

2.01. CÁLCULO PARAMÉTRICO

2.01.01 Generalidades

En la industria no es lo más frecuente tener que calcular íntegramente las máquinas nuevas sino que se deducen éstas de las ya construidas mediante la transformación de algunas dimensiones. Más adelante veremos cómo varían las características de las máquinas en función de sus dimensiones, pero ya desde ahora diremos que estas características son más significativas, cualquiera que sea el método de cálculo; expresadas en valores relativos y sobre ellos influyen decisivamente ciertos parámetros que pueden considerarse fundamentales para la máquina. De tal modo, tampoco es preciso, por lo general, agotar el estudio de dichas características sino que basta, en muchos casos, examinar si aquellos parámetros son normales. En la mayoría de las ocasiones la adaptación de la máquina se hará tomando como base la conservación de dichos parámetros constituidos a su vez por valores específicos o relativos.

La expresión *exacta* de las múltiples relaciones existentes sería extremadamente complicada y a veces irrealizable por lo cual es necesario ceñirse a ciertas hipótesis simples sin perder de vista, no obstante, las desviaciones que pueden introducir tales simplificaciones en los resultados prácticos. El cálculo debe unificarse también haciendo intervenir el menor número posible de parámetros electromagnéticos distintos.

2.01.02 Parámetros magnéticos

Son fundamentales en este sentido las inducciones B (flujos por unidad de superficie) y entre todas ellas la inducción máxima en el entrehierro \hat{B}_g de las máquinas rotatorias, o en el núcleo, \hat{B}_n , de los transformadores con la cual se asocian fácilmente casi todas las restantes. En el terreno comparativo es suficiente basar el estudio sobre la hipótesis de una distribución espacial de la onda de flujo, idéntica en todos los casos similares. Esta onda será rectangular para las máquinas de corriente continua y senoidal para las de al-

terna. Las ondas monofásicas de flujo se supondrá que varían senoidalmente en función del tiempo. Al aplicar los resultados generales que de ello se desprenden podrán hacerse las correcciones adecuadas a las condiciones y al tipo específico de la máquina.

2.01.03 Parámetros eléctricos

Se reducen en esencia a dos, típicos: Las densidades de corriente Δ y las cargas lineales específicas q cuya influencia trasciende al comportamiento de la máquina no solo en el aspecto del funcionamiento electromagnético sino incluso térmico y mecánico.

Veamos las ecuaciones fundamentales en que intervienen unos y otros parámetros.

2.01.04 Potencia de una máquina de corriente continua

La ecuación de la f.e.m. es, [I.04.04 c],

$$E = \frac{p}{a} \frac{N}{60} Z \hat{\Phi}_\delta \quad (\text{V}) \quad [2.01.04 \text{ a}]$$

$\hat{\Phi}_\delta$ = Flujo por polo en Wb

Z = número total de conductores de la máquina

p = » de pares de polos

a = » » » » vías

N = velocidad de giro en r/m

La expresión de la inducción ideal en el entrehierro viene dada por, [I.04.08 b],

$$\hat{B}_\Omega = \frac{\hat{\Phi}_\delta}{\psi (\tau_p L)} \quad (\text{T}) \quad [2.01.04 \text{ b}]$$

\hat{B}_Ω = inducción máxima supuesto el inducido liso y sin canales de ventilación radial con onda de campo rectangular limitada al arco polar $b_p = \psi \tau_p$ (m), en (T)

L = longitud total o geométrica del inducido en m

τ_p = paso polar del inducido en m

ψ = recubrimiento, y también $\frac{1}{\psi}$ coeficiente de amplitud de la onda de campo en el entrehierro, es decir, relación del valor máximo al valor medio de dicha onda supuesta rectangular

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\hat{B}_\Omega}{\bar{B}_\delta}$$

El número total de conductores Z en [a] puede sustituirse por

$$Z = n Z_n \quad (\text{conductores}) \quad [2.01.04 \text{ c}]$$

n = número de ranuras del inducido
 Z_n = » » conductores por ranura,
 y el paso polar en [b] cabe expresarlo por

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2 p} \quad (\text{m}) \quad [2.01.04 \text{ d}]$$

D = diámetro del inducido en el entrehierro en m.

Sustituyendo en [a] los valores de Z y $\hat{\Phi}_\delta$ según se deducen de [b] [c] y [d], tendremos:

$$E = \frac{\psi n N Z_n}{38,2 a} (DL) \hat{B}_\delta \quad (\text{V})$$

$$E = \left(\frac{\psi n}{382} \right) \left(\frac{N}{1000} \right) \frac{Z_n}{a} (DL) \hat{B}_\delta \quad (\text{V}) \quad [2.01.04 \text{ e}]$$

D = diámetro del inducido en cm

L = longitud del inducido en cm

\hat{B}_δ = inducción máxima con inducido liso y onda de flujo rectangular, en T

N = velocidad en r/m.

n = número de ranuras

Z_n = conductores por ranura

a = pares de vías

ψ = recubrimiento

Esta es la primera ecuación paramétrica que nos da la expresión de la f.e.m. en función de una sola característica magnética: la inducción máxima ideal \hat{B}_δ en el entrehierro liso supuesta la onda de flujo rectangular. Todas las restantes magnitudes que intervienen son dimensiones o elementos constructivos de la máquina, limitadas aquéllas a D , L y ψ . Se aprecia, además, claramente que la f.e.m. de una máquina de corriente continua es independiente del número de polos, lo cual no se trasluce en la ecuación [a]. También se ve que el voltaje es proporcional a la sección diametral (DL) , cm^2 , del inducido y desde luego a la velocidad de giro. Ninguna otra característica eléctrica de la máquina (corriente, cargas lineales, etc.), interviene en la expresión de la f.e.m. Una vez estudiada más adelante la ecuación paramétrica de la potencia nos será fácil con ayuda de la expresión [e] deducir todas las máquinas distintas que puedan derivarse de una cierta estructura mecánica parcial o conjunta disponible en el taller, o las modificaciones más simples que cabe introducir para obtener nuevas características eléctricas determinadas.

Estos dos problemas en los cuales van involucrados los de normalización y simplificación de tipos, alcanzan una importancia económica considerable en la construcción de máquinas eléctricas y aparecen constantemente en la oficina técnica. Su solución, más rápida y exacta que la del estudio de nuevos tipos, constituye una gran parte de la actividad calculadora en el terreno industrial; ello no obsta para que el ingeniero deba estar dispuesto en cualquier momento a la creación de aquellos nuevos tipos con todos los avances que los métodos y elementos en continuo progreso pongan a su alcance, lo cual requiere unos conocimientos más amplios que los que se precisan cuando se trata de simples adaptaciones, por interesantes que resulten económicamente de momento.

2.01.05 Potencia de una máquina de corriente continua

Como se trata de analizar las condiciones eléctricas de las máquinas, la potencia base que utilizaremos en todos estos estudios será la *potencia en bornes* P_b . Esta es la potencia útil en el caso de un generador y la absorbida en el caso de un motor. Designando por $U(V)$ la tensión nominal y por $I(A)$ la corriente de línea

$$P_b = U I \quad (W) \quad [2.01.05 \text{ a}]$$

Igualmente podemos convenir en asentar el cálculo de las características de la máquina en la inducción máxima del entrehierro que correspondería, no a la f.e.m. en carga E , sino a la tensión nominal en bornes U , lo cual viene a coincidir con la situación de marcha en vacío. La inducción, por lo dicho en los párrafos anteriores, será a su vez la que se desprende de considerar una onda de campo rectangular de base b_p , [2.01.04 b], y la representaremos por \hat{B}_{Ω} .

Con tales supuestos, y en las unidades más convenientes (longitudes en cm, inducción en T), [2.01.04 e], escribiremos ahora

$$U = \frac{\psi n}{382} \frac{N}{1000} \frac{Z_n}{a} (DL) \hat{B}_{\Omega} \quad (V)$$

Por otra parte

$$\frac{I}{2a} = s \Delta \quad [2.01.05 \text{ b}]$$

s sección de un conductor en mm^2

Δ densidad de corriente en $\frac{A}{\text{mm}^2}$

Definiendo por

$$q = \frac{n Z_n I}{\pi D 2a} \quad (\text{AC/cm}) \quad [2.01.05 \text{ c}]$$

la carga lineal específica del inducido; por

$$A_{cu} = \frac{n Z_n s}{10^4} \quad (\text{dm}^2) \quad [2.01.05 \text{ e}]$$

[s en mm²]

la sección transversal de cobre en el conjunto de las n ranuras; por

$$A_{\square} = \frac{L D}{10^2} \quad (\text{dm}^2) \quad [2.01.05 \text{ f}]$$

(D y L en cm)

la sección longitudinal del inducido mismo, y poniendo la potencia P_b en kW,

$$P_b = \frac{\psi}{0,191} \left(\frac{N}{1000} \right) (A_{cu} A_{\square}) (\hat{B}_{\Omega \delta o} \Delta) \quad (\text{kW}) \quad [2.01.05 \text{ g}]$$

(Rêpetimos: P en kW, N en r/m, A_{cu} y A_{\square} en dm², $\hat{B}_{\Omega \delta o}$ en T, Δ en A/mm²)

Análogamente, en las mismas unidades, con q en Ac/cm y haciendo

$$V_{\square} = D^2 L \quad (\text{dm}^3), \quad [2.01.05 \text{ h}]$$

$$P_b = \frac{\psi}{60,7} \left(\frac{N}{1000} \right) V (\hat{B}_{\Omega \delta o} q) \quad (\text{kW}) \quad [2.01.05 \text{ i}]$$

(P en kW, V_{\square} en dm³, q en Ac/cm, $\hat{B}_{\Omega \delta o}$ en T y N en r/m)

$V_{\square} = D^2 L$ representa el volumen del prisma circunscrito al inducido o volumen prismático en el entrehierro,

En efecto:

$$\begin{aligned} P_b &= UI = \left(\frac{\psi n}{382} \frac{N}{1000} \frac{Z_n}{a} DL \hat{B}_{\Omega \delta o} \right) (2 a s \Delta) \quad (\text{W}) \\ &= \frac{\psi}{191} \frac{N}{1000} (n Z_n s) (DL) (\hat{B}_{\Omega \delta o} \Delta) \quad (\text{W}) \\ &= \frac{\psi}{191} \frac{N}{1000} A_{cu} A_{\square} \hat{B}_{\Omega \delta o} \Delta \quad (\text{W}) \end{aligned}$$

En la expresión anterior, con s en mm², A_{cu} viene dada en mm²; si la expresamos en dm² y hacemos lo mismo para A_{\square} , que allí está en cm², a la vez que ponemos P_b en kW,

$$(P_b \times 10^3) = \frac{\psi}{191} \frac{N}{1000} (A_{cu} \cdot 10^4) (A_{\square} \cdot 10^2) \hat{B}_{\delta_0} \Delta$$

y

$$P_b = \frac{\psi}{0,191} \frac{N}{1000} A_{cu} A_{\square} \hat{B}_{\delta_0} \Delta \quad (\text{kW})$$

como se ha indicado en [g]

También, volviendo al origen,

$$P_b = \left(\frac{\psi n}{382} \frac{N}{1000} \frac{Z_n}{a} D L \hat{B}_{\delta_0} \right) I \quad (\text{W})$$

$$= \frac{\psi}{383} \frac{N}{1000} \left(n Z_n \frac{I}{a} \right) D L \hat{B}_{\delta_0} \quad (\text{W})$$

$$= \frac{\psi}{382} \frac{N}{1000} (2 \pi D q) D L \hat{B}_{\delta_0} \quad (\text{W})$$

$$= \frac{\pi \psi}{191} \frac{N}{1000} (D^2 L) \hat{B}_{\delta_0} q \quad (\text{W})$$

D y L continúan estando en cm; si las expresamos en dm y P_b en kW

$$(P_b \times 10^3) = \frac{\pi \psi}{191} \frac{N}{1000} (D^2 L \cdot 10^3) \hat{B}_{\delta_0} q$$

y

$$P_b = \frac{\psi}{60,7} \frac{N}{1000} (D^2 L) \hat{B}_{\delta_0} q \quad (\text{kW})$$

según se expone en [i].

Notemos también que, [2.01.04 a],

$$P_b = UI = \left(\frac{P}{a} \frac{N}{60} Z \hat{\Phi}_{\delta_0} \right) I = (2 p \hat{\Phi}_{\delta_0}) \left(\frac{Z I}{2 a} \right) \frac{N}{60} \quad (\text{W})$$

$$\boxed{P_b = \dot{\Phi}_{\delta_0} \dot{I} \frac{N}{60}} \quad (\text{W}) \quad [2.01.05 j]$$

siendo

$$\dot{\Phi}_{\delta} = 2 p \hat{\Phi}_{\delta_0} \quad (\text{Wb}) \quad [2.01.05 k]$$

el flujo total que cruza el entrehierro,

$$\dot{I} = Z \frac{I}{2 a} \quad (\text{A}) \quad [2.01.05 b]$$

la corriente total axial de la máquina, con N en r/m.

Ambas ecuaciones [g] e [i] son bien significativas: La potencia en bornes P_b (kW) de una máquina es exactamente proporcional a la sección longitudinal del inducido A_{\square} (dm²), a la sección total de cobre en las ranuras A_{cu} en (dm²) y a los coeficientes de trabajo, magnético (inducción en el entrehierro) $\hat{B}_{\delta o}$ (T), y eléctrico (densidad de corriente Δ ($\frac{A}{mm^2}$)); o también, exactamente proporcional al volumen prismático del inducido V_{\square} (dm³), a la misma inducción $\hat{B}_{\delta o}$ (T) y a la carga lineal específica de la armadura q ($\frac{Ac}{cm}$). Siempre, por supuesto, la potencia en bornes P_b y la velocidad de giro N (r/m) son rigurosamente proporcionales entre sí. Si manteniendo constantes todas las restantes dimensiones y la velocidad y coeficientes electromagnéticos de trabajo de la máquina, se alarga o se acorta de longitud del inducido, la potencia varía proporcionalmente. Este recurso es muy corriente para multiplicar el número de potencias distintas a obtener de un mismo tipo constructivo.

Hagamos notar que entre q (Ac/cm) y Δ (A/mm²) existen las siguientes relaciones: con I en A, D en cm, s en mm² y el paso de ranuras $\tau_{\delta} = \frac{\pi D}{n}$ en cm y designando además por S_{cn} la sección neta de conductores por ranura en mm²

$$\boxed{q} = \frac{n Z_n \frac{I}{2a}}{\pi D} = \frac{Z_n s \Delta}{\frac{\pi D}{n}} = \boxed{\frac{S_{cn} \Delta}{\tau_{\delta}}} \quad (\text{Ac/cm}) \quad [2.01.05 \text{ m}]$$

evidente puesto que $(S_{cn} \Delta)$, A, es la corriente por ranura y τ_{δ} , cm, el desarrollo del entrehierro que corresponde a un paso de éstas.

2.01.06 Par de la máquina

El par es una magnitud mecánica ligada con la potencia de esta naturaleza a través de la velocidad de giro, y sus unidades, bien conocidas, m · kg, New · m o J-par, etc., se desprenden de su misma expresión. En la construcción de máquinas eléctricas resulta muy cómodo introducir otras unidades más directamente relacionadas con las características propias de dichas máquinas, midiendo el par unas veces en $\frac{W}{r/m}$ y otras en W o kW, o incluso en kVA, a una cierta velocidad nominal. La primera unidad es en sí tan legítima como pueden serlo las unidades clásicas; constituye una medida del valor absoluto del par, y pudiera aplicarse igualmente a cualquier otro tipo de máquinas; la segunda, en cambio, el kW o el kVA a una velocidad prefijada sólo puede tomarse como valor relativo ya que consiste en definir el par por la

potencia que la máquina podría dar manteniendo éste a la velocidad en cuestión. Numéricamente depende, pues, de dicha velocidad y sólo sirve a efectos comparativos de los diversos pares dentro de una misma máquina o entre máquinas de la misma velocidad, lo cual sin embargo no le resta utilidad en el estudio individual de las máquinas eléctricas, especialmente en las de corriente alterna.

Ciñéndonos por el momento a la medida del par en $\frac{W}{r/m}$, deduciremos enseguida su expresión de las ecuaciones [2.01.05 g, i y j]

$$\boxed{M_b} = \frac{P_b \times 1000}{N} = \frac{P_b}{\left(\frac{N}{1000}\right)} = \boxed{\frac{\psi}{0,191} (A_{cu} A_{\square}) (\hat{B}_{\delta o} \Delta)} \quad \left(\frac{W}{r/m}\right) \quad [2.01.06 a]$$

y

$$\boxed{M_b = \frac{\psi}{60,7} V_{\square} (\hat{B}_{\delta o} q)} \quad \left(\frac{W}{r/m}\right) \quad [2.01.06 b]$$

o bien

$$\boxed{M_b = \frac{\dot{\Phi}_{\delta o} \dot{I}}{60}} \quad \left(\frac{W}{r/m}\right) \quad [2.01.06 c]$$

(A_{cu} y A_{\square} en dm^2 , $\hat{B}_{\delta o}$ en T, Δ en $\frac{A}{mm^2}$, V_{\square} en dm^3 , q en $\frac{Ac}{cm}$, $\dot{\Phi}_{\delta o}$ en Wb e \dot{I} en A). De esta forma, M_b viene dado idénticamente en $\frac{W}{r/m}$ o en kW por cada 1000 r/m $\left(\frac{kW}{kr/m}\right)$

Las fórmulas anteriores son bien expresivas. Dadas las dimensiones constructivas principales ψ , A_{cu} y A_{\square} y los parámetros electromagnéticos de servicio $\hat{B}_{\delta o}$ y Δ o q , lo que queda absolutamente determinada no es la potencia eléctrica en bornes P_b sino el par M_b de la máquina que por hallarse referido a dicha potencia, sin traducción mecánica inmediata, denominaremos «par ficticio» o, convencionalmente, por analogía, «par en bornes» y, aun, «par eléctrico» de la máquina ⁽¹⁾.

La misma máquina en idénticas condiciones electromagnéticas puede dar cualquier potencia según sea la velocidad. **Anticipemos, pues, desde ahora, que es el par y no la potencia lo que determina fundamentalmente las dimensiones de una máquina eléctrica.**

Entre las unidades de par existe la relación

(1) No debe confundirse con el «par electromagnético» o a nivel del entrehierro cuyo significado mecánico es indudable como par transmitido desde el estator al rotor, aunque entre éste y el par en bornes no exista numéricamente mucha diferencia. La diferencia tampoco llega a ser considerable con respecto al par en el eje ni al par en el acoplamiento de la transmisión.

$$1 \text{ m} \cdot \text{kg} = 9,81 \text{ Nw} \cdot \text{m} = 9,81 \text{ J-par} = 1,03 \frac{\text{W}}{\text{r/m}} = 1,03 \frac{\text{kW}}{\text{kr/m}}$$

$$1 \frac{\text{W}}{\text{r/m}} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{kr/m}} = 9,55 \text{ Nw} \cdot \text{m} = 9,55 \text{ J-par}$$

es decir, que para obtener el par en $\text{m} \cdot \text{kg}$ hay que dividir por 1,03 el par medido en $\frac{\text{W}}{\text{r/m}}$ y para obtenerlo en JOULES-par o $\text{Nw} \cdot \text{m}$, multiplicar los $\frac{\text{W}}{\text{r/m}}$ por 9,55.

En primera aproximación, el par en $\text{m} \cdot \text{kg}$ y en $\frac{\text{W}}{\text{r/m}}$ viene dado por la misma cifra.

Al depender el par, y la potencia, de la sección total de cobre en el inducido pero no de su distribución en un número mayor o menor de conductores, se ve que esta potencia teóricamente es independiente de la tensión. En la práctica, el espacio a reservar para el aislamiento en las ranuras hace que la sección disponible de cobre y con ella la potencia de la máquina se reduzca si el voltaje elegido es sensiblemente elevado.

2.01.07 Ejemplo

Aplicar las ecuaciones que anteceden para deducir la potencia de la dinamo, cuyo estudio hemos venido efectuando en varios ejemplos anteriores, caracterizada por las siguientes dimensiones.

Diámetro del entrehierro $D = 60 \text{ cm}$

Longitud axial del inducido $L = 36 \text{ cm}$

Recubrimiento polar geométrico $\psi = 0,62$

Número de ranuras $n = 75$

Conductores por ranura $Z_n = 8$

Sección de un conductor $s = 13 \times 2,2 = 28,6 \text{ mm}^2$

Velocidad de giro $N = 985 \text{ r/m}$

La máquina trabajaría en vacío con un valor ideal de la inducción máxima en el entrehierro $\hat{B}_{\delta_0} = 0,723 \text{ T}$ (párr. 1.04.12) y con una densidad de corriente a P.C. $\Delta = 4 \text{ A/mm}^2$.

Tomando la fórmula [2.01.06 a] se obtiene para el par eléctrico o en bornes

$$M_b = \frac{\psi}{0,191} (A_{cu} A_{\square}) (\hat{B}_{\delta_0} \Delta) \frac{\text{W}}{\text{r/m}}$$

y como

$$A_{cu} = n Z_n s = 75 \cdot 8 \cdot 28,6 = 17160 \text{ mm}^2 \equiv 1,716 \text{ dm}^2$$

y

$$A_{\square} = 60 \cdot 36 = 2160 \text{ cm}^2 = 21,6 \text{ dm}^2$$

resulta

$$M_b = \frac{0,62}{0,191} (1,716 \cdot 21,6) (0,723 \cdot 4) = 350 \frac{\text{W}}{\text{r/m}}$$

y a 985 r/m, la potencia en bornes

$$P_b = N M_b = 985 \cdot 0,350 = 345 \text{ kW}$$

Corresponde exactamente a la potencia asignada a la máquina en la tabla (1.04.29 a).
Si acudimos a la fórmula [2.01.06 b],

$$M_b = \frac{\psi}{60,7} V_{\square} (q \hat{B}_{\delta 0}) \frac{W}{\text{r/m}}$$

con [2.01.05 m]

$$q = \frac{S_{cu} \Delta}{\tau_{\delta}}$$

tendremos: sección de cobre por ranura,

$$S_{cu} = Z_n s = 8 \cdot 28,6 = 228,8 \text{ mm}^2;$$

paso de ranuras,

$$\tau_{\delta} = \frac{\pi D}{n} = \frac{\pi \cdot 60}{75} = 2,51 \text{ cm}$$

y

$$q = \frac{228,8 \cdot 4}{2,51} = 366 \text{ Ac/cm,}$$

carga específica lineal deducida en este caso del valor fijado para Δ pero que puede ser impuesta como dato de partida constituyendo entonces Δ una consecuencia de q .

El volumen prismático del inducido asciende a

$$V_{\square} = D^2 L = 6^2 \cdot 3,6 = 129,5 \text{ dm}^3$$

y

$$M_b = \frac{0,62}{60,7} 129,5 (366 \cdot 0,723) = 350 \frac{W}{\text{r/m}}$$

igual que antes; análogamente

$$P_b = 0,35 \cdot 985 = 345 \text{ kW}$$

Con el mismo tipo constructivo e idénticos parámetros electromagnéticos en servicio se podría construir esta máquina, por ejemplo, también a 985 r/m, para 400 kW alargando el inducido hasta $36 \frac{400}{345} = 41,7 \text{ cm}$; o bien, dejando invariable la longitud L , pero a 800 r/m, para $345 \frac{800}{985} = 280 \text{ kW}$.

Razones económicas y otros aspectos de funcionamiento (tensión de conmutación, facilidad de ventilación, etc.), señalarán las potencias y velocidades límites que obligarían a pasar ya a otro diámetro.

2.01.08 Significado térmico del producto paramétrico ($q \Delta$).

Cada uno de estos dos parámetros aisladamente tiene una influencia sobre las características electromagnéticas de la máquina pero el producto de ambos

ejerce efecto decisivo sobre el calentamiento de los bobinados pudiendo incluso tomarse como un índice seguro de la elevación de temperatura cuando se compara este producto en máquinas de construcción similar.

Por su misma definición

$$q = \frac{n Z_n I_c}{\pi D} \quad \text{Ac/cm}$$

(I_c = corriente por conductor en A)

y la densidad en la sección s del conductor individual

$$\Delta = \frac{I_c}{s} \quad \text{A/mm}^2$$

Multiplicando ambas expresiones miembro a miembro, haciendo intervenir la resistencia eléctrica de todo el devanado en serie y unificando en dm las longitudes se llega a la expresión

$$(q\Delta) = \frac{R_{se} I_c^2}{\rho A_o} \left(\frac{\text{Ac}}{\text{cm}} \times \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right) \quad [2.01.08 \text{ a}]$$

(q en Ac/cm, Δ en A/mm², I_c en A, ρ en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$; R_{se} resistencia de todo el bobinado desarrollado, en serie, en Ω y A_o , superficie cilíndrica del bobinado, supuestas extendidas axialmente las cabezas de bobina, en dm²)

$$A_o = \pi D l_m \quad (\text{dm}^2)$$

(D y l_m —longitud media de un conductor—, en dm).

En efecto:

$$(q\Delta) = \left(\frac{n Z_n I_c}{\pi D} \right) \left(\frac{I_c}{s} \right) = \frac{n Z_n I_c^2}{\pi D s} \quad (\text{Ac/cm} \times \text{A/mm}^2)$$

(I_c en A, D en cm, s en mm²).

Multiplicando y dividiendo por la longitud media de un conductor l_m en metros

$$q\Delta = \frac{n Z_n l_m I_c^2}{\pi D l_m s}$$

pero ($n Z_n l_m$) = L_c no es sino la longitud total en m que comporta el devanado desarrollado

$$L_c = n Z_n l_m \quad (\text{m})$$

y cuanto a $(\pi D l_m)$ con D en cm y l_m en m, equivale a la superficie cilíndrica del arrollamiento, supuestas rectificadas y extendidas axialmente las cabezas de bobina, expresada en dm^2

$$\pi D l_m = A_o \text{ (dm}^2\text{)}$$

Por tanto,

$$(q\Delta) = \frac{L_c I_c^2}{A_o s} \left(\frac{\text{Ac}}{\text{cm}} \times \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$(L_c \text{ en m, } s \text{ en mm}^2, I_c \text{ en A, } A_o \text{ en dm}^2)$$

Ahora bien: la resistencia óhmica de todo el devanado en serie vale precisamente

$$R_{se} = \frac{\rho L_c}{s} \quad \Omega$$

$$\left(\rho \text{ en } \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}, L_c \text{ en m, } s \text{ en mm}^2 \right)$$

Así, llegamos a la ecuación [a]:

$$(q\Delta) = \frac{R_{se} I_c^2}{\rho A_o}$$

es proporcional justamente al número de vatios, por dm^2 de superficie cilíndrica desarrollada, que habrá de disipar el devanado, $\left(\frac{R_{se} I_c^2}{A_o} \right)$, para eliminar la pérdidas por efecto JOULE debidas a la corriente.

A igualdad de sistema de refrigeración del inducido, la elevación de temperatura $\Delta\theta$ sobre el ambiente que le rodea puede suponerse también proporcional a esta potencia específica a disipar $\frac{R_{se} I_c^2}{A_o}$ o sea

$$\Delta\theta = k\rho (q\Delta) \quad (^\circ\text{C}) \quad [2.01.08 \text{ b}]$$

El coeficiente k depende del tipo constructivo de la máquina. Esta proporcionalidad se sobreentiende que alcanza al calentamiento con respecto a la atmósfera en contacto con el devanado; si se trata de una máquina cerrada, el ambiente es el del interior de la misma; si los arrollamientos son los de un transformador en aceite, el ambiente es el aceite mismo.

Los valores recomendables de $(q\Delta)$ constituyen una base para la previsión del calentamiento: **son enteramente empíricos** y suelen hallarse comprendidos entre 1000 y 2000. Al estudiar cada tipo de máquina daremos nuevas orientaciones.

2.03 CÁLCULO DE UNA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

2.03.01. Pauta de cálculo

Reuniremos en un ejemplo el proceso íntegro de cálculo de una máquina de corriente continua con polos auxiliares y devanado de compensación. Al mismo tiempo, daremos el resumen de fórmulas y gráficos que deberán utilizarse para otras variantes distintas del tipo de máquina propuesto.

Los resultados empíricos que se ofrecen como orientación general no siempre se han seguido al pie de la letra en el ejemplo; así debe hacerse cuando sean de presumir divergencias por las particularidades o el conocimiento más exacto de la máquina.

Tomaremos como ejemplo la dinamo, tantas veces referida, de las siguientes características, como máquina de excitación independiente.

2.03.02 Datos

001) Potencia útil $P = 345 \text{ kW}$

002) Tensión en los bornes $U = 500 \text{ V}$

003) Velocidad de giro $N = 985 \text{ r/m}$

004) Excitación: Independiente

005) Polos auxiliares: Sí

006) Devanado de compensación: Sí

007) Construcción: Protegida, autoventilada

008) Aislamientos $\left\{ \begin{array}{ll} \text{Inducido} & \text{Clase } \boxed{B} & \Delta\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Inductores} & \text{» } \boxed{B} & \Delta\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right.$

009) Servicio: Continuo

010) Rendimiento previsto (motores) $\eta = \dots$ (fig. 2.02.03 a)

011) Potencia en bornes: Generadores $P_b = P = 345 \text{ kW}$

$$\text{Motores } P_b = \frac{P}{\eta} = \dots$$

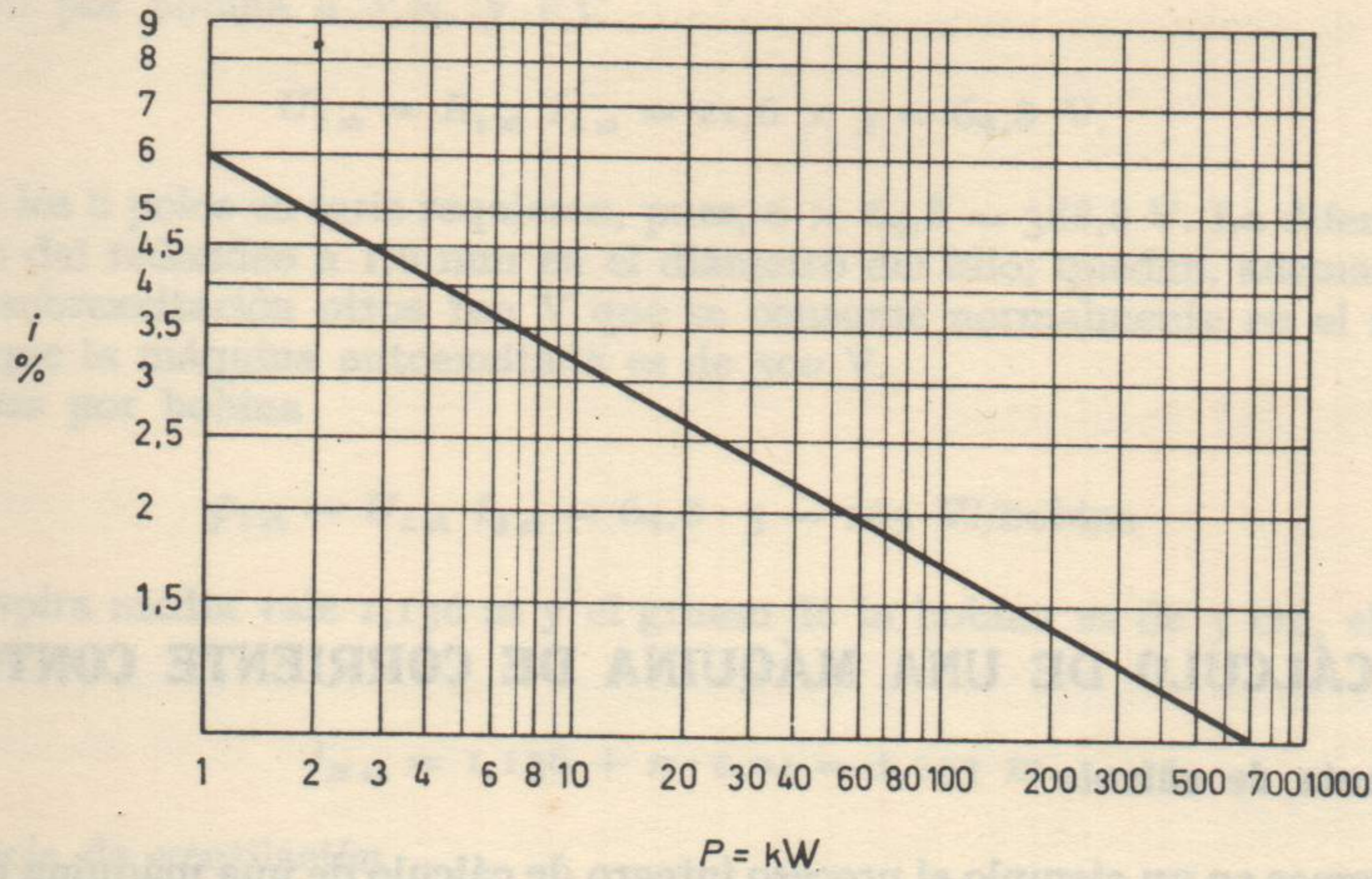


Fig. 2.03.02 a. Corriente aproximada de excitación shunt.

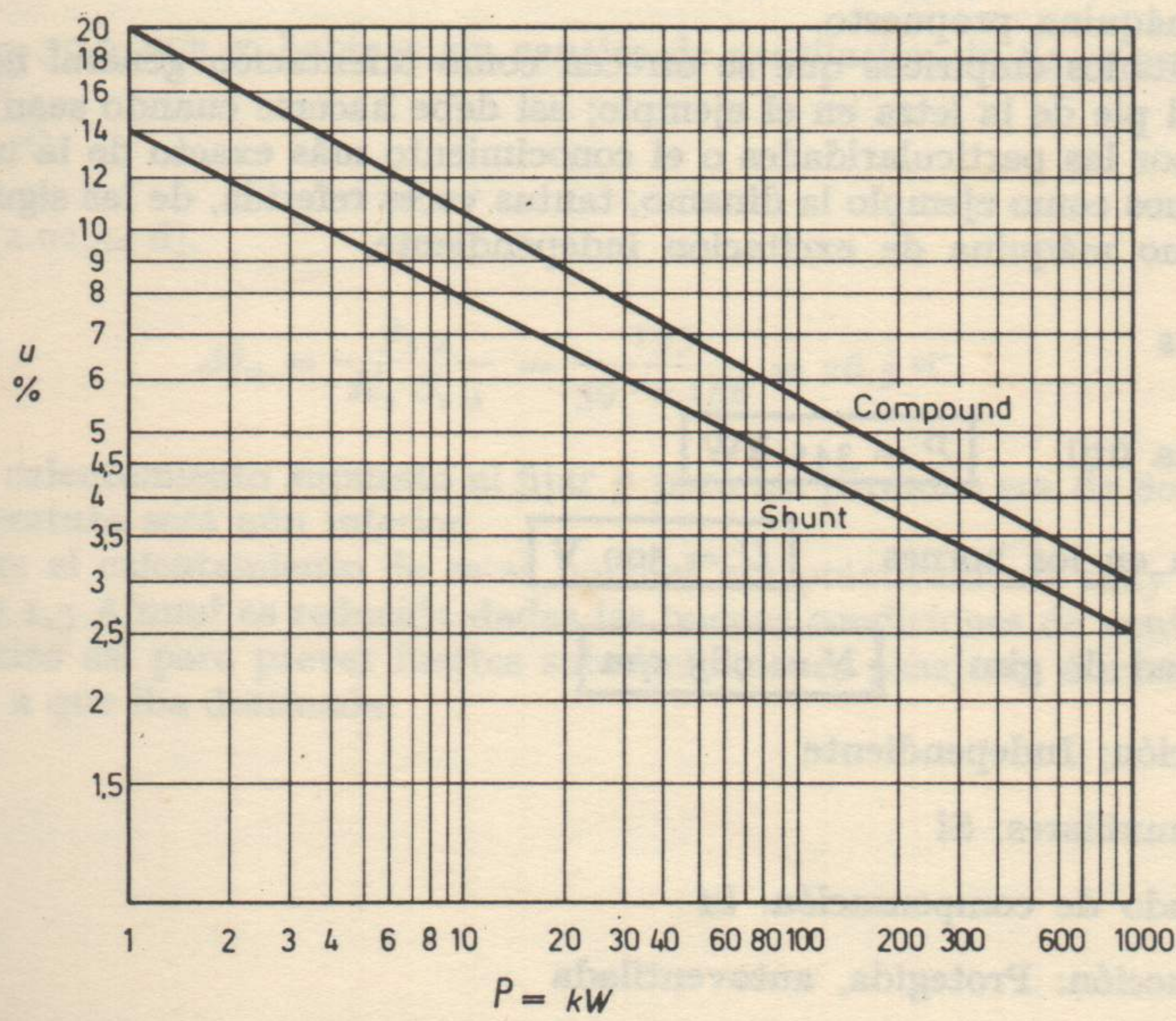


Fig. 2.03.02 b. Caída de tensión aproximada en el circuito del inducido.

012) Corriente de línea $I = \frac{P_b}{U} = \frac{345}{0,5} = 690 \text{ A}$

013) Corriente en el circuito derivación $I_{sh} = \dots \% =$ (fig. 2.03.02 a)

014) Corriente de inducido
 Gener. excit. independiente = $I = 690 \text{ A}$
 Maq. shunt o compound $I \pm I_{sh} = \dots$

015) Caída de tensión

016) F.e.m. prevista

017) Par en bornes

018) Tensión de la armadura

2.03.03 Sistema inducido

a) Armadura

021) Diámetro del inducido

022) Número de polos
 Pero se decide según la potencia y menor inducción

023) Inducción en el inducido

024) Carga lineal

025) Recubrimiento

026) Constante de inducción

(Normal, $C = \dots$)

027) Volumen

028) Longitud del inducido

029) Tipo de armadura

015) Caída de tensión prevista en el circuito de inducido

$$u = 2,5 \% U = 2,5 \frac{500}{100} = 12,5 \text{ V} \quad (\text{fig. 2.03.02 b})$$

016) F.e.m. prevista

$$E = U \pm u = 500 + 12,5 = 512,5 \text{ V}$$

017) Par «en bornes» $M_b = \frac{P_b}{\left(\frac{N}{1000}\right)} = \frac{345}{0,985} = 350 \frac{\text{W}}{\text{r/m}}$ (párrafo 2.01.06)

018) Tensión de la excitatriz $U_{ex} = 120 \text{ V}$

2.03.03 Sistema inducido

a) Armadura. Valores provisionales

021) Diámetro del inducido $D = 60 \text{ cm}$ (fig. 2.02.05 a)

022) Número de polos. Recomendado, $2p = 8$ polos (fig. 2.02.05 b)
Pero se decide adoptar $2p = 6$ polos para mayor holgura de los polos de conmutación y menor trabajo en el devanado compensador.

023) Inducción en el entrehierro. En carga $\hat{B}_{\delta} = 0,82 \text{ T}$ (fig. 2.02.02 a)

$$\text{En vacío, } \hat{B}_{\delta_0} = \hat{B}_{\delta} \frac{U}{E} = 0,82 \frac{500}{512,5} = 0,8 \text{ T}$$

024) Carga lineal específica $q = 335 \text{ Ac/cm}$ (fig. 2.02.02 b)

025) Recubrimiento polar $\psi = 0,62$ (párr. 2.02.05)

026) Constante de inducido

$$C = \frac{M_b}{V_{\square}} = \frac{\left(\frac{P_b}{N/1000}\right)}{V_{\square}} = \frac{\psi}{60,7} (\hat{B}_{\delta_0} q) = \quad [2.02.02 \text{ b}]$$

$$= \frac{0,62}{60,7} (0,08 \cdot 335) = 2,74 \frac{\left(\frac{\text{W}}{\text{r/m}}\right)}{\text{dm}^3}$$

$$\left(\text{Normal, } C = 2,95 \frac{\left(\frac{\text{W}}{\text{r/m}}\right)}{\text{dm}^3} \right) \quad (\text{fig. 2.02.02 c})$$

027) Volumen prismático de inducido

$$V_{\square} = \frac{M_b}{C} = \frac{350}{2,74} = 128 \text{ dm}^3 \quad [2.02.02 \text{ b}]$$

028) Longitud del inducido

$$L = \frac{V_{\square}}{D^2} = \frac{128}{6^2} = 3,55 \text{ dm} \quad [2.02.03 \text{ a}]$$

029) Tipo de arrollamiento: Imbricado simple (párr. 2.02.08)

030) Número de vías $\boxed{2a} = 2p = \boxed{6}$ [2.02.11 a]

031) Corriente por vía $\boxed{I_c} = \frac{I}{2a} = \frac{690}{6} = \boxed{115 \text{ A}}$

032) Número de conductores del inducido

$$Z = \frac{\pi D q}{I_c} = \frac{\pi \cdot 60 \cdot 335}{115} = 550 \text{ cond.} \quad [2.02.07 \text{ b}]$$

b) Armadura. Valores adoptados

041) Diámetro del inducido $\boxed{D = 60 \text{ cm}}$

042) Longitud del inducido $\boxed{L = 36 \text{ cm}}$

043) Número de canales de ventilación radial $\boxed{n_c = 4 \text{ canales}}$

044) Longitud axial por canal $\boxed{\varepsilon_c = 1 \text{ cm}}$

045) Longitud bruta de hierro $\boxed{L_h} = L - n_c \varepsilon_c = 36 - 4 \cdot 1 = \boxed{32 \text{ cm}}$ } [1.04.17 d]

046) Longitud neta de hierro $\boxed{L_{Fe}} = k_{Fe} L_h = 0,9 \cdot 32 = \boxed{28,8 \text{ cm}}$ }

047) Número de polos $\boxed{2p = 6 \text{ polos}}$

048) Paso polar $\boxed{\tau_p} = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 60}{6} = \boxed{31,4 \text{ cm}}$

049) Velocidad periférica del inducido $\boxed{v} = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \cdot 0,6 \cdot 985}{60} = \boxed{30,9 \text{ m/s}}$

c) Arrollamiento

051) Ondulado simple en dos capas

052) Pares de vías $a = 1$ [2.02.09 a]

053) Número de ranuras $n =$
Comprobaciones:

054) Ranuras por polo $n_p = \frac{n}{2p} = \dots \geq \frac{3 \dots 4}{1 \dots 4}$ } (2.02.22 a) y (párr. 2.02.09)

055) » » par de polos $\frac{n}{p} =$ (fraccionario) }

056) Pares de polos $p = \dots$ } [2.02.09 c]

057) Secciones por ranura $u = \dots$ (compatible)

058) Número de delgas $K = n u = \dots$

059) Paso en el colector $y_k = \frac{K \mp 1}{p} = \dots$ [2.02.09 b]

060) Comprobación:

Tensión por delgas

061) Paso de bobinas

062)

063) Paso frontal

064)

071) Imbricación simple

072) Pares de polos

073) Pares de vías

074) Número de ranuras

075) Comprobaciones:

Ranuras por polo

Ranuras por par de polos

076) Secciones por ranura

077) Número de delgas

078) Paso en el colector

079) Comprobación:

Tensión por delgas

080) Paso de bobinas

081)

082) Paso frontal

083) Paso de las bobinas

084) Número de bobinas

085) Sección de las conexiones compensadoras [2.02.13 b] y (párr. 2.02.13)

$$s_{ac} = \frac{I}{18} = \frac{690}{18} = 38 \text{ mm}^2$$

$$s_{ac} = \frac{s_c}{3 \dots 4} = \frac{28,6}{3 \dots 4} = 9,6 \dots 7,2 \text{ mm}^2 \quad (\text{Véase 171})$$

Adoptado $s_{ac} = 6 \text{ mm}^2$

091) *Imbricado doble en dos capas*

092) Pares de polos $p =$

093) Pares de vías $a = 2p = \dots$ [2.02.15 a]

094) Número de ranuras $n = \dots$

095) Comprobaciones:

$$\text{Ranuras por polo } n_p = \frac{n}{2p} = \dots \geq \frac{3 \dots 4}{1 - \psi} = \dots \quad [2.02.22 \text{ a}]$$

Arrollamiento de simple cierre, $n = \text{impar}$

» de doble » , $n_p = \text{entero}$ } [párr. 2.02.15]

096) Secciones por ranura $u = \dots$

097) Comprobaciones:

Arrollamiento de simple cierre $u = \text{impar}$

Arrollamiento de doble cierre $u = \text{par}$

} (párr. 2.02.15)

098) Número de delgas $K = n u = \dots$

099) Comprobaciones:

Arrollamiento de simple cierre $K = \text{impar}$

» » doble » $K = \text{par}$

} (párr. 2.02.15)

100) Paso en el colector $y_k = \pm 2$ [2.02.15 b]

101) Comprobación:

$$\text{Tensión por delga } u_k = \frac{U}{K/2p} = \dots \left\{ \begin{array}{l} \leq 14 \dots 16 \text{ V (sin dev. de compens.)} \\ \leq 20 \text{ V (con dev. de compens.)} \end{array} \right\} \text{ (párr. 2.02.30)}$$

102) Paso de bobinas: en ranuras $y_n \approx \frac{n}{2p} = \dots$ [2.02.15 c]

103) Comprobación:

Arrollamiento de doble cierre $y_n = \text{entero} + 1/2$ (párr. 2.02.15)

104) Paso de bobinas: en lados de una capa $y_1 = y_n u = \dots$ [2.02.15 d]

105) Comprobación:

Arrollamiento de doble cierre $y_1 = \text{impar}$ (párr. 2.02.15)

106) Paso frontal en lados

107) Paso de las conexiones

108) Número de conexiones

109) Sección de las conexiones

110) Número de conexiones

111) Ondulado múltiple

112) Pares de polos $p =$

113) Pares de vías $a =$

114) Condición de simetría

115) Número de ranuras

116) Comprobaciones:

Ranuras por polo

Condición de simetría

117) Secciones por ranura

118) Comprobación: $u_k =$

119) Número de delgas $K =$

120) Paso en el colector

121) Comprobaciones:

Tensión por delgas

122) Número de bobinas

Preferible: $2 - 1$

En máquinas de $2 - 1$

123) Paso de bobinas

- 106) Paso frontal: en lados de una capa $y_2 = y_1 \mp 2 = \dots$ [2.02.15 e]
- 107) Paso de las conexiones compensadoras $y_c = \frac{2K}{a} = \dots$ delgas [2.02.18 a]
- 108) Número de conexiones por cada ranura = ... (párr. 2.02.13)
- 109) Sección de las conexiones compens. y equipotenc. [2.02.13 b] y párr. 2.02.13
- $$s_{ac} = \frac{I}{18} = \dots \text{ mm}^2$$
- $$s_{ac} = \frac{s_c}{3 \dots 4} = \dots \text{ mm}^2 \quad (\text{Véase 171})$$
- 110) Número de conexiones equipotenciales (párr. 2.02.18)
- 111) Ondulado múltiple (serie-paralelo) en dos capas
- 112) Pares de polos $p =$
- 113) Pares de vías $a =$
preferible $a = 2$
- 114) Condición de simetría $\frac{p}{a} = \dots = \dots$ entero [2.02.19 a]
- 115) Número de ranuras $n =$
- 116) Comprobaciones:
- Ranuras por polo $n_p = \frac{n}{2p} = \dots \geq \frac{3 \dots 4}{1 - \psi}$ [2.02.22 a]
- Condición de simetría $\frac{n}{a} = \dots$ (entero)
- 117) Secciones por ranura $n = \dots$ (compatible) $\left\{ \begin{array}{l} [2.02.19 c] \\ [2.02.19 d] \end{array} \right.$
- 118) Comprobación: $1 < u < 5$ (párr. 2.02.19)
- 119) Número de delgas $K = n u = \dots$
- 120) Paso en el colector $y_k = \frac{K \mp a}{p} = \dots = \dots$ [2.02.19 b]
- 121) Comprobaciones:
- Tensión por delga $u_k = \frac{U}{K/2p} = \dots \left\{ \begin{array}{l} \leq 14 \dots 16 \text{ V (sin dev. de compens.)} \\ \leq 20 \text{ (con dev. de compens.)} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{(párr.} \\ \text{2.02.30)} \end{array} \right.$
- 122) Número de cierres $t = \text{m.d.c. de } \left\{ \frac{a}{y_k} \right\} = \dots$
Preferible: $t = 1$
En máquinas de 5 y 7 pares de polos $t = 1$ ó 2 } (párr. 2.02.19)
- 123) Paso de bobina: en ranuras $y_n \approx \frac{n}{2p} = \dots$ [2.02.19 e]

- 124) en lados de una capa $y_1 = y_n u = \dots$ [2.02.19 f]
 125) Paso frontal en lados de una capa $y_2 = y_k - y_1 = \dots$ [2.02.19 g]
 126) Paso de las conexiones de equilibrio $y = \frac{K}{a} = \dots$ (párr. 2.02.21)
 127) Número de conexiones = ... por cada ranura (párr. 2.02.13)
 128) Sección de las conex. de equil. $s_{ae} = \frac{I}{18} = \dots \text{ mm}^2$ [2.02.13 b] y (párr. 2.02.13)

$$s_{ae} = \frac{s_c}{3 \dots 4} = \dots \text{ mm}^2 \quad (\text{Véase 171})$$

d) Inducción $\hat{B}_{\Omega \delta o}$ en vacío y carga lineal específica q resultantes

- 131) Conductores por sección o por delga (par: mínimo, 2). (Véase 032)

$$Z_K = \frac{Z}{K} = \frac{550}{300} = 1,84$$

Adoptado $Z_K = 2 \text{ cond/delga}$

- 132) Conductores totales definitivos

$$Z = K Z_K = 300 \cdot 2 = 600 \text{ conduct.}$$

- 133) Conductores por ranura (número par)

$$Z_n = \frac{Z}{n} = \frac{600}{75} = 8 \text{ cond./ran.}$$

- 134) Inducción teórica resultante en el entrehierro, en vacío

$$\begin{aligned} \hat{B}_{\Omega \delta o} &= \frac{382 U}{\psi n \left(\frac{N}{1000} \right) \frac{Z_n}{a} (D L)} && [2.02.07 e] \\ &= \frac{382 \cdot 500}{0,62 \cdot 75 \cdot 0,985 \cdot \frac{8}{3} \cdot 60 \cdot 36} = 0,723 \text{ T} \end{aligned}$$

- 135) Carga lineal específica definitiva

$$q = \frac{Z I_c}{\pi D} = \frac{600 \cdot 115}{\pi \cdot 60} = 366 \text{ Ac/cm}$$

- 136) Flujo en el entrehierro en vacío

$$\hat{\Phi}_{\delta o} = \psi \tau_p L \hat{B}_{\Omega \delta o} = 0,62 \cdot 0,314 \cdot 0,36 \cdot 0,723 = 0,0508 \text{ Wb} \quad [1.04.08 b]$$

e) Dimensiones de los conductores y ranuras (provisionales)

- 141) Longitud de cabeza de bobina (aprox.)

142) Longitud

143) Relación

144) Densidad

145) Altura

146) $\frac{(g \cdot \Delta)}{\Delta \theta}$

por °C

147) $\Delta \theta$

148) $(g \cdot \Delta)$

149) Densidad

150) Sección

según

151) Inducción

En campo

En vacío

152) Factor

153) Paso

$$L_{cb} \approx \frac{4,5 D}{2p} + 3 = \frac{4,5 \cdot 60}{6} + 3 = 48 \text{ cm} \quad [2.02.36 \text{ b}]$$

142) Longitud media por conductor (aprox.)

$$l_m = L + L_{cb} = 36 + 48 = 84 \text{ cm}$$

143) Relación

$$\frac{l_m}{L} = \frac{84}{36} = 2,33$$

141) Densidad de corriente admisible (1.º criterio)

$$\Delta = 5,4 \text{ A/mm}^2 \quad (\text{fig. 2.02.25 b})$$

145) Altura máxima por barra $h_b = 11 \text{ mm}$

(fig. 2.02.25 c)

146) $\frac{(q \Delta)}{\Delta \theta}$ admisible

$$\text{por } ^\circ\text{C de } \Delta \theta \text{ en las cabezas de bobinas } \frac{(q \Delta)}{\Delta \theta} = 32,5 \quad (\text{fig. 2.02.25 a})$$

147) $\Delta \theta$ admisible en las cabezas de bobina $80^\circ - 15^\circ = 65^\circ\text{C}$

$$148) (q \Delta) \text{ admisible} = \frac{(q \Delta)}{\Delta \theta} \Delta \theta = 32,5 \cdot 65 = 2110$$

149) Densidad de corriente admisible (2.º criterio)

$$\Delta = \frac{(q \Delta)}{q} = \frac{2110}{366} = 5,77 \text{ A/mm}^2$$

150) Sección de conductor $s_c = \frac{I_c}{\Delta}$

$$\text{según 1.º criterio } s_c = \frac{115}{5,4} = 21,3 \text{ mm}^2$$

$$\text{» 2.º criterio } s_c = \frac{115}{5,77} = 19,8 \text{ mm}^2$$

151) Inducción teórica aparente en la raíz de los dientes (admisibles)

$$\text{En carga } B'_{am} \approx 2 \text{ T} \quad (\text{párr. 2.02.23})$$

En vacío y con onda rectangular (suponiendo provisionalmente $K_M = 0,95$)

$$B'_{am0} = \frac{1}{K_M} \frac{U}{E} B'_{am} \approx \frac{1}{0,95} \frac{500}{512,5} 2 \approx 2,06 \text{ T} \quad (\text{párr. 2.02.23})$$

152) Factor de corrección lineal para los dientes

$$\boxed{K_{Fe}} = \frac{L}{L_{Fe}} = \frac{36}{28,8} = \boxed{1,25} \quad [2.02.23 \text{ b}]$$

153) Paso de ranuras en el entrehierro $\tau_\delta = \frac{\pi D}{n} = \frac{\pi \cdot 60}{75} = 2,51 \text{ cm}$

154) Espesor del diente en la raíz

$$t_o = K_{F_o} \tau_o \frac{\hat{B}_{\Omega_{do}}}{\hat{B}'_{\Omega_{amo}}} = 1,25 \cdot 2,51 \frac{0,723}{2,06} = 1,1 \text{ cm} \quad [2.02.23 \text{ a}]$$

f) Trazado completo de la ranura y ordenación de los conductores (definitivo)

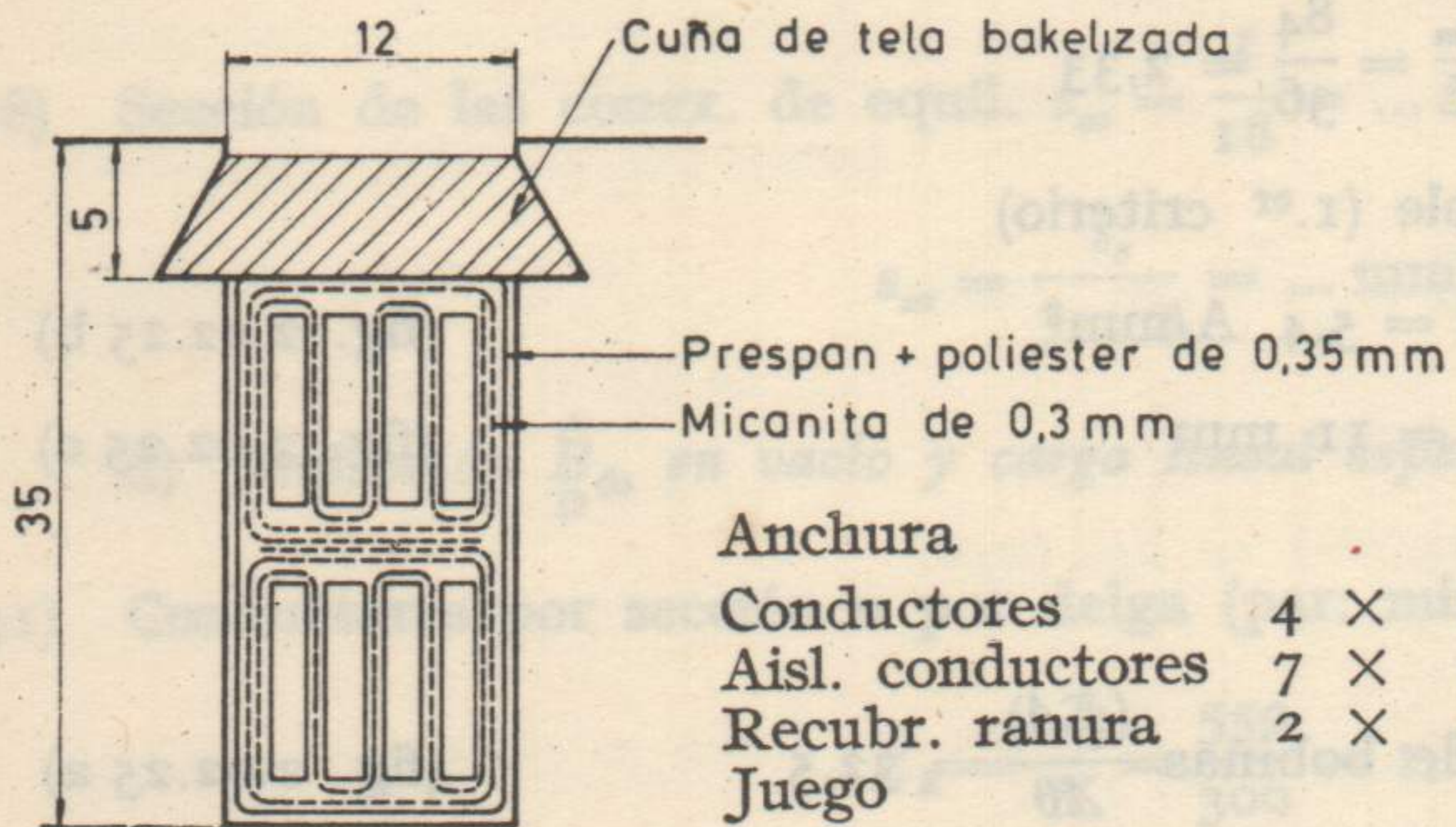


Fig. 2.03.03 c. Disposición de la ranura (Dinamo de 345 kW, 500 V, 690 A, 985 r/m.)

Anchura			
Conductores	4 × 2,2	= 8,8	cobre
Aisl. conductores	7 × 0,3	= 2,1	micanita
Recubr. ranura	2 × 0,35	= 0,7	prespan + poliéster
Juego		= 0,4	
Suma		= 12,0	

Altura			
Conductores	2 × 13,	= 26	cobre
Aisl. conduct.	2 (4 × 0,3)	= 2,4	micanita
Recubr. ranura		= 0,35	prespan + poliéster
Asiento cuña		= 0,35	prespan + poliéster
Para la cuña		= 5	tela baquelizada
Juego		= 0,9	
Suma		= 35,0	

161) Disposición definitiva de la ranura, según la figura 2.03.03 c

162) Anchura de ranura $a = 12 \text{ mm} = a_o$

163) Profundidad de ranura $h_t = 35 \text{ mm}$

g) Conductores

171) Sección del conductor $s_c = 13 \times 2,2 = 28,6 \text{ mm}^2$

Aislamiento del conductor: micanita en zigzag de 0,3 mm

Recubrimiento de ranura: prespan + poliéster de 0,35 mm

Asiento de cuña: » + » » 0,35 mm

Separador adicional entre capas: nulo

Separador de fondo de ranura: nulo

172) Densidad definitiva de corriente $\Delta = \frac{I_c}{s_c} = \frac{115}{28,6} = 4 \text{ A/mm}^2$

173) Producto $(q\Delta) = 366 \cdot 4 = 1464$

174) Calentamiento probable

$$\Delta\theta = \frac{(q\Delta)}{\left(\frac{q\Delta}{\Delta\theta}\right)} + 10 \dots 15 \text{ } ^\circ\text{C} = \frac{1464}{32,5} + 15 = 60 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{párr. 2.02.25})$$

en vez de 80 °C admisibles (008)

h) Dientes

181) Diámetro exterior de los dientes $D_M = D = 600 \text{ mm}$

182) » medio » » $D_m = D - h_t = 600 - 35 = 565 \text{ mm}$

183) » en la raíz » » $D_o = D - 2 h_t = 600 - 2 \cdot 35 = 530 \text{ mm}$

184) Paso exterior de ranura $\tau_M = \frac{\pi D_M}{n} = \frac{\pi \cdot 600}{75} = 25,1 \text{ mm}$

185) » medio » » $\tau_m = \frac{\pi D_m}{n} = \frac{\pi \cdot 565}{75} = 23,65 \text{ mm}$

186) » mínimo » » $\tau_o = \frac{\pi D_o}{n} = \frac{\pi \cdot 530}{75} = 22,2 \text{ mm}$

187) Grosor máximo de diente $t_M = \tau_M - a = 25,1 - 12 = 13,1 \text{ mm}$

188) » medio » » $t_m = \tau_m - a = 23,65 - 12 = 11,65 \text{ mm}$

189) » mínimo » » $t_o = \tau_o - a = 22,2 - 12 = 10,2 \text{ mm}$

en vez de 11 mm señalados provisionalmente (154)

190) Parámetro $k_{tM} = K_{Fe} \frac{\tau_M}{t_M} - 1 = 1,25 \frac{25,1}{13,1} - 1 = 1,4 \quad [1.04.17 n]$

191) » $k_{tm} = K_{Fe} \frac{\tau_m}{t_m} - 1 = 1,25 \frac{23,65}{11,65} - 1 = 1,54 \quad [\text{ } \text{ }]$

192) » $k_{to} = K_{Fe} \frac{\tau_o}{t_o} - 1 = 1,25 \frac{22,2}{10,2} - 1 = 1,72 \quad [\text{ } \text{ }]$

Comprobación:

193) Inducción máxima teórica aparente en los dientes, resultante en vacío:

$$\hat{B}'_{\Omega dM0} = K_{Fe} \frac{\tau_\delta}{t_o} \hat{B}_{\delta o} = 1,25 \frac{25,1}{10,2} 0,723 = 2,22 \text{ T} \quad [2.02.23 a]$$

en vez de 2,06 T (151).

i) Núcleo del inducido

194) Inducción admisible

en carga $\hat{B}_n = 1,2 \text{ T}$

(párr. 2.02.28)