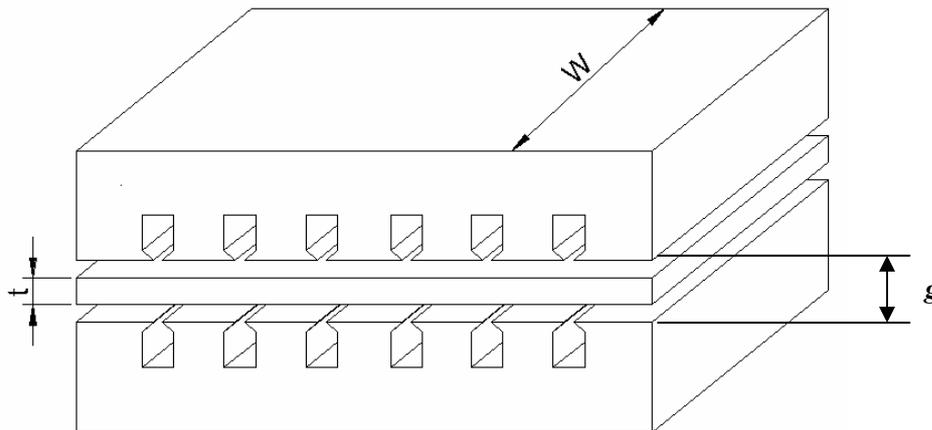


Figura 6.8. Factor de calidad.

En máquinas eléctricas lineales, el factor de calidad G es proporcional a $p^2 \cdot f$. Así, si disminuimos la frecuencia, aumentando el paso polar, podremos disminuir la potencia útil de la máquina. Esta afirmación parece contradictoria ya que como se sabe un aumento de la frecuencia produce asimismo un aumento de la potencia útil, sin embargo, en este último caso el paso polar permanece constante, lo cual aumenta el factor G . Por tanto es posible establecer relaciones de dependencia entre diversos parámetros:

- Rendimiento: depende básicamente de los materiales (partiendo de una configuración correcta)
- Relación potencia/peso: depende en gran medida de la saturación y de la temperatura máxima admisible en el cobre.

Asimismo es posible relacionar la densidad de corriente de carga del estator (J_s) y la correspondiente densidad de corriente del rotor (J_r), de forma que:

$$J_s = \frac{J_r}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\sigma \cdot G}\right)^2}} \quad [6.9]$$

De esta forma, si procedemos a evaluar el motor analizado (motor a 3000 rpm con rotor de chapas tipo A) mediante el factor G , obtendremos la siguiente expresión:

$$G \propto \left(\frac{I_1}{E_1}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_\delta}{I_2}\right) \cdot w = \frac{1.408}{212.4} \cdot \frac{0.00714}{2.403} \cdot 2\pi \cdot 50 \propto 6.19 \cdot 10^{-3} s \quad [6.10]$$

En la cual la $I_2=26.28A$ (FEMM) se pasa al primario dando $I'_2=2.403A$. La $I_1=1.408A$ se obtiene experimentalmente. La f.e.m $E_1=212.4V$, se obtiene por cálculo (punto 6.2.1.1), y el flujo, del producto entre la inducción (0.789T por FEMM), por la sección transversal que atraviesa este flujo ($S=9.047 \cdot 10^{-3}m^2$):

Debe recordarse que estos valores son proporcionales, es decir, sólo sirven para comparaciones, no pudiéndose tomar como valores absolutos.

6.2.3.3. Cálculo de los factores de calidad de algunos de los motores analizados

A modo de resumen se ofrece el cálculo de los factores de calidad^{L-40,L-16} de algunos de los motores más representativos de este trabajo. Los valores se dan en forma de tabla, dándose asimismo, las magnitudes que permiten su cálculo.

Motor	I_1 (A)	E_1 (V)	Φ_δ (Wb)	I'_2 (A)	$G \propto \left(\frac{I_1}{E_1}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_\delta}{I_2}\right) \cdot w$
Jaula	2,505	212,5	0,00724	4,284	$6.26 \cdot 10^{-3}$
Macizo	1,352	212,5	0,00643	2,312	$5.56 \cdot 10^{-3}$
Macizo aros	1,480	212,3	0,00619	2,531	$5.36 \cdot 10^{-3}$
Rotor hueco	1,689	210,0	0,00543	2,888	$4.75 \cdot 10^{-3}$
Chapas A	1,408	212,4	0,00714	2,403	$6.19 \cdot 10^{-3}$
Chapas B	1,683	211,8	0,00706	2,873	$6.13 \cdot 10^{-3}$
Chapas C	1,188	211,3	0,00688	2,028	$5.99 \cdot 10^{-3}$
Chapas D	1,367	211,8	0,00715	2,333	$6.21 \cdot 10^{-3}$
Chapas E	1,104	212,4	0,00695	1,884	$6.02 \cdot 10^{-3}$
Chapas F	1,275	212,6	0,00697	2,176	$6.03 \cdot 10^{-3}$
Chapas Z	1,231	211,8	0,00717	2,101	$6.23 \cdot 10^{-3}$

Tabla VI.X. Factores de calidad de varios de los motores analizados.

Puede comprobarse que los motores con un mejor factor de calidad son precisamente los de jaula de ardilla, aunque los motores de chapas también destacan en este factor, e incluso los motores con rotor de chapas formados por un alto número de éstas (modelos B, D, Z) se acercan a los valores de los motores de jaula convencionales.

