

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

" CALCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA
MAQUINA ASINCRONICA DE 1 Kw. DE POTENCIA NOMINAL "

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO EN LA ESPECIALIZACION DE
POTENCIA

CARLOS HUMBERTO NARVAEZ CANO

Agosto, 1978

Certifico que este trabajo fue
realizado en su totalidad por el
Sr. Carlos H. Narváez Cano.

Agosto, 1978

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Menteor Poveda", is written over a light blue rectangular background. The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke extending to the right.

Ing. Menteor Poveda
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

La buena voluntad del Ingeniero Méntor Poveda y la ayuda incondicional del Dr. Lajos Bajsa hicieron posible, lo imposible, la realización de la presente tesis.

Por lo cual, les doy gracias y les deseo muchos éxitos en el futuro.

Además debo agradecerle al Sr. José Galeas por su colaboración en la construcción de las partes mecánicas del motor.

CARLOS NARVAEZ CANO

CALCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA ASINCRONICA

DE 1 KW. DE POTENCIA NOMINAL

Página

TEMARIO

INTRODUCCION, Objetivo

CAPITULO I : Cálculos y Diseños eléctricos

1. 1.	Cálculo de las dimensiones Principales	
1.	Esfuerzos principales	1
2.	Diámetros y largo de rotor.....	2 - 4
1. 2.	Diseño de los devanados	5
1.	Consideraciones sobre la influencia de las armónicas de flujo.....	5
2.	Selección del paso del devanado al estator.....	5 - 6
3.	Número de espiras y sección del conductor.....	7 - 8
4.	Area necesaria de la ranura del estator.....	9
5.	Resistencia y pérdidas en el Cu del devanado estató- rico.....	10-11
1. 3.	Cálculo y diseño de la Jaula.....	11
1.	Las corrientes de varilla y anillo.....	12
2.	Pérdidas de Cu en el devanado del rotor.....	13
3.	El valor de la resistencia del rotor reducida al es- tator.....	14-17
1. 4.	La corriente de magnetización.....	18
1.	Factor de Carter del estator y del rotor.....	18-19
2.	Valor máximo de la inducción magnética en el entre- hierro.....	19-21

3.	Fuerza magnetomotriz necesaria para el entrehierro.....	19 - 21
4.	Fuerza magnetomotriz para los dientes.....	21 - 23
5.	Fuerza magnetomotriz para las coronas.....	23 - 26
6.	Cálculo de la corriente de magnetización.....	26
1. 5.	Pérdidas en vacío.....	27
1.	Cálculo del peso de los dientes y corona del estator.....	27 - 28
2.	Cálculo de las pérdidas en los dientes y en la corona.....	28 - 29
3.	Pérdidas de cobre en vacío.....	30
4.	Pérdidas por rozamiento y ventilación (valor estimado).....	30
5.	La componente activa de la corriente en vacío...	30
1. 6.	La corriente en vacío y su factor de potencia...	31
1.	Cálculo y determinación de la corriente en vacío y en su factor de potencia.....	31
1. 7.	Reactancias de dispersión.....	31 - 48
1.	Reactancias de dispersión del estator: de las ranuras, de las cabezas del devanado y del <u>entrehierro</u>	49
2.	Reactancias del rotor: de las ranuras y del <u>entrehierro</u>	49 - 50
3.	Reactancia total de dispersión.....	51

1. 8.	La impedancia y corriente en cortocircuito.....	51
1.	Cálculo de la impedancia y corriente en cortocircui- to.....	51 - 52
1. 9.	La impedancia correspondiente al deslizamiento infi- nitivo.....	53
1.	Cálculo de la impedancia para deslizamiento infinito	53
1. 10.	La potencia a través del entrehierro.....	53
1.	Deslizamiento.....	53 - 54
2.	Torque nominal y torque máximo.....	54 - 57
	CAPITULO II : Diseño mecánico	58
2. 1.	Carcasa - Tapas - Rodamientos y ventilación.....	58
1.	Preparación de los dibujos correspondientes.....	58
	CAPITULO III : Realización de las componentes mecá- nicas y de los devanados.....	59
3. 1.	Descripción de cómo se realizaron las componentes mecánicas.....	59 - 60
3. 2.	Esquema y realización del devanado estático....	61 - 64
3. 3.	Realización del devanado rotórico (jaula).....	65
	CAPITULO IV : Pruebas	66
4. 1.	Pruebas en vacío.....	66 - 68
1.	Circuitos y curvas.....	66 - 68
4. 2.	Pruebas en cortocircuito.....	68
1.	Circuitos y curvas.....	68 - 71
4. 3.	Prueba de carga.....	72
1.	Circuitos y curvas.....	72 - 73

	<u>Página</u>
CAPITULO V : Conclusiones	74
Referencias.....	75 - 76
Bibliografía.....	- 77

INTRODUCCION

OBJETIVO

La presente tesis de grado tiene como objetivo dar información sobre el diseño y construcción de un motor eléctrico trifásico de baja potencia.

Para lo cual se parte de los siguientes datos:

Motor eléctrico asincrónico

Potencia nominal = 1100 W

No. de fases : 3, voltaje nominal = 208/365

Frecuencia : F = 60 Hz, No. de Polos: (2p) = 4

Tipo de rotor : jaula de ardilla

Tipo de carcasa : cerrada

Régimen : intermitente

Factor de potencia y eficiencia : Generalmente son valores normalizados para motores de hasta 100KW

$$\cos \phi_N = 0.79 ; \eta_N = 0.78$$

C A P I T U L O I

CALCULOS Y DISEÑOS ELECTRICOS

1. 1. CALCULO DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES

1. Esfuerzos principales

Por definición, los esfuerzos principales de un motor asincrónico son:

a) La densidad de campo magnético en el entrehierro (valor promedio con respecto a la variación de la inducción a lo largo de un paso polar) $B_{\delta m}$ y.

b). La corriente total por unidad de longitud de la circunferencia del estator; A Am/cm.

Los valores admisibles para motores de 1 a 10 KW son:

Para $B_{\delta m}$: 4000 - 4700 Gauss

Para A : 180 - 280 Am / cm

Para comenzar el cálculo se toman los siguientes valores :

$$B_{\delta m} = 4.400 \text{ Gauss, } A = 200 \text{ Am/cm}$$

2. Diámetro y longitud del rotor

Para determinar el diámetro y longitud del rotor, se partirá de la expresión de la potencia aparente del motor:

$$P_A = m_1 V_{N1} I_{N1}$$

donde :

$$m_1 = \text{número de fases del estator}$$
$$V_{N1} \text{ e } I_{N1} = \text{Voltaje y corrientes nominales}$$

Según la ley de la inducción: $V_{N1} \cong E_{N1}$.

$$E_{N1} = 4,44 F_1 N_1 \xi_1 \phi$$

$$E_{N1} = \text{Voltaje inducido}$$

y siendo por definiciones:

$$A = \frac{I_{N1} m_1 2 N_1}{D \pi}$$

$$I_{N1} = \frac{A D \pi}{m_1 2 N_1}$$

En estas relaciones

m_1 = número de fases

D = diámetro interno del estator

N_1 = número de espiras por fase

ξ_1 = factor de devanado

ϕ = flujo por polo del motor

F_1 = frecuencia de la red.

Con el valor promedio de la inducción en el entrehierro se puede expresar el flujo (ϕ) :

$$\phi = B_{sm} T_p l = B_{sm} \frac{\pi D}{2 p} l$$

Siendo l = longitud axial del estator (y rotor) y τ_p = el paso polar

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p}$$

donde p es el número de pares de polos.

Reemplazando la expresión de I_{N1} y de ϕ en la fórmula de la potencia aparente se tiene:

$$P_A = 4.44 m_1 F_1 N_1 \xi_1 \left(B_{\delta m} \frac{\pi D}{2p} l \right) \left(\frac{A D \pi}{m_1 2 N_1} \right)$$

$$F_1 = \frac{P n}{60}$$

n = velocidad sincrónica en r.p.m.

$$P_A = \left(\frac{1.11 \pi^2}{60} \xi_1 B_{\delta m} A_1 \right) (D^2 l n)$$

Esta ecuación permite calcular el producto $D^2 l$ para la potencia aparente P_A , una vez que los esfuerzos $B_{\delta m}$ y A están seleccionados;

Para uso práctico es preferible reemplazar P_A en KVA en gauss $B_{\delta m}$ A_1 en Amp/cm y n en r.p.m con éstas unidades.

$$D^2 l = \frac{5.47 \times 10^{11} P_A}{\xi_1 n B_{\delta m} A_1}$$

donde $5.47 = \frac{60}{1.11 \pi^2}$

Para el diseño particular, que se ocupa este trabajo, se tiene :

$$P_{AN} = \frac{P_N}{\cos \varphi \eta} = \frac{1.100}{0,79 \times 0,78} = 1.79 \quad B_{\delta m} = 4400 \text{ gauss}$$

$$A_i = 200 \text{ Am/cm}$$

Con los valores de P_{AN} ; A_i y $B_{\delta m}$ arriba indicados

$$D^2 \ell = \frac{5.47 \cdot 10^{11} \cdot 1.79}{0.95 \cdot 1800 \cdot 4400 \cdot 200} = 650 \text{ cm}^3$$

Las láminas que están a disposición tienen el diámetro interno

$$D = 9,02 \text{ cm.}$$

Por lo tanto la longitud axial del estator tiene que ser igual a

$$\ell = \frac{650 \text{ cm}^3}{9.02 \text{ cm}^2} = 7.99 \text{ cm.}$$

Este valor de ℓ se lo puede aumentar a:

$$\ell = 8.5 \text{ cm.}$$

De acuerdo a la disponibilidad de las láminas. Esta decisión significa que los esfuerzos $B_{\delta m}$ y A_i van a disminuir ligeramente.

Las láminas se las puede ver en las 3 páginas siguientes.

*Lamina de hierro (para dínamo)
Del estator*

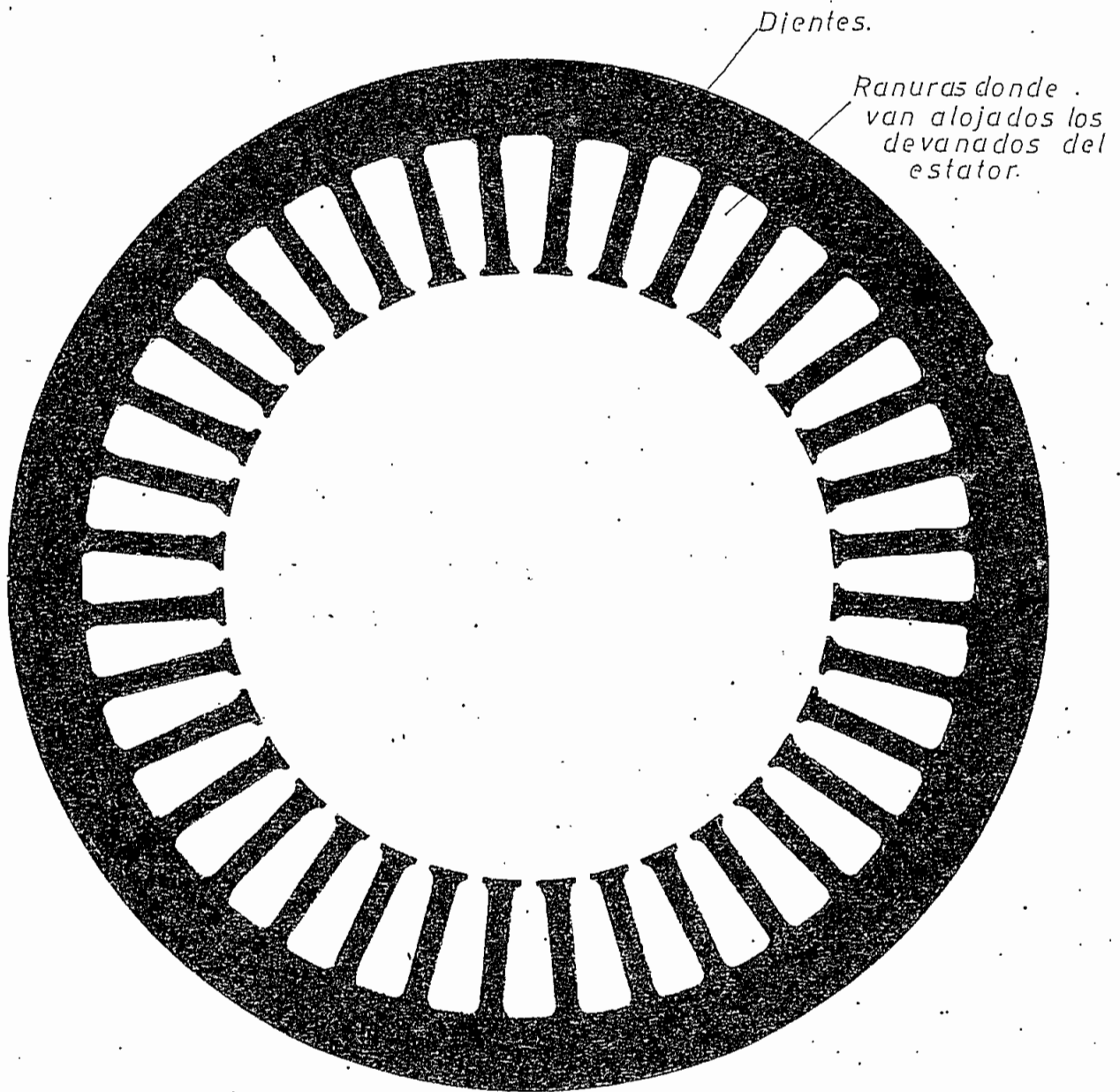
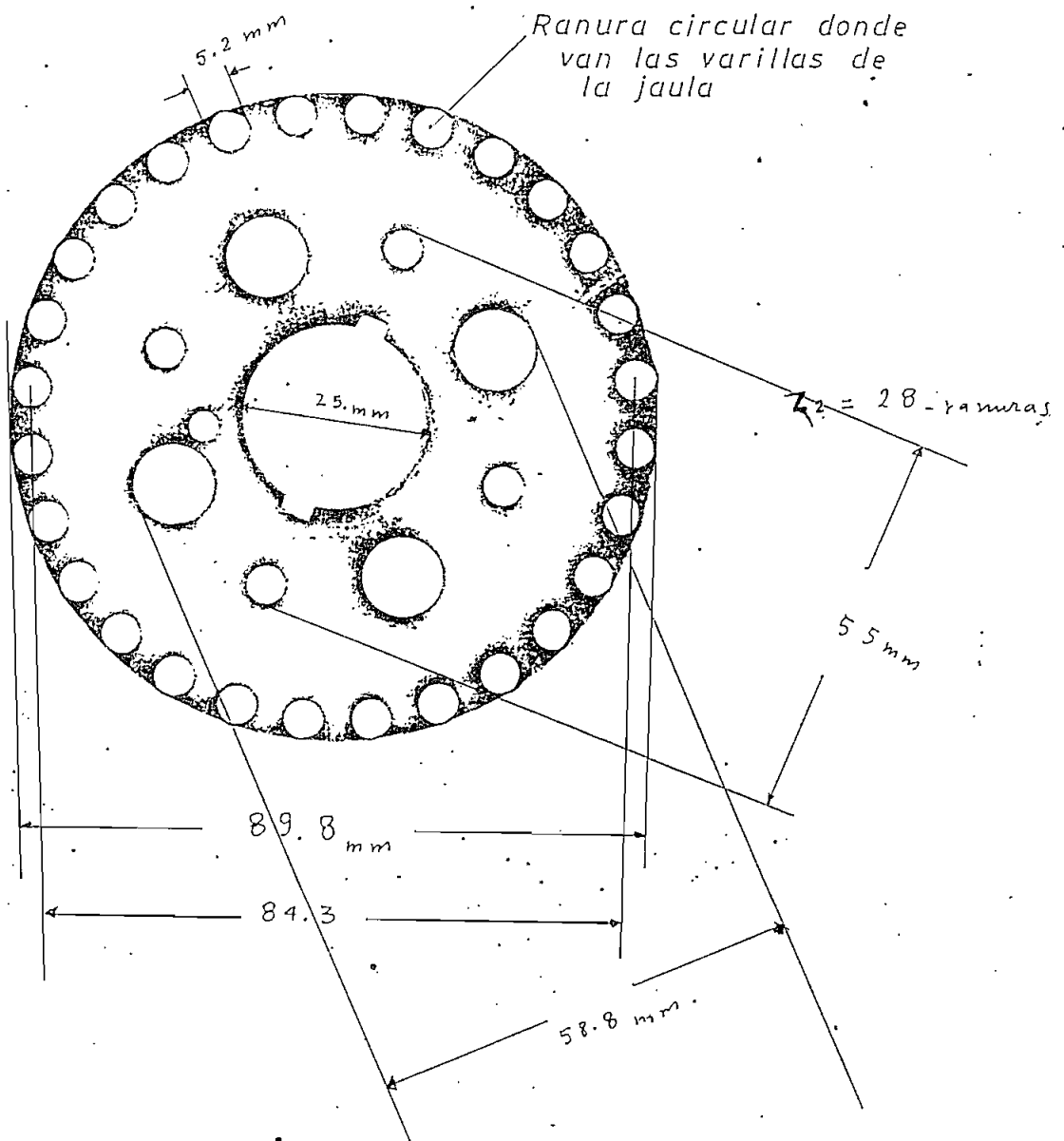
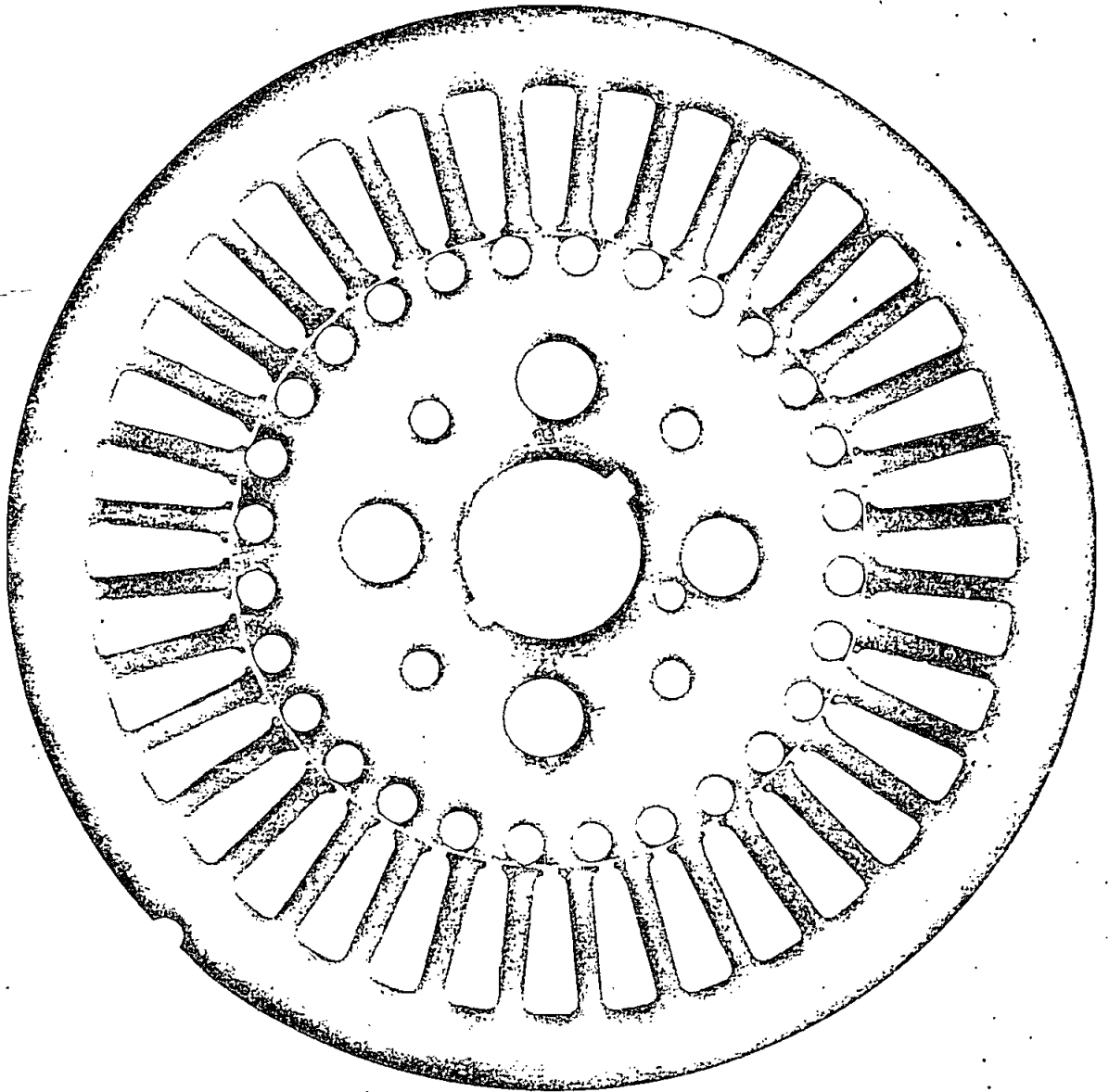


Lámina de hierro (para dínamo)
Del rotor



*Subconjunto de laminas Estator-Rotor
donde se puede apreciar el entrehierro
de 0,25mm*



1. 2. DISEÑO DE LOS DEVANADOS

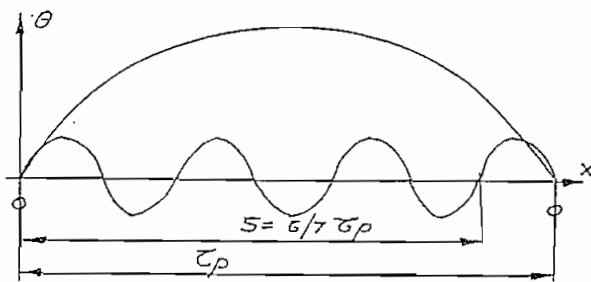
1. Consideraciones generales sobre la influencia de las armónicas del flujo

Tanto la f_{mm} del estator como del rotor, pueden descomponerse en una f_{mm} principal sinusoidalmente distribuída que abarca un paso polar completo y una serie de armónicos impares sinuoidales que al combinarse con la fundamental, dan la forma a la onda de flujo en el entrehierro. (referencia 1).

2. Selección del paso del devanado del estator

Con el fin de eliminar la séptima armónica de la excitación del devanado del estator, que puede ocasionar dificultades en el arranque se opta por un devanado con paso reducido. Se ve en la figura que si el paso del devanado queda reducido a $S_1 = \frac{6}{7} \tau_p$ la

FIGURA I - 1



concatenación de esta armónica con el devanado resulta cero, por lo tanto el devanado no está en condiciones de producirla consecuentemente no aparecerá en la distribución espacial de la excitación.

Teniendo en consideración que las láminas disponibles tienen 36 ranuras en el estator y por lo tanto el paso polar en ranuras

es
$$T_p = \frac{36}{4} = 9 \text{ ranuras.}$$

El paso real del devanado puede ser de ; 8; 6; 7 ranuras.

El paso ideal es
$$S_1 = \frac{6}{7} T_p = 0,857 T_p$$

Las posibilidades son:

$$S_1 = \frac{8}{9} T_p = 0,888$$

ó
$$S_1 = \frac{7}{9} T_p = 0,777$$

$$S_1 = \frac{8}{9} T_p$$
 da la mejor aproximación con respecto a $\frac{6}{7} T_p$

El paso definitivo para el devanado estatórico será de 8 ranuras.

$$S_1 = 8$$

con este paso el factor de devanado para la onda fundamental será

$$\xi_1 = \xi_d \times \xi_p$$

ξ_1 = factor total del devanado estatórico

ξ_d = factor de distribución del devanado

ξ_p = factor de paso del devanado

$$\xi_d = \frac{\text{sen}\left(q_1 \frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \text{sen} \frac{\alpha}{2}} = \frac{\text{Sen } 30^\circ}{3 \text{ Sen } 10^\circ} = \frac{0,5}{0,521} = 0,96 \text{ (Ref. 2)}$$

En la expresión anterior q_1 = número de ranuras por polo y por fase, en el estator; y α = ángulo eléctrico entre dos ranuras adyacentes.

$$q_1 = \frac{z_1}{2 p m_1} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3 \text{ ranuras por polo y por fase}$$

$$\alpha = \frac{P \times 360}{Z_1} = \frac{2 \times 360}{Z_1} = 20^\circ \text{ grados por ranura}$$

$$\xi_p = \cos \frac{\pi - \rho}{2} = \sin \frac{S_1}{T_p} \frac{\pi}{2} \quad (\text{Ref. 2})$$

ρ = ángulo reducido que abarca 8 ranuras

$$\xi_p = \cos \frac{180 - 160}{2} = \cos 10^\circ = 0,985$$

El factor de devanado resultante será :

$$\xi_1 = \xi_d \times \xi_p = 0,96 \times 0,985 = 0,945$$

$$\xi_1 = 0,945$$

3. Número de espiras y sección del conductor del devanado del estator

Se calcula el número de conductores por ranura del estator, de la definición de A_1 .

Siendo \bar{z}_1 el número de conductores en una ranura y T_{R1} , el paso de ranura en el estator se tiene :

$$A_1 = \frac{I_{N1} \bar{z}_1}{T_{R1}}$$

en donde I_{N1} = corriente en amperios por conductor

$$\bar{z}_1 = \frac{A_1 T_{R1}}{I_{N1}} ; \quad T_{R1} = \frac{\pi D}{Z_1} ; \quad Z_1 = \text{ranuras del estator}$$

$$\bar{z}_1 = \frac{A_1 \frac{\pi D}{Z_1}}{I_{N1}} = 200 \frac{\pi \cdot 9,02}{2,87} = 54,8$$

$$z_1 = 54.8$$

$$I_{N_1} = \text{corriente de fase}; \bar{I}_{N_1} = \frac{P_A}{3 V_{N_1}} = \frac{1.790}{3 \times 208} = 2.874$$

Teniendo algunas reservas en las dimensiones del estator y con la finalidad de facilitar la preparación del devanado, z_1 será = 52

$$z_1 = 52$$

El paso reducido del devanado del estator implica un devanado de dos capas, por tanto z_1 tiene que ser un número par.

Con $z_1 = 52$ el valor final de A_1 será:

$$A_1 = \frac{z_1 I_{N_1}}{\tau_{R_1}} = \frac{52 \times 2.87}{0,786} = 190 \text{ Am / cm.}$$

El número de conductores por fase en el devanado estatórico es :

$$2N_1 = 2 p q_1 z_1 = 4 \times 3 \times 52 = 624$$

$$N_1 = 312 \text{ espiras por fase.}$$

conociendo el número de espiras por fase se puede calcular el flujo de un polo.

$$\phi = \frac{V_{N_1} 10^8}{4.44 f_1 N_1 \xi_1} = \frac{208 \cdot 10^8}{4.44 \times 60 \times 312 \times 0.945} = 2.648 \times 10^5 \text{ max Wells}$$

La inducción promedia en el entrehierro :

$$B_{S_m} = \frac{\phi}{\tau_{Pl}} = \frac{2.648 \times 10^5}{7.08 \times 8.5} = 4400 \text{ Gauss}$$

$$T_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \times 9.02}{2p} = 7.08 \text{ cm}$$

Valor que coincide con el seleccionado en 1.1.1.

La densidad de corriente en el devanado del estator (siendo el motor de tipo cerrado) puede tener valores de 3 a 4 Amp/mm².

Si el devanado se realiza con 2 alambres No. 21 en paralelo, la sección total será:

$$A_{dev} = 2 \times 0,41 \text{ mm}^2 = 0,82 \text{ mm}^2$$

y con esto $s_1 =$ densidad de corriente = $\frac{I_{N1}}{A_{dev}} = \frac{2.87}{0.82} = 3.5 \text{ Am/mm}^2$

Valor que está dentro de los valores permitidos.

4. Area necesaria de la ranura del estator

Según la experiencia, los conductores que tienen que entrar en una ranura pueden ser colocados en ella, si la sección total neta de los conductores no sobrepasa un 35 - 40 por ciento del área de la ranura. Esta cifra es válida si el voltaje nominal de una fase no es mayor que 400 V, o sea el aislamiento de la ranura es común, sin tener que reforzarlo. La cifra más alta es válida para ranuras más cortas.

La sección total neta de los conductores por ranura es:

$$\sum A_{dev} = Z_1 A_{dev} = Z_1 \cdot 0,82 = 52 \times 0,82 = 42.64 \text{ mm}^2.$$

El área de la ranura es (ver figura I.2).

$$A_{Ri} = 5.96 \times 20 = 119 \text{ mm}^2$$

Por la redondez en las esquinas el área neta será 112 mm^2 .

$$\text{Su relación es } \frac{\sum A_{dev.}}{A_{ranura}} = \frac{42.64}{112} = 0,38$$

o sea 38 % que está dentro de lo estipulado anteriormente.

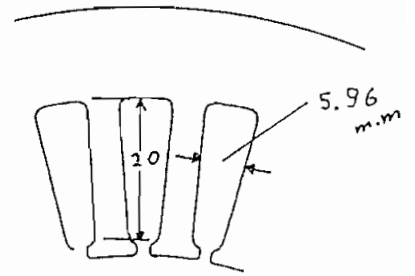


FIGURA I - 2

5. Resistencia y pérdidas de cobre en el devanado estático

Para calcular la resistencia R_1 del devanado estático, es necesario estimar la longitud de una espira. Siendo S_1 igual a 8 (paso del devanado), la distancia entre los dos lados de una espira es:

$$d = 8 \times \tau_{R_1} = 8 \times 0,786 = 6.29 \text{ cm. } \tau_{R_1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 9.02 \text{ cm}}{36} = 0.786 \text{ cm}$$

$l_c = 9.9 \text{ cm.}$ Si se supone que el camino del conductor fuera de las ranuras es casi una semicircunferencia el largo de la cabeza de una espira media es, con un factor estimado 0.9.

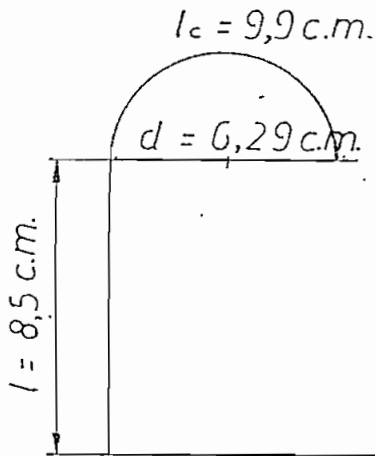


FIGURA I. 3

$$l_c = 0,9 \frac{\pi d}{2} = 0,9 \frac{3.14 \times 6.29}{2} =$$

$$8.9 \text{ cm.}$$

la longitud de una espira es según la figura I. 3.

$$l_e = 2 (l + l_c) = 34.7 \text{ cm} = 0.347 \text{ m}$$

$l_e =$ longitud de una espira

Se supone que la temperatura del devanado será 75° C para esta temperatura, la resistencia específica del Cu es.

$$\rho_{75} = 0.0216 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \quad (\text{Ref. 2})$$

y la resistencia del devanado del estator es:

$$R_1 = \rho_{75} \frac{\rho_e N_1}{A_{dev}} = 0.0216 \frac{0.347 \times 312}{2 \times 0.41} = 2.85 \Omega \text{ por fase}$$

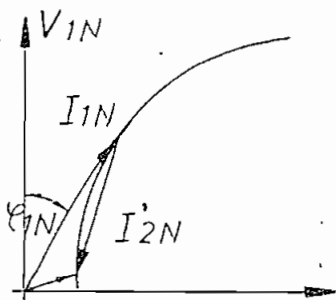
Las pérdidas del Cu en el estator serán

$$P_{ci} = m_1 R_1 I_{N1}^2 = 3 \times 2.85 \times 2.87^2 = 71 \text{ W.}$$

1. 3. CALCULO Y DISEÑO DE LA JAULA DE ARDILLA

1. La corriente de la varilla y del anillo y sus dimensiones:

FIGURA I.4

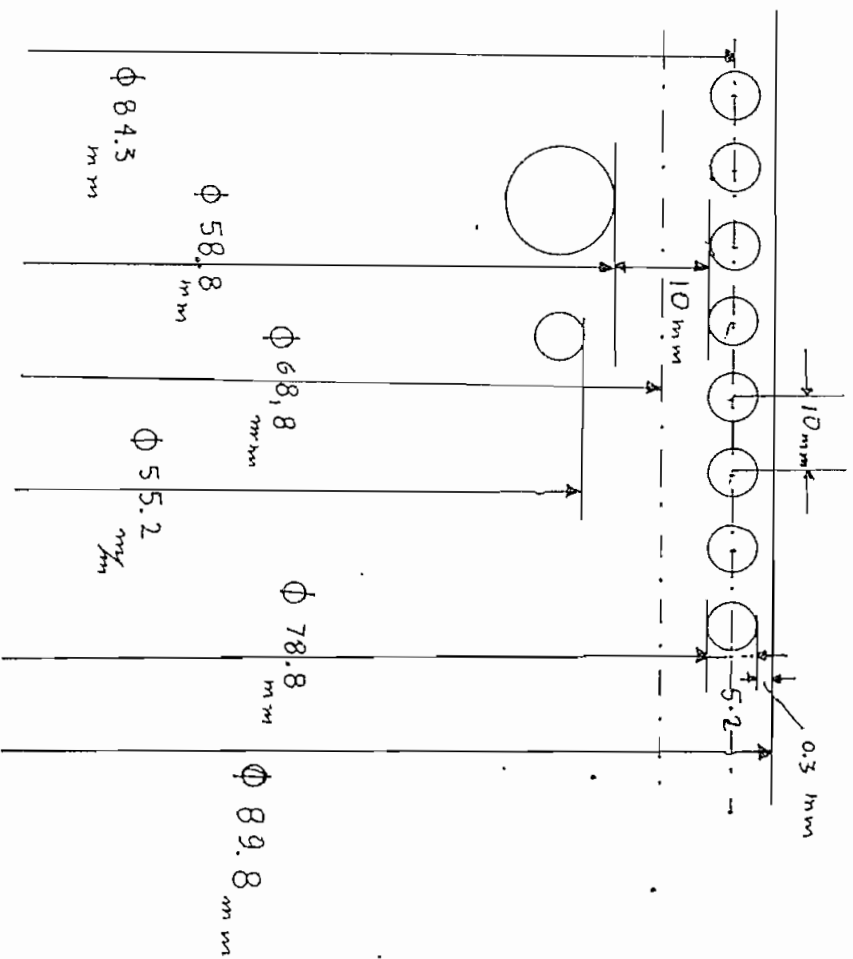


Según la Figura I. 4 la corriente secundaria en el régimen nominal, es igual con buena aproximación, a la componente activa de la corriente primaria.

La excitación producida por I_{1N} e I'_{2N} tiene que dar como resultante la excitación necesaria para mantener el flujo principal. Esto en términos de A_1 y A_2 (corrientes por unidad de circunferencia en el estator y rotor) se escribe así : $A_1 \xi_1 \cos \varphi_{1N} = A_2$

Con esta relación se calcula A_2

DIMENSIONES DETALLADAS DE
UNA LAMINA DEL ROTOR



$$A_2 = 198,5 \times 0,945 \times 0,79 = 148 \text{ Am/cm}$$

de otra parte se tiene

$$A_2 = \frac{I_v}{\tau_{R2}}$$

I_v = corriente de varilla

τ_{R2} = paso de ranura del rotor

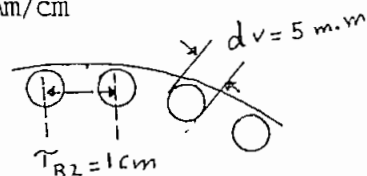


FIGURA I - 5

o sea A_2 es igual a la relación de la corriente de varilla al paso de ranura del rotor consecuentemente.

$$I_v = A_2 \tau_{R2} = 148 \text{ Am/cm} \times 1 \text{ cm} = 148 \text{ Amp}$$

La sección de las varillas es:

$$A_v = \frac{\pi d_v^2}{4} = \frac{\pi 25 \text{ mm}^2}{4} = 19,5 \text{ mm}^2$$

La densidad de la corriente en la varilla será

$$J_v = \frac{I_v}{A_v} = \frac{148}{19,5} = 7,59 \text{ Am/mm}^2$$

que es un valor admisible, porque las varillas tienen un contacto directo con el hierro del rotor y por tanto mejor refrigeración.

La corriente de anillo se calcula con la relación siguiente :

$$I_A = I_v \frac{Z_2}{2 p \pi} = 148 \frac{28}{12,56} = 330 \text{ Amp. (Ref. 3)}$$

Z_2 = número de varillas del rotor página 7

Teniendo un mayor espacio disponible para los anillos optamos por una sección.

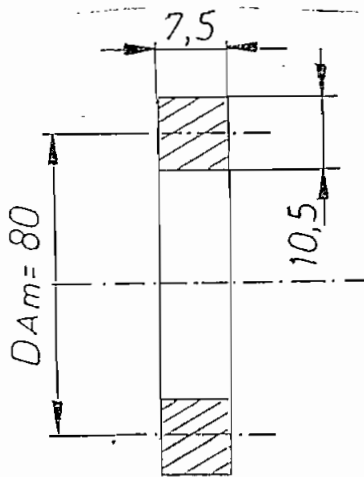
$$A_{\text{anillo}} = 7,5 \text{ mm} \times 10,5 \text{ mm} = 78,75 \text{ mm}^2$$

Fig I - 6

con lo que la densidad de corriente en los anillos será

$$J_A = \frac{330 \text{ Am}}{78.75 \text{ m}^2} = 4.2 \text{ Am/mm}^2$$

FIGURA I.6 J_A puede tener valores de hasta 6-6.5 Am/mm², sin embargo se prefiere el valor anterior para que las pérdidas en el Cu no sean grandes.



2. Pérdidas en el Cu del devanado del rotor

Pérdidas en las varillas

$$P_v = Z_1 I_v^2 \rho_{75} \frac{l_v}{A_v}$$

La longitud de la varilla l_v es idéntica a la longitud del rotor y estator o sea es.

$$l = l_v = 8.5 \text{ cm.}$$

con esto

$$P_v = 28 \times 148^2 \times 0,0216 \frac{0,085}{19.5} \approx 58 \text{ W}$$

Pérdidas en los anillos :

$$P_A = 2 I_A^2 R_R = 2 \times 330^2 \cdot 0.0216 \frac{0.08 \pi}{78.75} = 15 \text{ W}$$

Pérdidas totales de Cu en el rotor en el régimen nominal

$$P_{c2} = P_V + P_A = 58 + 15 = 73 \text{ W}$$

3. Valor de la resistencia del rotor referida, al estator

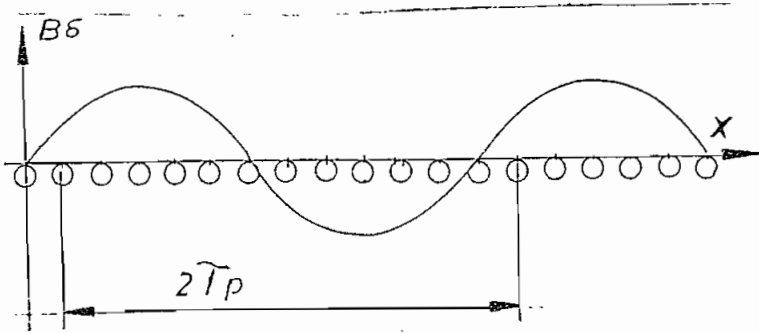
La base para calcular el valor de la resistencia del rotor referida al estator es que se exige que las verdaderas corrientes del rotor con la verdadera resistencia del mismo tienen que dar las mismas pérdidas de cobre, que la corriente del rotor referida al estator, con la resistencia del rotor referida al estator. Se supone además, que para las cantidades referidas al estator, el devanado del rotor tiene características iguales a las del devanado del estator, o sea igual número de espiras, factor de devanado y número de fases.

En cuanto a la corriente del rotor tenemos.

$$m_1 N_1 \xi_1 I_2' = m_2 N_2 \xi_2 I_2$$

o sea la corriente de fase del rotor referida al estator I_2' tiene que producir una excitación en un devanado idéntico al del estator que es igual a la excitación verdadera de la corriente I_2 en el verdadero devanado del rotor, con m_2 fases, N_2 espiras por fase y factor de devanado ξ_2 .

FIGURA I.7



Se ve en la Fig. I. que las varillas que están en la misma posición con respecto al flujo (o repartición de la inducción magnética en el entrehierro).

Se encuentran a una distancia $2 \tau_p$ la una con respecto a la otra. Entonces existen

$$m_2 = \frac{Z_2}{p}$$

varillas con corriente de fase diferente, lo que significa que la jaula es un devanado con m_2 fases, siendo una varilla una media espira.

$$N_2 = \frac{1}{2}$$

y por falta de repartición de las espiras pertenecientes a la misma fase.

$$\xi_2 = 1$$

con estos datos

$$I_2' = \frac{m_2 N_2 \xi_2 I_2}{m_1 N_1 \xi_1} = \frac{Z_2 \frac{1}{2} \cdot I_2}{m_1 p N_1 \xi_1}$$

y siendo $I_2 = p I_v$

porque hay p varillas con la misma fase de corriente que pueden y deben ser consideradas conectadas en paralelo, tenemos

$$I_2' = \frac{Z_2}{2 m_1 N_1 \xi_1} I_v = \frac{28}{2 \times 3 \times 312 \times 0.945} \cdot 148$$

$$= 2.34 \text{ Amp.}$$

En cuanto a las resistencias se puede escribir la igualdad de pérdidas de Cu con las cantidades verdaderas y referidas.

$$m_1 I_2'^2 R_2' = Z_2 I_v^2 R_v + 2 I_A^2 R_A$$

Sacando $Z_2 I_v^2$ como factor común

$$m_1 I_2'^2 R_2' = Z_2 I_v^2 \left(R_v + 2 \frac{I_A^2}{I_v^2} \frac{R_A}{Z_2} \right)$$

de esta ecuación

$$R_2' = \frac{Z_2}{m_1} \left(\frac{I_v}{I_2'} \right)^2 \left[R_v + 2 \left(\frac{I_A}{I_v} \right)^2 \frac{R_A}{Z_2} \right]$$

De las relaciones anteriores

$$\left(\frac{I_v}{I_2'} \right)^2 = \left(\frac{2 m_1 N_1 \xi_1}{Z_2} \right)^2 = \frac{4 m_1^2 N_1^2 \xi_1^2}{Z_2^2}$$

$$e \left(\frac{I_A}{I_v} \right)^2 = \left(\frac{Z_2}{2 p \pi} \right)^2$$

reemplazando estas ecuaciones en la expresión de R_2' se tiene:

$$R_2' = \frac{Z_2}{m_1} \frac{4 m_1^2 N_1^2 \xi_1^2}{Z_2^2} \left[R_v + 2 \left(\frac{Z_2}{2 p \pi} \right)^2 \frac{R_A}{Z_2} \right]$$

lo que se puede escribir después de las simplificaciones correspondientes .

$$R_2' = \frac{4 m_1 N_1^2 \xi_1^2}{Z_2} \left[R_v + \frac{2 Z_2}{4 p^2 \pi^2} R_A \right]$$

En esta ecuación R_v y R_A son la resistencia de una varilla y un anillo respectivamente. Con los datos del motor que se diseña se tiene.

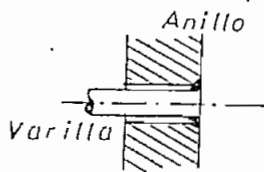
$$R_2' = \frac{4 \times 3 \times 312^2 \times 0.945^2}{28} \left[0.0216 \frac{0.085 \text{ m}}{1.95 \text{ mm}^2} + \frac{2 \times 28}{4 \pi^2} 0.216 \frac{0.08 \pi \text{ m}}{78.75} \right]$$

$$R_2' = 3.726 \times 10^4 \left[0,942 \times 10^4 + 0,245 \times 10^4 \right] \Omega$$

El resultado es

$$R_2' = 4.42 \Omega \text{ por fase}$$

En este punto hay que tomar en consideración, que no era posible realizar una soldadura perfecta entre las varillas y los anillos, la unión de los 2 elementos más bien se limita a una soldadura superficial Figura I.8.



Este hecho aumenta muy fuertemente la resistencia del rotor, pero es difícil calcular el aumento correctamente.

Puede ser una estimación decir que por la falta de contacto entre la varilla y el anillo, a lo ancho del último, se debe introducir una resistencia ΔR adicional en la expresión de R_2' . Estimando su valor preventivamente, se supone que ΔR es igual al valor doble de la contribución de los anillos a la resistencia total del rotor, así que.

$$R_2'^* = 3.726 \times 10^4 \left[0,942 \times 10^4 + 0,245 \times 10^4 + 0,5 \times 10^4 \right]$$

$$R_2'^* = 6.29 \Omega$$

La corriente I_{2N}' es 2.34 Amp y las pérdidas de Cu del rotor calculadas con las cantidades referidas al estator son

$$P_{C2} = m_1 I_{2N}'^2 R_2'^* = 3 \times 2.34^2 \times 6.29 = 103 \text{ w}$$

1. 4. LA CORRIENTE DE MAGNETIZACION

1. Factor de Carter del estator y del rotor

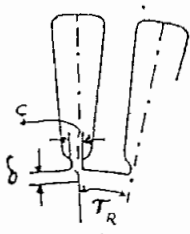
Las aberturas de las ranuras tienen el efecto de aumentar la reluctancia del entrehierro.

Este efecto puede tomarse en consideración reemplazando el verdadero entrehierro con otro mayor según la expresión siguiente:

$$\delta' = k_c \delta$$

donde δ es la longitud del entrehierro y k_c es el llamado factor de Carter.

FIGURA I. 9



$$k_c = \frac{\tau_R}{\tau_R - c \frac{c/\delta}{5 + c/\delta}}$$

Si tanto las láminas del estator como las del rotor tienen ranuras abiertas, se calcula el factor de Carter, tanto para el estator como para el rotor; el nuevo valor del entrehierro para el cálculo

de la fuerza magnetomotriz del mismo será:

$$\delta' = k_{c1} k_{c2} \delta$$

En el caso actual, las ranuras del rotor son cerradas, el rotor tiene una superficie lisa por lo tanto $k_{c2} = 1$.

Siendo $\delta = 0,0254$ cm (0.01") y la abertura de la ranura del estator $c = 0,195$ cm. Según la Figura I. 9.

El factor de Carter del estator es:

$$k_{c1} = \frac{\tau_{R1}}{\tau_{R1} - c \frac{c/\delta}{5 + c/\delta}} = \frac{0,786}{0,786 - 0,195 \frac{0,195}{5 + \frac{0,195}{0,0254}}} = 1,17$$

$$k_{ci} = 1.17$$

Y con este valor el entrehierro efectivo es

$$\delta' = 1.17 \times 0.0254 \approx 0,03 \text{ cm}$$

2. Valor máximo de la inducción magnética en el entrehierro y la Fmm para el mismo

Se conoce ya el valor promedio de la inducción magnética en el entrehierro.

Si la distribución de la misma fuera senoidal, su valor máximo sería:

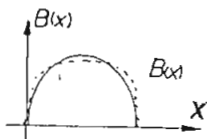
$$B_{\delta_{max}} \frac{B_{\delta_m}}{\mathcal{L}_i} = \frac{B_{\delta_m}}{\frac{2}{\pi}}$$

Sin embargo, por efecto de la saturación de los dientes, la distribución (espacial) de la B se distorcionará algo, según la Figura I. ¹⁰

\mathcal{L}_i = factor de multiplicación del valor medio para encontrar el valor máximo de acuerdo a la forma de la curva

$$\mathcal{L}_i = \frac{B_{\delta_m}}{B_{\delta_{max}}}$$

FIGURA I.10



No conociendo todavía la medida de saturación de los dientes, se aplicará un proceso de cálculo iterativo que se describe a continuación.

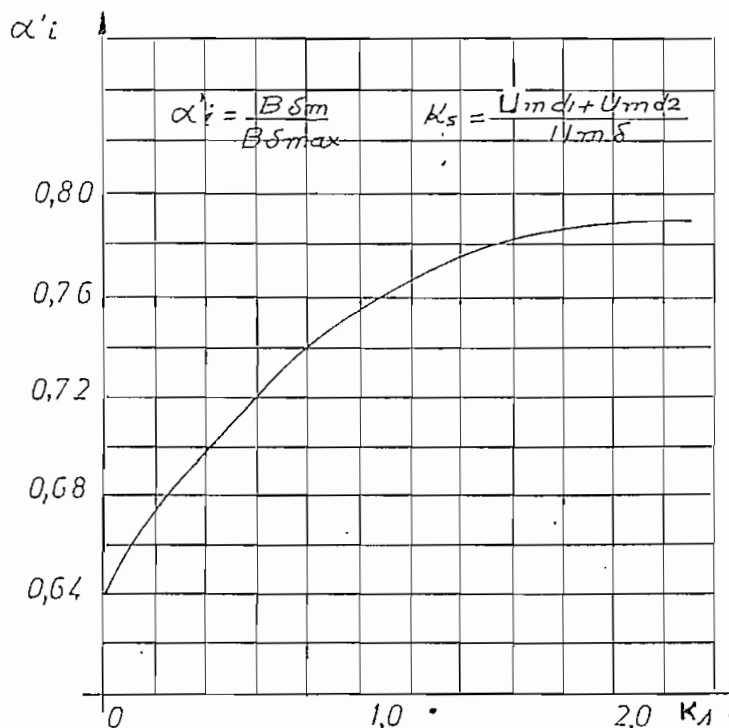
- a). Si U_m es el símbolo de la fuerza magnetomotriz, el grado de la saturación en el circuito magnético de la máquina se expresará con el llamado factor de saturación, que por definición es la fuerza magnetomotriz de los dientes para la fuerza magnetomotriz del entrehierro.

$$k_s = \frac{U_{m d1} + U_{m d2}}{U_{m \delta}} \quad (1)$$

$$k_s = \text{factor de saturación}$$

- b). De la literatura Ref. 4 se conoce el valor de α_i en función de k_s que se vé en la figura I.11.

FIGURA I.11



- c). Se tomará un valor estimado de $\alpha_i > \frac{2}{\pi}$ para calcular $B_{\delta m}$ la $B_{\delta max}$ y se calculará la Fmm del entrehierro y los dientes una vez conocidas estas cantidades, se puede calcular el valor del factor de saturación k_s . Si a este k_s le corresponde precisamente el valor de α_i utilizado para calcular el valor máximo de la inducción magnética en el entrehierro, el cálculo se ha

hecho bien. Si no hay que corregir el valor de \mathcal{L}_i y volver a calcular k_s .

Sea el valor tentativo de \mathcal{L}_i

$$\mathcal{L}_i = 0.69 ; \text{ con } k_s = 0.30$$

$$B_{\delta_{\max}} = \frac{B_{\delta_m}}{\mathcal{L}_i} = \frac{4400}{0.69} = 6.380 \text{ Gauss}$$

$$I_{m\delta} = \frac{B_{\delta_{\max}}}{\mu_0} \int' = \frac{6.380}{1.256} 0,03 = 152 \text{ A - vuelta}$$

3. Inducción magnética y Fmm de los dientes

La inducción en los dientes se calcula en base de la continuidad del flujo

$$B_{d_1} = B_{d_{\max}} \times \frac{\tau_{R1} l}{d_1 l_H}$$

en donde l_H es la longitud neta del hierro que es, con un factor de apilamiento de las láminas

$$k_e = 0.93$$

$$l_H = l k_e = 8.5 \times 0.93 = 7.9 \text{ cm.}$$

Con estos datos:

$$B_{d_1} = 6380 \frac{0,786 \times 8.5}{0,38 \times 7.9} = 14.200 \text{ Gauss}$$

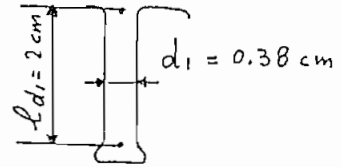
La H correspondiente, según la curva de magnetización. Referencia 5

FIGURA I.12

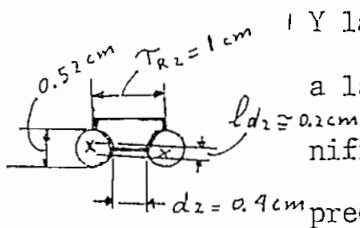
$$H_{d1} = 14 \text{ A/cm}$$

$$l_{d1} = 2 \text{ cm}$$

$$U_{m d1} = 28 \text{ A vuelta}$$



Siendo las ranuras del rotor circulares, la sección de los dientes del mismo no es constante. se calculará el valor máximo de B_{d2} con la sección mínima de los dientes y se estimará una longitud efectiva del diente para el cálculo de la Fmm del diente del rotor. Hay que notar que un proceso más detallado sería sumamente complicado.



Y la contribución de la Fmm del diente del rotor a la Fmm total del circuito magnético no es tan significativa que justifique buscar una solución más precisa.

FIGURA I.13

El valor máximo de B_{d2} (en la sección marcada X - X en la figura es :

$$B_{d2} = B_{dmax} \frac{\tau_{R2} l}{d_2 l_H} = 6380 \frac{1 \times 8.5}{0.4 \times 7.9} = 17.200 \text{ Gauss}$$

la H correspondiente: Ref (5) curva de magnetización para láminas de dínamo .

$$H_{d2} = 80 \text{ A/cm}$$

y la Fmm. correspondiente

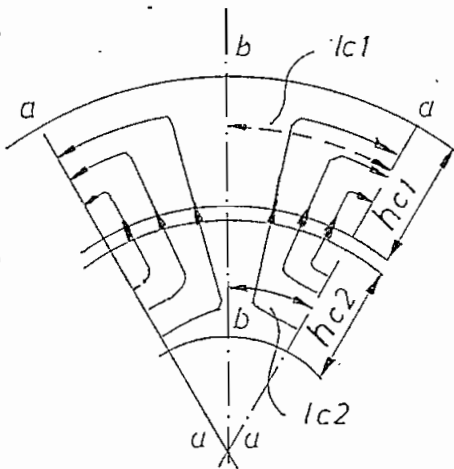
$$\mathcal{U}_{md_2} = H_{d_2} l_{d_2} = 80 \times 0,2 = 16 \text{ A vuelta}$$

El valor real del factor de saturación :

$$k_s = \frac{\mathcal{U}_{md_1} + \mathcal{U}_{md_2}}{\mathcal{U}_{m\delta'}} = \frac{28 + 16}{152} = 0,29$$

lo que coincide aceptablemente con el valor preestimado $k_s = 0,3$

4. Inducción magnética y Fmm en la corona del estator y rotor

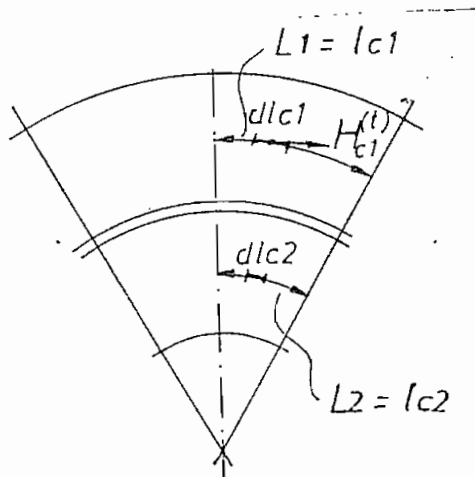


En la fig; se ve que el flujo magnético de un polo que atraviesa el entrehierro se reparte en dos partes iguales tanto en la corona del estator como en la del rotor, el valor máximo de la inducción en la corona se encuentra en las secciones marcadas a - a, y se nota que su valor es cero en la sección b - b. Si se toma en cuenta solamente la componente

FIGURA I . 14
tangencial de B_{c1} y B_{c2}

Esto se justifica por el hecho de que se calculará la Fmm de la corona del estator y rotor por medio de la componente tangencial de H_c la que coincide, en cuanto a su dirección, con la dirección de los elementos dl_{c1} y dl_{c2}

FIGURA I. 15



de las trayectorias l_{c1} y l_{c2} . Las Fmm de las coronas se deberían calcular según las fórmulas siguientes

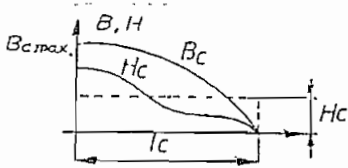
$$\begin{aligned} \mathcal{U}_{mc1} &= \int_{L_1} H_{c1}^{(t)} dl_{c1} \\ \text{y} \\ \mathcal{U}_{mc2} &= \int_{L_2} H_{c2}^{(t)} dl_{c2} \end{aligned}$$

donde los componentes tangenciales $H_{c1}^{(t)}$ y $H_{c2}^{(t)}$ varían a lo largo de las trayectorias L_1 y L_2 respectivamente.

Para evitar las dificultades de tener que evaluar los integrales, se ha elaborado las llamadas curvas de magnetización para coronas. En estas curvas de magnetización, se ha tomado en consideración una dis

tribución senoidal de la inducción magnética y a un valor determinado de B, considerado como B_{max} en la corona, corresponde el valor promedio de las H, que pertenecen a los valores de B que disminuyen senoidalmente hasta el valor cero, según la figura I. 16.

FIGURA I. 16



De manera que:

$$\int_0^{l_c} H_c dl_c = H_{mc} l_c$$

donde H_{mc} es el valor promedio de las H_c a lo largo de la distancia l_c .

Utilizando estas curvas de magnetización de coronas se lee directamente la H_{mc} que corresponde al valor máximo de la inducción magnética en la corona. Ref. (6).

Según la ecuación de la continuidad del flujo y observando la figura I. 15.

Se puede escribir

$$B \delta_m \tau_P l = 2 B_{cmax} h l_H$$

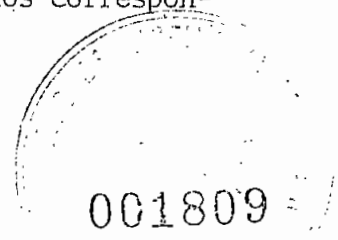
de donde
$$B_{cmax} = \frac{B \delta_m \tau_P l}{2 h l_H} = \frac{\phi}{2 h l_H}$$

los valores de h_{c1} y h_{c2} se toman de la fig. I.15.

$$h_{c1} = 1.17 \text{ cm}; \quad h_{c2} = 1 \text{ cm}$$

l_{c1} y l_{c2} se calculan en base de los diámetros promedios correspondientes Fig. I. 16.

$$l_{c1} = \frac{D_{m1} \pi}{2 \times 2 P} = \frac{14.34 \pi}{8} = 5.6 \text{ cm}$$



$$l_{c2} = \frac{D_{m2} \pi}{2 \times 2 P} = \frac{6.888 \pi}{8} = 2.7 \text{ cm.}$$

$$B_{c1 \max} = \frac{2.648 \times 10^5}{2 \times 1.17 \times 7.9} = 14.300 \text{ Gauss}$$

$$H_{c1} = 5 \text{ A / cm.} \quad (\text{Ref. 6})$$

$$B_{c2 \max} = \frac{2.648 \cdot 10^5}{2 \times 1 \times 7 \times 8} \times 0,95 = 16.100 \text{ Gauss}$$

Con el factor 0,95 se toma en cuenta que el flujo de dispersión del estator que no atraviesa el rotor. La H_{c2} correspondiente es de acuerdo a la curva de magnetización.

$$H_{c2} = 11.5 \text{ A/cm} \quad (\text{Ref. 6})$$

Las Fmm de las coronas serán :

$$W_{mc1} = H_{c1} l_{c1} = 5.5.6 = 28. \text{ A vuelta}$$

$$W_{mc2} = H_{c2} l_{c2} = 11.5.2.7 = 31 \text{ A vuelta}$$

5. Cálculo de la corriente de magnetización

La excitación máxima necesaria por polo o sea la Fmm total por polo es:

$$\theta_{\max} = W_{m\delta} + W_{md1} + W_{md2} + W_{mc1} + W_{mc2}$$

$$\theta_{\max} = 152 + 28 + 16 + 28 + 31 = 255 \text{ A vuelta}$$

La corriente de magnetización será (valor de fase)

$$I_m = \frac{2.22 \theta_{\max} P}{m_1 N_1 \xi_1} = \frac{2.22 \times 255 \times 2}{3 \times 312 \times 0,945} = 1.28 \text{ Amp}$$

$$I_{ml} = \sqrt{3} I_m = 2.21 \text{ Amp}$$

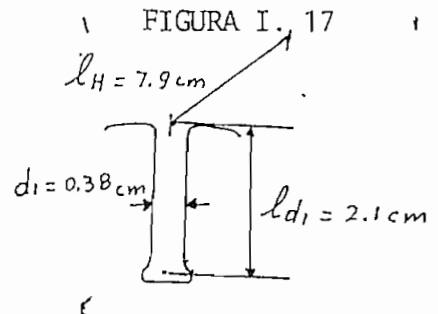
$$\frac{I_m}{I_N} = \frac{1.28}{2.87} = 0,446$$

1. 5. PERDIDAS EN VACIO

1. Cálculo del peso de los dientes y corona del estator

El peso de los dientes del estator se calcula por la fórmula siguiente :

$$G_{d1} = d_1 \cdot l_{d1} \cdot l_H \cdot \gamma \cdot Z_1$$



Siendo el propósito determinar el peso que corresponde a un volumen en el cual se producen las pérdidas de los dientes, y sabiendo que en la parte ancha de los dientes las pérdidas son pequeñas por ser pequeña la inducción magnética, calcularemos con un valor $l_{d1} = 2.1 \text{ cm}$.

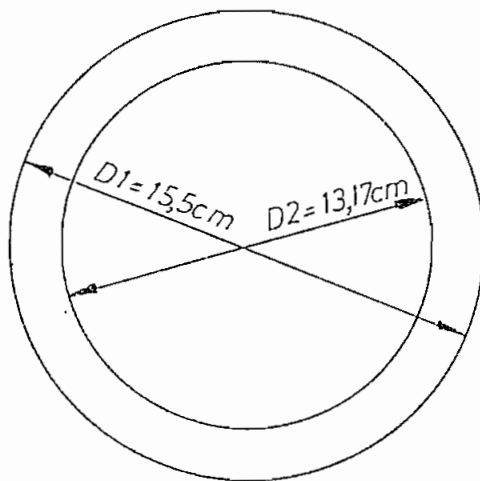
$$\gamma = 7.65 \text{ gr / cm}^3 \text{ tenemos :}$$

$$G_{d1} = 0,38 \times 2.1 \times 7.9 \times 7.65 \times 36 \times 10^3 = 1.74 \text{ Kp}$$

El peso de la corona del estator

$$G_{c1} = \frac{D_1 + D_2}{2} \pi \frac{D_1 - D_2}{2} l_H \gamma$$

FIGURA I - 18



$$G_{c_1} = \frac{15.5 - 13.17}{2} \pi \frac{15.5 + 13.17}{2} 7.9 \times 7.65 \times 10^3 = 2.72 \text{ Kp}$$

2. Cálculo de las pérdidas en los dientes y en la corona

Las pérdidas en el hierro correspondiente se calcularán con la expresión siguiente:

$$P_{Fe} = 2 V_{10} \left(\frac{B_{\max}}{10^4} \right)^2 G \quad G = \text{peso del hierro}$$

En la fórmula, V_{10} significa las pérdidas que se producen por 1 Kp de hierro si la inducción magnética B_{\max} es igual a 10000 Gauss en todas las partes del material, la variación de B_{\max} es senoidal y con

$f = 60 \text{ hz}$ se supone que las pérdidas varían con la segunda potencia

de B_{max} , y son proporcionales con el peso.

El factor 2.2 es un factor práctico de seguridad; según las experiencias el valor real de las pérdidas en el hierro suelen ser 2-2,5 veces superiores al valor teórico calculado, esto se debe a varios factores procedentes de la fabricación; entre ellos predomina la falta de aislamiento perfecto de las láminas, y el consiguiente aumento de las corrientes de Eddy.

En el caso actual otro factor de incertidumbre es la falta absoluta de una información con respecto a la calidad de las láminas.

Se supone que el valor específico de pérdidas en el hierro es

$$V_{ic} = 3 \text{ watios / Kp}$$

que es un valor común y corriente

Por lo que antecede :

las pérdidas en el hierro, en los dientes del estator son:

$$P_{Hd_i} = 2,2 \times 3 \left(\frac{B_{d_i, max}}{10^4} \right)^2 G_{d_i} = 6,6 \left(\frac{14,200}{10^4} \right)^2 1,74 = 23 \text{ w}$$

y las pérdidas en el hierro de la corona del estator son:

$$P_{Hc} = 2,2 \times 3 \left(\frac{B_{c_i, max}}{10^4} \right)^2 G_{c_i} = 6,6 \left(\frac{14,300}{10^4} \right)^2 2,72 = 37 \text{ w}$$

La pérdida total en el hierro del estator es:

$$P_H = P_{Hd_i} + P_{Hc_i} = 23 + 37 = 60 \text{ w}$$

3. Pérdidas de cobre en vacío

Siendo la resistencia por fase del estator igual a 2.85Ω y la corriente de magnetización $\bar{I}_m = 1.28 \text{ Amp.}$ se calcularán las pérdidas de Cu en el estator en vacío, con la \bar{I}_m con esto se comete un pequeño error, porque la corriente de vacío \bar{I}_0 es ciertamente un poco mayor que I_m , sien embargo este error no tiene importancia en comparación con otras pérdidas.

$$P_{Cu0} = 3 \bar{I}_m^2 R_F = 3 \times 1.28^2 \times 2.85 = 14 \text{ w}$$

4. Pérdidas por rozamiento y ventilación

Es costumbre de tomar un valor estimativo de estas pérdidas en un valor del 1 % de la potencia nominal del motor. En el caso actual.

$$P_{R,V} = 0,01 P_N = 0,01 \times 1100 \text{ w} = 11 \text{ w}$$

5. La componente activa de la corriente en vacío

Sumando todas las pérdidas en vacío tenemos

$$\sum P_0 = P_H + P_{Cu0} + P_{R,V} = 60 + 14 + 11 = 85 \text{ w.}$$

La componente activa de la corriente en vacío \bar{I}_A tiene que suministrar con el voltaje nominal del motor estas pérdidas

$$\sum P_0 = 3 V_F \bar{I}_{ACTIVA}$$

por lo tanto

$$\bar{I}_A = \frac{\sum P_o}{3 V_F} = \frac{85}{3 \times 208} = 0,136 \text{ Amp. (Valor por fase)}$$

1. 6. LA CORRIENTE EN VACIO Y SU FACTOR DE POTENCIA

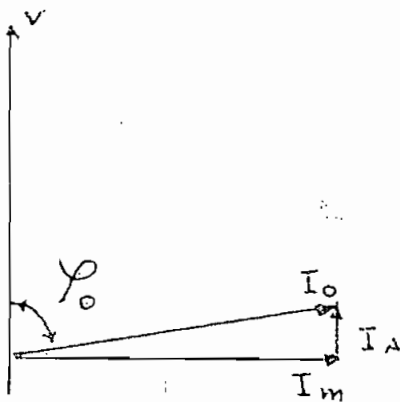
1. Cálculo de la corriente en vacío y su factor de potencia

La corriente en vacío I_o es la resultante de las componentes activa y de magnetización:

$$I_o = \sqrt{I_A^2 + I_m^2} = \sqrt{0,136^2 + 1,28^2} = 1,29 \text{ Amp.}$$

su ángulo de defasaje

FIGURA I. 19



$$\cos \varphi_o = \frac{I_A}{I_o} = \frac{0,136}{1,29} = 0,106$$

1. 7. REACTANCIAS DE DISPERSION

Si no se toma en consideración a los motores de poca potencia, se puede decir que la componente reactiva, es la que domina en la impedancia de cortocircuito de un motor asincrónico.

Consecuentemente esta componente es la que predomina en la corriente de cortocircuito del motor, y con esto, es el factor más importante con respecto al valor del torque máximo.

El cálculo de la reactancia de dispersión consiste esencialmente en identificar los diferentes tipos de flujo de dispersión que existen en una máquina asíncrona, calcular la concatenación que producen con los devanados, y por fin calcular las reactancias correspondientes.

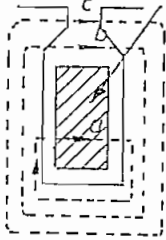
Por lo anteriormente expuesto, la reactancia total de dispersión, puede dividirse en las componentes siguientes :

- X_{R1} La reactancia de dispersión en las ranuras del estator.
- X_{R2} La reactancia de dispersión en las ranuras del rotor
(cuyo valor referido al estator es X'_{R2})
- X_c La reactancia proveniente del flujo de dispersión alrededor de las cabezas del devanado del estator y rotor.
- X_{d1} La reactancia de dispersión originada por las armónicas de flujo en los dientes del estator.
- X_{d2} La reactancia de dispersión originada por las armónicas de flujo en los dientes del rotor, su valor referido al estator es X'_{d2}
- X_i que corresponde, a la disminución de la reactancia mutua entre el estator y rotor y por esta razón tiene que ser considerada como reactancia de dispersión.

1. Reactancia de dispersión en las ranuras

FIGURA I. 20

21 conductores en serie



Tomando como referencia la ranura que se vé en la Fig. I - 20 se observa que las líneas de flujo de dispersión pueden dividirse en dos grupos. Algunas líneas producen una concatenación parcial con los conductores colocados en la ranura debajo de la línea de flujo a, mientras otras producen una concatenación total (líneas b y c).

Si se introduce el concepto de la "reluctancia equivalente" de la ranura Λ_R , cuyo significado detallaremos más adelante,

La inductancia de dispersión de una ranura es:

$$L_R^{(1)} = z_1^2 \Lambda_R$$

Si la frecuencia de la corriente en los conductores es igual a f, la reactancia por ranura será:

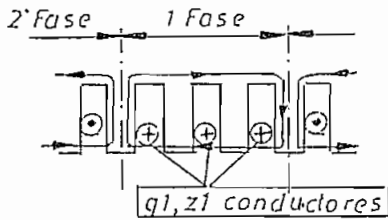
$$X_R = 2 \pi F L_R = 2 \pi F z_1^2 \Lambda_R$$

Se puede expresar z_1 (conductores por ranura) por el número de espiras por fase N_1 y el número de ranuras por fase $\frac{Z_1}{m_1}$

$$z_1 = \frac{2 N_1}{Z_1 / m_1}$$

Reemplazando la expresión de z_1 tenemos :

$$X_R = 2 \pi F \frac{2 N_1}{Z_1 / m_1} \Lambda_R$$



Si q_1 es el número de ranuras por polo y por fase en un grupo de q_1 ranuras se desarrolla una concatenación común. Esto significa que el número total de conductores que participan en la concatenación, con el flujo de dispersión es $q_1 z_1$, y siendo la inductancia proporcional con la segunda potencia del número de conductores, había que reemplazar

FIGURA I. 21 $(q_1 z_1)^2$ en lugar de z_1^2 en la expresión de la misma. Sin embargo, la reluctancia resultante del grupo de q_1 ranuras es

$$\frac{\Lambda_{R1}}{q_1}$$

Por lo tanto la reactancia resultante del grupo de q_1 ranuras es

$$X_{Rq_1} = 2\pi F (q_1 z_1)^2 \frac{\Lambda_{R1}}{q_1} = 2\pi F z_1^2 q_1 \Lambda_{R1}$$

Para obtener la reactancia total por dispersión en las ranuras de una fase, hay que tomar en cuenta que existen $2p$ grupos de q_1 ranuras. Cada uno de estos grupos tiene su propia concatenación, y están conectados en serie; la reactancia total para una fase será :

$$X_{R1} = 2p X_{Rq_1} = 2\pi F z_1^2 2p q_1 \Lambda_{R1}$$

Es más cómodo introducir el número de espiras por fase N_1 y elimina z_1

$$z_1 = \frac{2N_1}{\frac{Z_1}{m_1}}$$

en donde m_1 es igual número de fases

$$y \quad q_1 = \frac{Z_1}{2p m_1}$$

$$ya \quad que \quad 2p q_1 = \frac{Z_1}{m_1}$$

reemplazando $\frac{Z_1}{m_1} = 2p q_1$ en la expresión de z_1

$$z_1 = \frac{2N_1}{2p q_1} = \frac{N_1}{p q_1}$$

con este valor de z_1 tenemos

$$X_{R1} = 4\pi F_1 \frac{N_1^2}{P^2 q_1^2} P q_1 \Lambda_R \text{ y por fin } X_{R1} = 4\pi F_1 \frac{N_1^2}{P} \frac{\Lambda_R}{q_1}$$

que es la reactancia por dispersión en las ranuras por fase.

La expresión es válida tanto para el estator como para el rotor.

Desde luego hay que reemplazar los valores correspondientes

$$(N_1 \text{ ó } N_2 ; \Lambda_{R1} \text{ ó } \Lambda_{R2} ; q_1 \text{ ó } q_2)$$

Pero es preferible calcular X_{R2} o sea el valor de la reactancia de dispersión en las ranuras del rotor referida al estator.

$$X_{R2}^i = a X_{R2}$$

donde
$$a = \frac{m_1 N_1^2 \xi_1^2}{m_2 N_2^2 \xi_2^2}$$

Reemplazando las cantidades del rotor en la expresión de X_R se tiene :

$$X_{R2}^i = 2\pi F_1 \frac{N_2^2}{P} \frac{\Lambda_{R2}}{q_2} \frac{m_1 N_1^2 \xi_1^2}{m_2 N_2^2 \xi_2^2}$$

Siendo por definición
$$q_2 = \frac{Z_2}{2 P m_2}$$

y el producto $P m_2 q_2$ será

$$P m_2 q_2 = \frac{Z_2}{2} \text{ y con esto}$$

$$X_{R2}^i = 4\pi F_1 \frac{m_1 N_1^2 \xi_1^2 \Lambda_{R2}}{\frac{Z_2}{2} \xi_2^2}$$

Es útil introducir el concepto del número de ranuras por polo y por fase del rotor, calculado con m_1 , o sea con el número de fases del estator

$$q_2^i = \frac{Z_2}{2 P m_1} \text{ con esto } \frac{Z_2}{2} = P q_2^i m_1$$

y la expresión de la reactancia del rotor, tomando en consideración que para un rotor con jaula $\xi_2 = 1$

$$X'_{R2} = 4\pi F_1 \frac{N_1^2 \xi_1^2 \Lambda_{R2}}{P q'_2}$$

La reactancia total por dispersión en las ranuras:

$$X_R = X_R + X'_{R2} = 4\pi F_1 \frac{N_1^2}{P} \left(\frac{\Lambda_{R1}}{q_1} + \frac{\Lambda_{R2} \xi_1^2}{q'_2} \right)$$

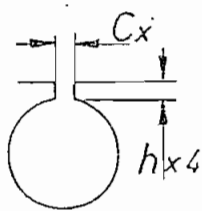
Queda por determinarse la reluctancia equivalente de los diferentes tipos de ranuras.

Es costumbre calcular la reluctancia de la ranura por unidad de longitud axial, o sea expresarla en la forma siguiente :

$$\Lambda_{Rx} = \lambda_{Rx} l$$

donde l es la longitud axial del estator y del rotor y x es 1 o 2 (estator o rotor).

los valores de λ_R para las diferentes formas de ranuras son los siguientes :



$$\lambda_{Rx} = \mu_0 \left(0.623 + \frac{h x 4}{C_x} \right) \text{ henry / cm}$$

$$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-8} \text{ henry / cm.}$$

FIGURA I. 22

Este tipo de ranura se aplica casi exclusivamente para rotores con jaula, en motores de pequeña potencia.

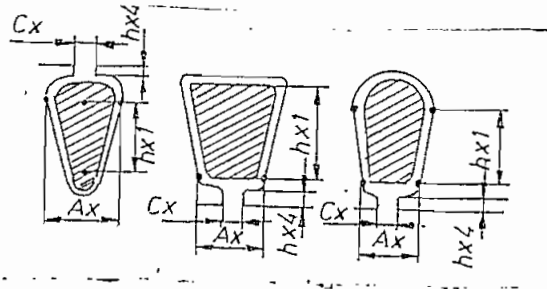


FIGURA I. 23

Para estas formas de ranura:

$$\lambda_{R_x} = \mu_0 \left(\frac{h_{x1}}{3 a_x} + \frac{h_{x4}}{C_x} + 0.623 \right) \text{ henry/cm}$$

$$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-8} \text{ henry/cm.}$$

$$x = 1 \text{ ó } 2 \text{ según el caso (estator o rotor)}$$

La reactancia de dispersión de las cabezas de devanado :

Por la complejidad del caso no existe ningún método analítico para resolver el problema.

Flujos de dispersión alrededor de las cabezas de las espiras del estator y del rotor.

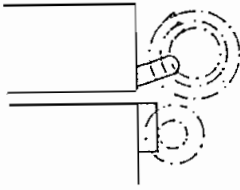


FIGURA I. 24

R. RITCHER (Ref. Bibliográfica) realizó una serie de experimentos para determinar el valor de la reluctancia del flujo de dispersión alrededor de las cabezas del devanado, por unidad de largo de la cabeza.

Este valor depende principalmente de la disposición geométrica de las cabezas.

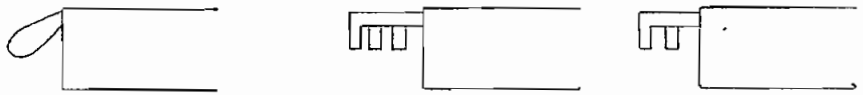
Para simplificar el caso, es costumbre considerar el valor total de la reluctancia λ_c para el estator y el rotor.

Los valores promedios de λ_c para diferentes tipos de devanados se ven en la tabla siguiente :

TABLA I - 1

Estator Rotor	$\frac{3 P}{3 P}$	$\frac{2 P}{2 P}$	$\frac{3 P}{2 C}$	$\frac{3 P}{J}$	$\frac{2 P}{J}$	$\frac{2 C}{J}$	$\frac{2 C}{2 C}$	P: planos C: Capas J: jaula
λ_c 10^8 henry/cm	0,41	0,54	0,42	0,4	0,43	0,41	0,42	

FIGURA I - 25



Disposición de las cabezas en 3 planos. Disposición de las cabezas en 2 planos. devanado de 2 capas.

Con estos valores la reluctancia total de las cabezas :

$$\Lambda_c = l_c \lambda_c$$

donde l_c es el valor del largo promedio de las cabezas.

Los valores de λ_c contienen la reluctancia para ambos lados frontales de la máquina.

Si se reemplaza Λ_{RX} en la expresión de la reactancia de dispersión de las ranuras.

por $\Lambda_{RX} = \lambda_{RX} l$ se tiene

$$X_R = 4 \pi F_i \frac{N_i^2 l}{P} \left(\frac{\lambda_{R1}}{q_1} + \sum_i^2 \frac{\lambda_{R2}}{q'_2} \right)$$

Pensando en las demás componentes de la reactancia de dispersión, es lógico desear expresar la reactancia total de dispersión en la forma siguiente:

$$X_t = 4 \pi F_i \frac{N_i^2 l}{P} \sum \frac{\lambda}{q}$$

considerando que la longitud de las cabezas es l_c y no l (que ya aparece en la fórmula anterior como factor común) el término $\frac{\lambda}{q}$ de la suma para las cabezas será :

$$\left(\frac{\lambda}{q} \right)_c = \lambda_c \frac{l_c}{l}$$

y la reactancia de dispersión de las ranuras y cabezas:

$$X_{R+c} = 4 \pi F_i \frac{N_i^2 l}{P} \left(\frac{\lambda_{R1}}{q_1} + \sum_i^2 \frac{\lambda_{R2}}{q'_2} + \lambda_c \frac{l_c}{l} \right)$$

La reactancia proveniente de las armónicas del flujo

Si el devanado primario y secundario produjeran excitaciones puramente senoidales, esta reactancia, llamada también reactancia de dispersión

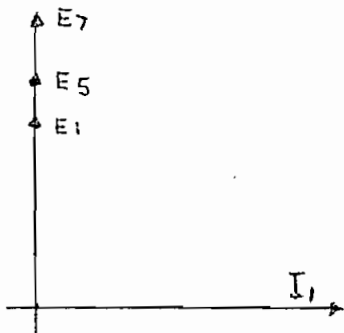
en el entrehierro no hubiera.

Sin embargo, ni la excitación primaria, ni secundaria son senoidales. Las armónicas del flujo, procedentes de la excitación del devanado primario atraviesan el entrehierro y siguen una trayectoria muy parecida a la del flujo principal (primera armónica). Siendo su velocidad sincrónica, diferente de la velocidad del flujo principal

$\omega \omega_n = \frac{\omega}{n}$, no participan en la transferencia de la potencia del estator al rotor, por lo tanto, en este sentido son inútiles.

De otra parte, las componentes armónicas del flujo del estator, inducen voltajes en el estator con la frecuencia f_1 , y todos estos voltajes inducidos por las armónicas se suman algebraicamente, porque todos son producidos de la misma corriente primaria. (Ver. Fig. I -26)

FIGURA I. 26



Considerando que el voltaje primario es constante, la presencia de los voltajes E_5, E_7 etc. disminuye a E_1 .

Por lo tanto los voltajes inducidos por las armónicas del flujo tiene el carácter de voltaje de dispersión. Este fenómeno se presenta, tanto en el estator como en el rotor.

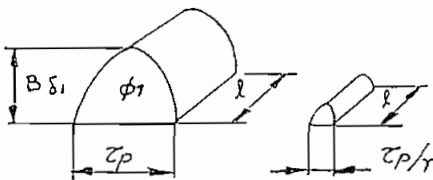
Se llama coeficiente de dispersión de entrehierro, la relación de la suma de los voltajes inducidos por las armónicas al voltaje inducido por la armónica principal.

$$G_{S_1} = \frac{E_5 + E_7 + E_{11}}{E_1}$$

Este coeficiente se calcula sencillamente. Si ξ_n es el factor de devanado,

para la armónica n de flujo, la amplitud de esta componente es proporcional a $\frac{\xi_n}{n}$

FIGURA I - 27



El flujo de esta componente es proporcional

$$a \quad \frac{\xi_n}{n} \quad \frac{\tau_p}{n}$$

y siendo τ_p constante, por ende el flujo de la armónica n es proporcional a $\frac{\xi_n}{n^2}$

Por fin el voltaje que este flujo induce en el devanado es proporcional a ξ_n o sea

$$E_n \sim \frac{\xi_n^2}{n}$$

Para $n = 1$ tenemos

$$E_1 \sim \xi_1^2$$

por lo tanto

$$\sigma_{\delta_1} = \frac{\sum E_n}{E_1} = \frac{1}{\xi_1^2} \sum \frac{\xi_n^2}{n^2}$$

De manera similar para rotores con anillos

$$\sigma_{\delta_2} = \frac{1}{\xi_1^2} \sum \frac{\xi_n^2}{n^2}$$

En ambos casos se debe reemplazar en las sumas solamente aquellos miembros que realmente aparecen en la excitación del devanado en cuestión.

Si el rotor tiene un devanado trifásico σ_{δ_1} y σ_{δ_2} son independientes el uno del otro, porque las armónicas del estator no tienen casi ningún efecto al rotor y viceversa porque el número de polos de las ondas armónicas producidas por el estator no coinciden con el número de polos del devanado del rotor (y viceversa). —

Pero si el rotor es de jaula de ardilla, esta ya no es un devanado para un determinado número de polos, consecuentemente la distribución

de las corrientes en las varillas tiene mayor grado de libertad.

Las corrientes de las varillas se pueden oponer no sólo al desenvolvimiento de la primera armónica del flujo, sino al desenvolvimiento de las ondas armónicas también.

Se puede decir que el rotor con jaula es capaz de amortiguar las armónicas del estator, lo que resulta en una disminución de la dispersión de entrehierro del mismo.

Este efecto se lo toma en consideración, por la introducción de un factor de amortiguamiento $\Delta < 1$, con que se multiplica σ_{s1} .
Valores de $100 \sigma_{s1}$ (y de $100 \sigma_{s2}$ para rotores con devanado).

T A B L A No. I-2

τ_{p-s}	$q = Z / 3 \times 2 P$						
	1	2	3	4	5	6	7
0	9.66	2.84	1.4	0,89	0,64	0,52	0,44
1	9.66	2.36	1.15	0,73	0.55	0:45	0.34
2		2.84	1.11	0.64	0.44	0.35	0.26
3			1.40	0.69	0.41	0.29	0.23

($\times 10^{-2}$)

Valores de $100 \sigma_{s2}$ para motores con rotor de jaula ver Tabla I - 3.

$$q_2' = \frac{Z_2}{3 \times 2 P}$$

TABLA No. I - 3

	q'_2	1	2	2 1/3	2 2/3	3	3 1/3	3 2/3
100	σ_{δ_2}	1.66	2.29	1.68	1.28	1.02	0.82	0.68

($\times 10^{-2}$)

El factor de amortiguamiento para el caso actual ($q_1 = 3$; $q'_2 = 2 \frac{1}{3}$) es, según tablas que se encuentran en la literatura correspondiente (Ref. 7) $\Delta = 0,973$.

Esto significa que la jaula del rotor, por medio de su flexibilidad en oponer excitación a la del estator, reduce la reactancia de dispersión del estator al 97.3 % de su valor original. El devanado del estator, por ser un devanado trifásico, prácticamente no ejerce ningún efecto a la dispersión de entrehierro del rotor.

Por la definición de σ_{δ} , la reactancia de dispersión se calculará como un porcentaje de la reactancia del flujo principal $X_1 \cong \frac{V_1}{I_m}$:

$$\sigma_{\delta_1} = \frac{E_5 + E_7 + E_{11} + \dots}{E_1} = \frac{I_m (X_5 + X_7 + X_{11} + \dots)}{I_m X_1}$$

$$\sigma_{\delta_1} = \frac{\sum X_n}{X_1}$$

$$\sum X_n = \sigma_{\delta_1} X_1$$

Sin embargo, es más cómodo introducir un término tipo $\frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1}$ y $\frac{\lambda_{d_2}}{q'_2}$, para conservar la analogía con el cálculo de la reactancia de dispersión en las ranuras. Sin entrar en detalles, estos términos

son : $\frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1} = \frac{\mu_0}{\pi^2} m_1 \frac{\tau_p}{\delta_1'} \xi_1^2 \sigma_{\delta_1} \Delta$

para el estator y

$$\frac{\lambda_{\delta_2}}{q'_2} = \frac{M_0}{\pi^2} m_1 \frac{\tau_p}{\delta'_i} \xi_1^2 \sigma_{\delta_2} \quad \text{para el rotor}$$

En estas expresiones

m_1 = número de fases del estator

τ_p = paso polar

$\delta'_i \approx \delta k_c (1 - k_s)$; k_c = factor de Carter
 k_s = es el factor de saturación.

con estas expresiones de $\frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1}$ y $\frac{\lambda_{\delta_2}}{q'_2}$ la reactancia de dispersión proveniente de las ranuras, cabezas y armónicas en el entrehierro es :

$$X_t = \frac{4\pi F_1 M_1^2 \ell}{P} \left(\frac{\lambda_{R_1}}{q_1} + \frac{\lambda_{R_2}}{q'_2} \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2} + \frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1} + \frac{\lambda_{\delta_2}}{q'_2} \right)$$

Falta tomar en consideración el efecto que tiene en X_t la inclinación de las ranuras del estator o del rotor.

La reactancia de dispersión por la inclinación de las ranuras

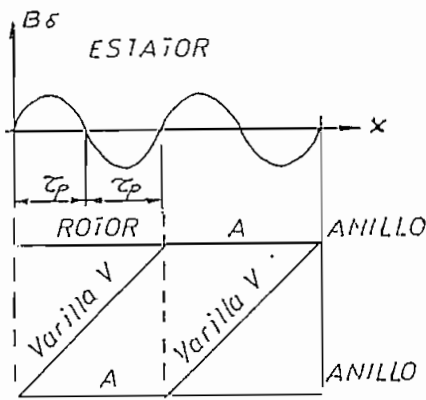
Para disminuir el ruido y las fluctuaciones del torque durante el arranque, es costumbre inclinar las ranuras del estator o más bien del rotor, con un paso de ranura del otro, o sea inclinar las ranuras del estator con τ_{R_2} ó las del rotor con τ_{R_1} .

Por consecuencia de la inclinación, el acoplamiento entre el estator y rotor se disminuye, por lo tanto disminuye la corriente de cortocircuito.

La disminución del flujo mutuo, en las dos partes, equivale a un aumento de dispersión.

Si la inclinación fuera $2 \tau_p$, el estator no podría hacer ningún efecto al rotor, aunque el flujo principal existiera. Obsérvese que la concatenación total del circuito V.A.V.A. en la Figura No. 28 es cero.

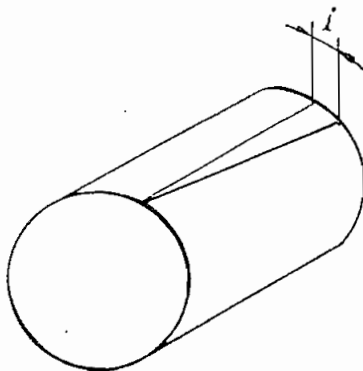
FIGURA I - 28



Si el voltaje inducido en una fase del rotor, sin inclinación, es E_2 , por la inclinación éste se reduce a $E_2 \xi_i$ donde ξ_i = factor de inclinación

$$\xi_i = \frac{\text{sen } \frac{i}{\tau_p} \frac{\pi}{2}}{\frac{i}{\tau_p} \frac{\pi}{2}}$$

FIGURA I - 29



Siendo i la medida de inclinación El término, en la expresión de la reactancia de dispersión que corresponde a la inclinación es:

$$\frac{\lambda i}{g} = \frac{\mu_0}{\pi^2} 0.82 m_1 \frac{\tau_p}{\delta_i'} \xi_i^2 \left(\frac{i}{\tau_p} \right)^2$$

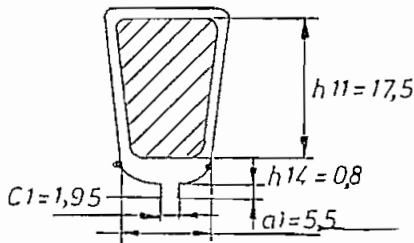
con esto, la reactancia total de dispersión es:

$$X_t = \frac{4\pi F_1 N_1^2 \ell}{P} \left[\frac{\lambda_{R1}}{q_1} + \frac{\lambda_{R2}}{q_2'} \frac{\xi_1^2}{\xi_2^2} + \frac{(\lambda)c}{q} + \frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1} + \frac{\lambda_{\delta_2}}{q_2'} + \frac{\lambda_i}{q} \right]$$

Cálculo de la impedancia y corriente en cortor circuito (caso particular del presente trabajo.

a). Ranuras del estator

FIGURA I - 30



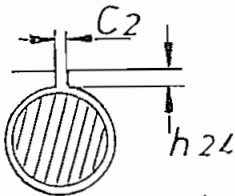
$$\frac{\lambda_{R1}}{q_1} = \frac{\mu_0}{q_1} \left(\frac{h_{11}}{3a_1} + \frac{h_{14}}{c_1} + 0,623 \right)$$

$$\frac{\lambda_{R1}}{q_1} = \frac{1,256 \times 10^{-8}}{3} \left(\frac{17,5}{16,5} + \frac{0,8}{1,95} + 0,623 \right)$$

$$\frac{\lambda_{R1}}{q_1} = 0,88 \times 10^{-8} \text{ Henry/cm}$$

b). Ranuras del rotor

FIGURA I - 31

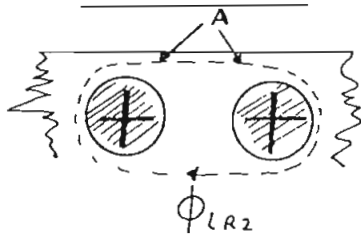


$$\frac{\lambda_{R2}}{q_2'} \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 = \frac{\mu_0}{q_2'} \left(0,623 + \frac{h_{24}}{c_2} \right)$$

Para nuestro caso, las ranuras del rotor son cerradas, o sea $C_2 = 0$, esto significa, que la dispersión en las ranuras del rotor aumenta fuertemente, porque las líneas de dispersión pasan a lo largo de su

trayectoria en el hierro del rotor.

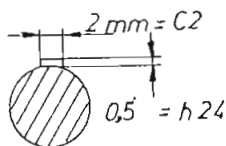
FIGURA I - 32



La saturación en las partes indicadas con "A" limitará el flujo de dispersión, pero no se sabe en que medida.

Para tener algún punto de partida se supondrá que abriendo la ranura con $C_2 \cong 2 \text{ mm}$ y $h_{24} = 0,5 \text{ mm}$. no cambiará la dispersión, por ser saturada esta parte del circuito magnético para las líneas de dispersión, con esta suposición

FIGURA I - 33



$$\frac{\lambda_{R2}}{q'_2} \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 = \frac{\mu_0}{q'_2} \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 \left(0,623 + \frac{0,5}{2} \right) ; \quad \xi_1 = 0,945$$

$$q'_2 = \frac{Z_L}{3 \times 2P} = \frac{28}{12} = 2 \frac{1}{3} ; \quad \xi_2 = 1 ;$$

$$\frac{\lambda_{R2}}{q'_2} \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 = \frac{1,256 \times 10^{-8}}{2 \frac{1}{3}} 0,945^2 (0,623 + 0,25) = 0,42 \times 10^{-8} \text{ Hy/cm}$$

c). Cabezas

$$l_c = \text{largo de cabezas} = 8,9 \text{ cm} \cong 9 \text{ cm}$$

$$(\text{Ver en la tabla I - 1}) \quad \lambda_c = 0,43 \times 10^{-8}$$

$$\left(\frac{\lambda}{q} \right)_c = \lambda_c \frac{l_c}{l} = 0,43 \times 10^{-8} \frac{9}{8,5} = 0,46 \times 10^{-8} \text{ Hy/cm}$$

d). Entrehierro, estator

$$\frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1} = \frac{\mu_0}{\pi^2} m_1 \frac{\tau_P}{\delta_i'} \xi_1^2 \sigma_{\delta_1} \Delta$$

En esta expresión

$$m_1 = 3 \quad ; \quad \tau_P = 7.08 \text{ cm} \quad \xi_1 = 0,945$$

$$\delta_i' = \delta'(1+k_s) = 0,03 (1 + 0,29) \text{ cm}$$

$$\sigma_{\delta_1} = 1.15 \times 10^{-2}. \quad (\text{ Ver en tabla No. I - 2})$$

$$\Delta = 0,973 \quad (\text{ Ref 7})$$

Con estos datos:

$$\frac{\lambda_{\delta_1}}{q_1} = 0.7 \times 10^{-8} \text{ Hy/cm}$$

Entrehierro, rotor

$$\frac{\lambda_{\delta_2}}{q_2} = \frac{\mu_0}{\pi^2} m_1 \frac{\tau_P}{\delta_i'} \xi_1^2 \sigma_{\delta_2}$$

$$\sigma_{\delta_2} = 1.68 \times 10^{-2} \quad (\text{ Ver en la Tabla No. I - 3})$$

$$\text{y } \frac{\lambda_{\delta_2}}{q_2} = 1.05 \times 10^{-8} \text{ Henry/cm.}$$

c). Inclinación

La inclinación de las ranuras del estator es un paso de ranura del rotor τ_{R2} , o sea

$$l' = \tau_{R2}$$

De otra parte τ_P midiéndole en ranuras del rotor es

$$\tau_P = \frac{28}{4} = 7$$

así que $\frac{l}{\tau_p} = \frac{1}{7}$

Siendo $\frac{\lambda_i}{9} = \frac{M_0}{\pi^2} 0,82 m_1 \frac{\tau_p}{\delta_i'} \xi_i^2 \left(\frac{l}{\tau_p}\right)^2$

con los valores anteriores tenemos

$$\frac{\lambda_i}{9} = \frac{1.256 \times 10^8}{\pi^2} \times 0,82 \times 3 \frac{7.08}{0,03 \times 1.29} 0,945^2 \left(\frac{1}{7}\right)^2$$

$$\frac{\lambda_i}{9} = 1.04 \times 10^8 \text{ H/cm} \quad \text{H/cm} = \text{Henrios/cm.}$$

Teniendo preparados los elementos, se calculará la reactancia de dispersión del estator y del rotor considerando la expresión de la reactancia total X_{ϵ} , se repartirá la reactancia entre estator y rotor de la siguiente manera:

X_{ϵ} = reactancia de dispersión total.

$$X_{\epsilon 1} = \frac{4\pi F_1 N_1^2 \ell}{P} \left[\frac{\lambda_{R1}}{9_1} + \frac{\lambda_{\delta_1}}{9_1} + \left(\frac{\lambda}{9}\right)_{\epsilon} + \frac{1}{2} \frac{\lambda_i}{9} \right]$$

y la reactancia de dispersión, del rotor:

$$X_{\epsilon 2}' = \frac{4\pi F_1 N_1^2 \ell}{P} \left[\frac{\lambda_{R2}}{9_2'} \left(\frac{\xi_1}{\xi_2}\right)^2 + \frac{\lambda_{\delta_2}}{9_2'} + \frac{1}{2} \frac{\lambda_i}{9} \right]$$

sustituyendo los valores tenemos.

$$X_{\epsilon 1} = \frac{4 \pi \times 60 \times 312^2 \times 8.5}{2} (0,88 + 0,7 + 0,46 + \frac{1}{2} 1.04) \times 10^8 \Omega$$

$$X_{\epsilon 1} = 3.12 \times 10^8 \times 2.56 \times 10^8 = 8 \Omega$$

De manera similar

$$X_{\epsilon 2}' = \frac{4 \pi \times 60 \times 312^2 \times 8.5}{2} (0,42 + 1.05 + \frac{1}{2} \times 1.04) \times 10^8 \Omega$$

$$X'_{t2} = 3.12 \times 10^8 \times 1.99 \times 10^{-8} = 6.21 \Omega$$

3. La reactancia total de dispersión será :

$$X_t = X_{t1} + X'_{t2} = 8.05 + 6.21 = 14.21 \Omega$$

1. 8. LA IMPEDANCIA Y CORRIENTE EN CORTOCIRCUITO

La resistencia total por fase es

$$R = R_1 + R'_2 = 2.85 + 6.29 = 9.14 \Omega$$

La reactancia de dispersión

$$X_t = X_{t1} + X'_{t2} = 14.21 \Omega$$

La impedancia de cortocircuito

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X_t^2} = \sqrt{9.14^2 + 14.21^2} = 16.9 \Omega$$

La corriente de cortocircuito por fase es:

$$I_{cc} = \frac{V_{1N}}{Z_{cc}} = \frac{208}{16.9} = 12.3 \text{ A /fase}$$

La corriente de cortocircuito de línea es :

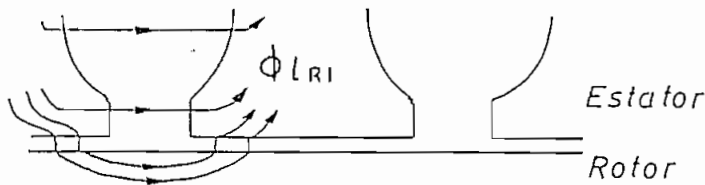
$$I_{cc}^{(L)} = \sqrt{3} \cdot 12.3 = 21.3 \text{ A.}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R}{Z_{cc}} = \frac{9,14}{16,9} = 0,564$$

En este punto cabe hacer unas observaciones con respecto a la impedancia de cortocircuito.

El simple hecho de que las ranuras del rotor son cerradas, es una causa importante de la que depende la reactancia, de dispersión, o sea del estado de saturación de los dientes y el "puente" sobre la ranura del rotor.

FIGURA I - 34



Se nota también, que las líneas de dispersión de ranura del estator $\phi_{L_{R1}}$ tienen una mayor conductancia si pasan por el entrehierro y la superficie lisa del rotor.

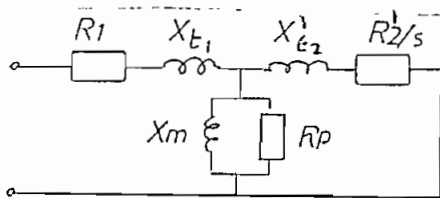
Mientras las corrientes en cortocircuito son pequeñas (reducido voltaje de alimentación, los canales para el flujo $\phi_{L_{R1}}$ y $\phi_{L_{R2}}$ no son saturados, pues las reactancias correspondientes pueden ser considerablemente mayores, que los valores calculados (esto se comprobará cuando se hagan las pruebas de C.C. en el motor) porque en el cálculo, no hemos considerado las líneas de flujo que atraviesan el entrehierro.

Con el aumento de las corrientes, los canales del flujo de dispersión se van saturando, lo que significa una disminución progresiva de la reactancia de dispersión.

1. 9. LA IMPEDANCIA CORRESPONDIENTE AL DESLIZAMIENTO INFINITO

1. Cálculo de la impedancia para deslizamiento infinito.

FIGURA I - 35



, Si el deslizamiento $s \rightarrow \infty$ según el esquema equivalente la resistencia del rotor va hacia el valor límite cero.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{R_2}{s} = 0$$

Por lo tanto, para $s = \infty$ despreciando X_m y R_p (siendo $X_m \gg X'_{l2}$ y $R_p \gg X'_{l2}$)

$$\text{se tiene } Z_{\infty} = \sqrt{R_1^2 + X_{l2}^2} = \sqrt{2.85^2 + 14.21^2} = 14.5 \Omega$$

1.10. LA POTENCIA A TRAVÉS DEL ENTREHIERRO

1. Deslizamiento nominal

La potencia a través del entrehierro, en régimen nominal será:

$$P_{\text{entrehierro}} = P_N + P_{c2} + P_{R02}$$

$$P_N = 1100 \text{ w}$$

$$P_{C2} = 103 \text{ w pérdidas en el cobre del rotor}$$

$$P_{R02} = 11 \text{ w (valor estimado) pérdidas rotacionales}$$

$$P_E = 1100 + 103 + 11 = 1214 \text{ w}$$

Según la teoría de máquinas asincrónicas; el deslizamiento es :

$$s = \frac{P_{C2}}{P_E} = \frac{103}{1214} = 0,085 \quad 8,5 \%$$

La velocidad nominal del motor será

$$n = (1-s)n_0 = (1 - 0,085) 1800 = 1647$$

2. Torque nominal, Torque de arranque y Torque máximo

La ecuación de la potencia mecánica es:

$$P_N = T_N W_N$$

donde T_N y W_N son el Torque y velocidad angular nominales.

$$T_N = \frac{P_N}{W_N} = \frac{1100}{(1-s_N) \frac{2\pi F_i}{P}} = \frac{1100}{0,915 \frac{2\pi 60}{2}}$$

$$T_N = \frac{1100}{172,39} = 6,38 \text{ joule}$$

Siendo 9.81 Joules = 1 m Kg

$$T_N = \frac{6,38}{9,81} = 0,65 \text{ Kg m } \checkmark$$

El Torque de arranque se calcula con la potencia transferida al rotor en cortocircuito.

$$P \text{ entrehierro} = 3 I_{cc}^2 R'_2 \quad \delta = 1$$

Si se desprecia la corriente de magnetización en cortocircuito.

$$P \text{ entrehierro} = 3 \left(\frac{V_N}{Z_{cc}} \right)^2 R'_2 \quad \delta = 1$$

$$y \quad T_{ARR} = \frac{P \text{ entrehierro}}{\omega_0} = \frac{P \text{ entrehierro}}{\frac{2\pi f_1}{p}}$$

$$T_{ARR} = 3 \left(\frac{V_N}{Z_{cc}} \right)^2 R'_2 = \frac{3 \left(\frac{208^2}{16.9} \right) 6.29}{\pi 60}$$

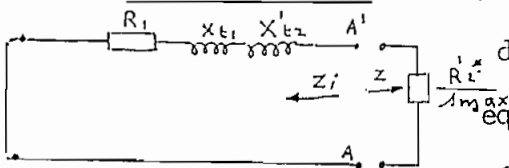
$$T_{ARR} = 15.17 \text{ joules}$$

$$T_{ARR} = 1.55 \text{ m - Kg}$$

$$\frac{T_{ARR}}{T_N} = \frac{15.17}{6.38} = 2.38 > 2$$

El Torque máximo puede calcularse con la condición que la potencia transferida al rotor. P entrehierro tiene su valor máximo cuando se produce el Torque máximo, siendo este proporcional a la potencia P entrehierro = P_E

FIGURA I - 36



La potencia P_E tendrá su valor máximo cuando la impedancia interna Zi del esquema

equivalente medido entre los bornes A.A' según la figura I - sea igual $Z = \frac{R'_2}{\delta_{max}}$

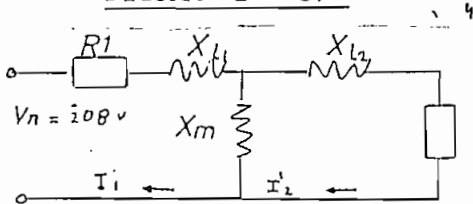
Con esta condición y despreciando X_m y R_H .

$$\frac{R_2^{i*}}{s_{max}} = R_1 + j(X_{t1} + X'_{t2})$$

o sea
$$s_{max} = \frac{R_2^{i*}}{\sqrt{R_1^2 + X_t^2}}$$

Con esto se conoce el deslizamiento con que aparecerá en el eje del motor el Torque máximo.

FIGURA I - 37



El Torque máximo podría calcularse en base del esquema equivalente con I_2'

tenemos :
$$T_{max} = \frac{3 I_2'^2 \sqrt{R_1^2 + X_t^2}}{2 \pi F_1 P}$$

Sin embargo el cálculo de I_2' requiere un largo proceso aritmético.

Se puede utilizar la fórmula que da el valor aproximado del T_{max} :

$$T_{max} = \frac{m_1 \left(\frac{V_N}{1+\sigma} \right)^2}{2 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_t^2} \right)} \frac{1}{\frac{2 \pi F_1 P}}$$

donde $\sigma = \frac{X_{t1}}{X_m}$

Conociendo la corriente de magnetización se puede calcular X_m

$$I_m \approx \frac{V_N}{X_{l1} + X_m} \quad X_m = \frac{V_N}{I_m} - X_{t1} = \frac{208}{1.28} - 8 = 154.5 \Omega$$

$X_m = 154.5 \Omega$

con esto
$$\sigma = \frac{8}{154.5} = 0,052$$

$$T_{\max} = \frac{3 \left(\frac{208}{1.052} \right)^2}{2(2.85 + \sqrt{2.85^2 + 14.21^2})} \cdot \frac{1}{\pi \cdot 60} \approx 18 \text{ joule}$$

o sea $T_{\max} = 1.83 \text{ m-Kg}$.

Eficiencia

Las pérdidas calculadas son, en régimen nominal.

$$\text{Pérdidas en el hierro : } P_H = P_{Hd} + P_{Hc} = 23 + 37 = 60 \text{ w}$$

$$\text{Pérdidas en el Cu : } P_{Cu} = P_{c1} + P_{c2} = 71 + 103 = 174 \text{ w}$$

$$\text{Pérdidas por rozamiento y ventilación : } P_{R.v} = 11 \text{ w}$$

La eficiencia calculada :

$$\eta = \frac{P_N}{P_N + \sum P_{\text{perd.}}} = \frac{1100}{1100 + 60 + 174 + 11} = 0,82$$

Este valor es algo mejor que el $\eta_N = 0,78$ que sirvió como dato de partida para el diseño.

Más luego se verá cual es el η_N real en las pruebas con el motor a carga nominal. Capítulo V.

C A P I T U L O I I

D I S E Ñ O M E C A N I C O

2. 1. CARCASA, TAPAS, RODAMIENTOS Y VENTILACION

1. PREPARACION DE LOS DIBUJOS TECNICOS CORRESPONDIENTES

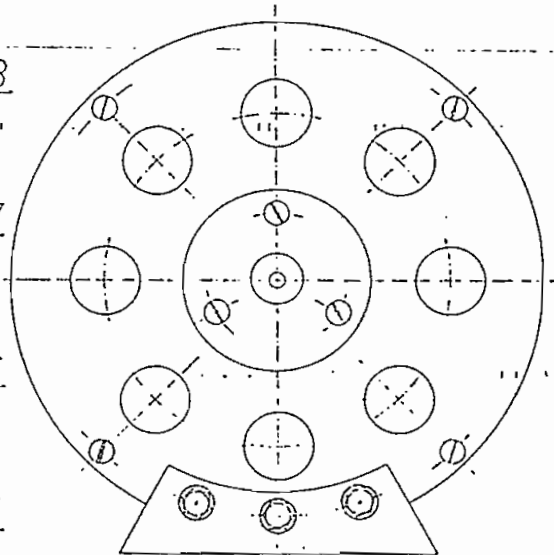
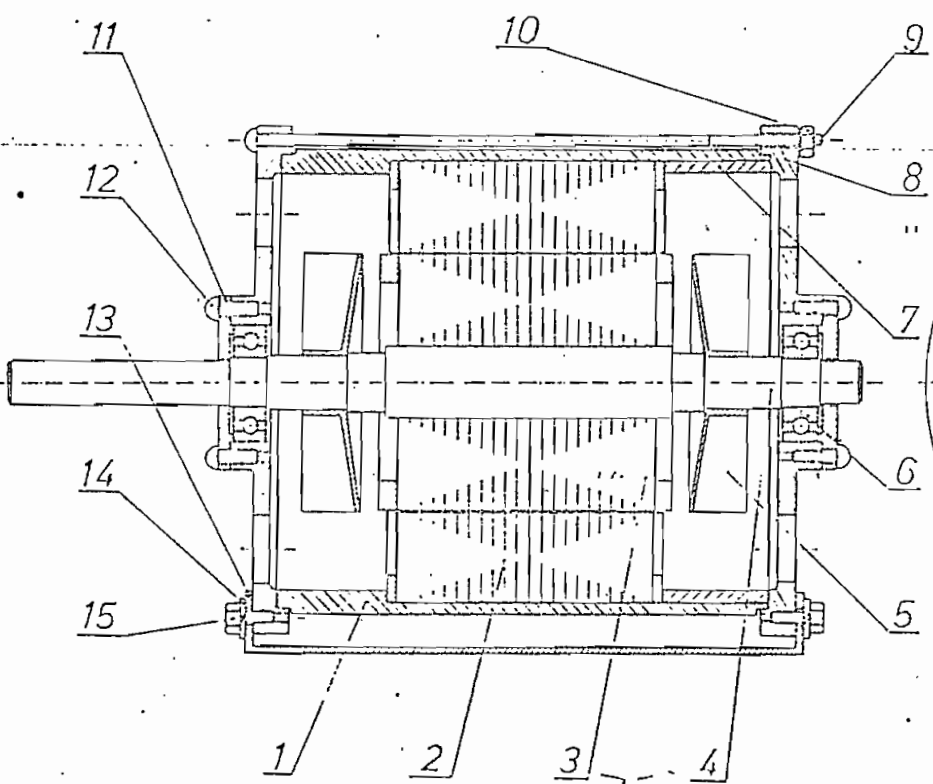
El diseño de cada una de las partes del motor se lo enfocó, desde el principio, a la disponibilidad de materiales en el mercado local, así como, las facilidades de construcción de los talleres de la E.P.N.

Estas dos restricciones deberán ser tenidas en mente a lo largo del diseño y realización de cada una de las partes.

Los dibujos de cada parte se dan a continuación y el siguiente orden:

Dibujo completo - en corte del motor	II - 1
Dibujo de la carcasa	II - 2
Dibujo de las Tapas	II - 3
Dibujo del rotor	II - 4
Dibujo de la herramienta para torneear las hendiduras de las tapas	II - 5

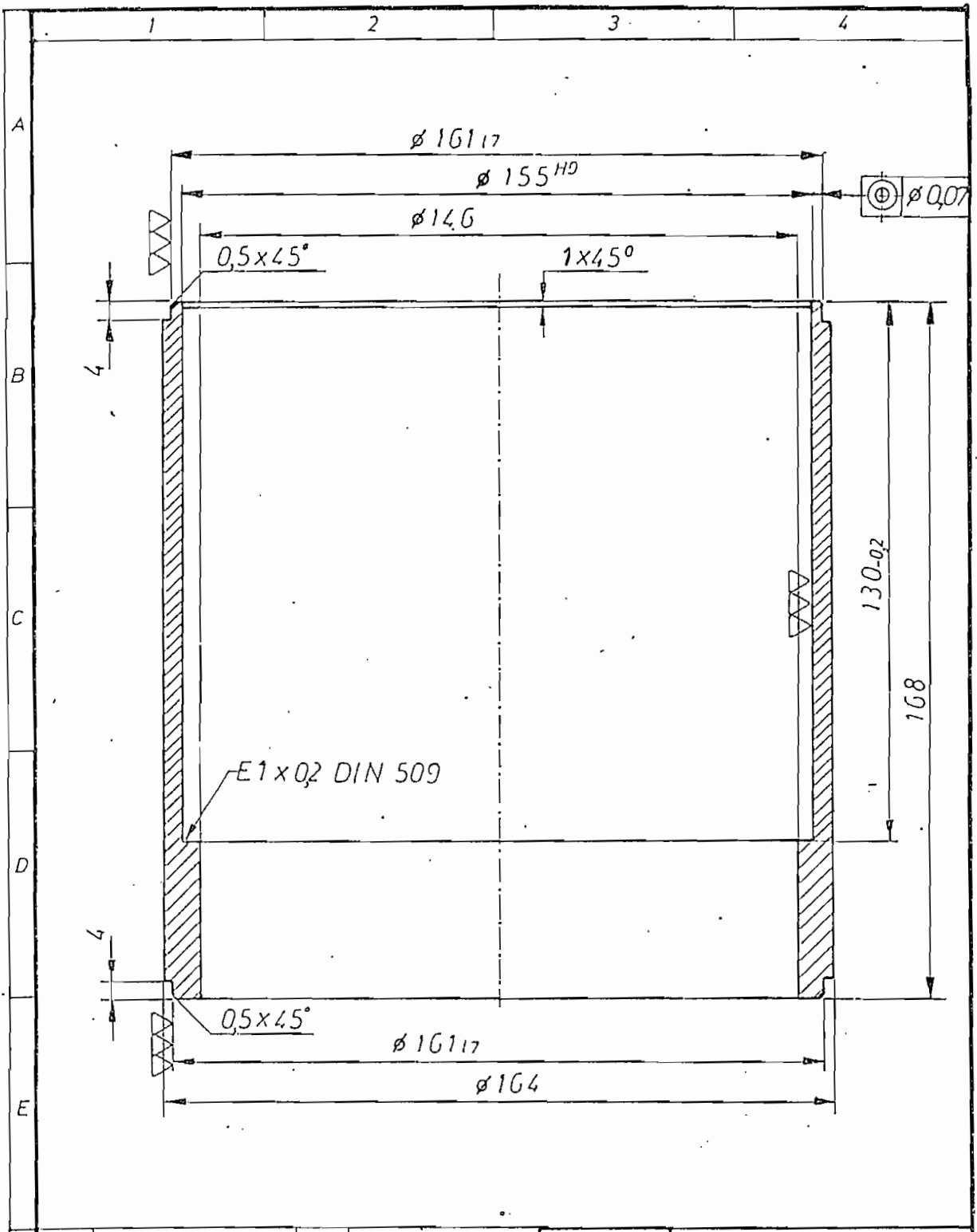
MOTOR ELECTRICO TRIFASICO	
Características Técnicas	
Potencia	1.100 w.
Voltage	208 v.
Conexión	△
Intensidad	5 Amp.
Revoluciones	1.650 r.p.m.



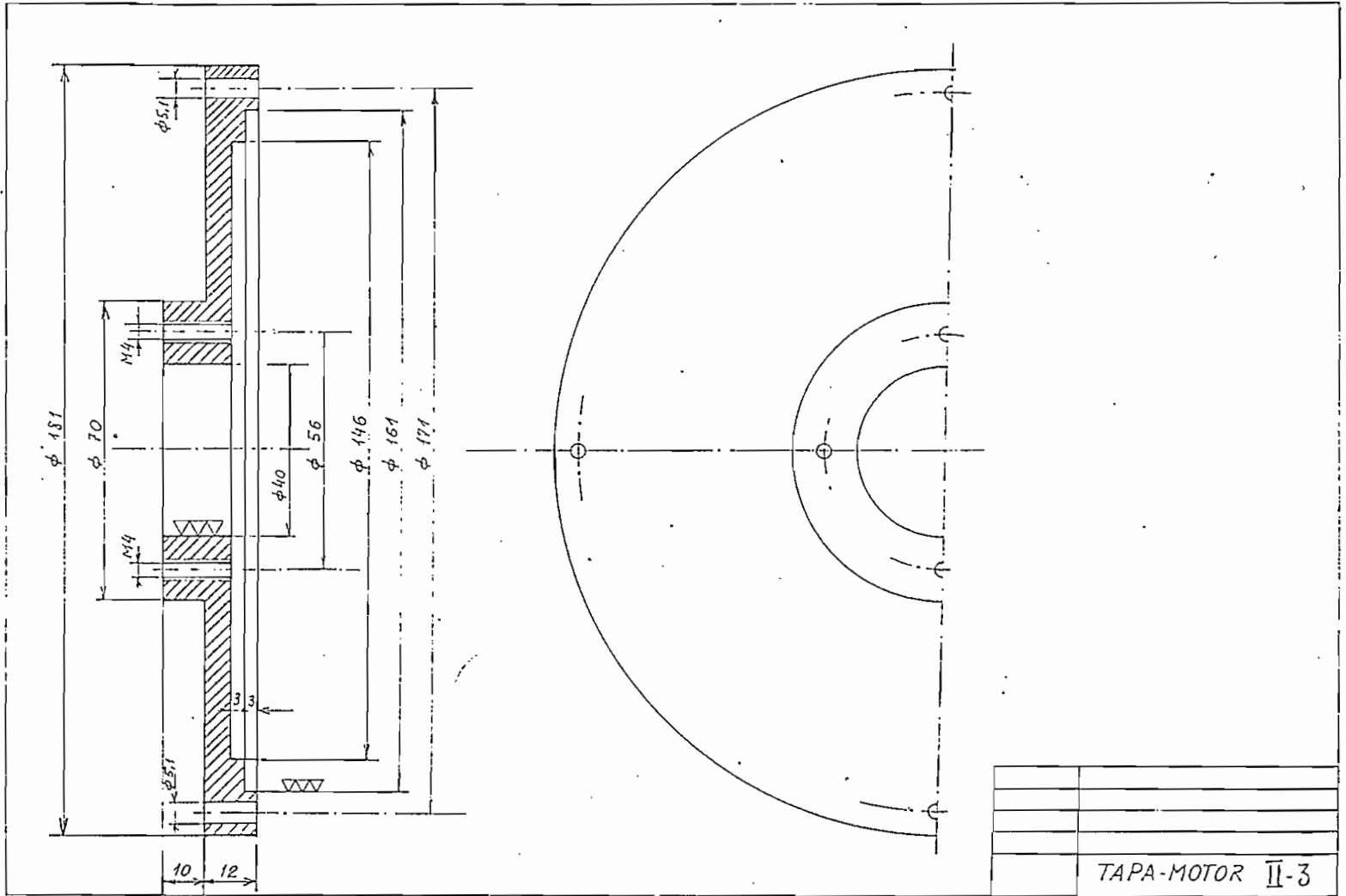
Pos.	Denominación	NT de Material	Material	Can.	Observaciones
1	Arrolo	1910373	Fe. laminado	1	
2	Polidiamante	1910385	Fe. laminado	2	
3	Ventilador	1910386	Fe. laminado	2	
4	E.I.C.	1910387	Fe. laminado	1	
5	Motor	1910388	Fe. laminado	1	
6	Carro del estator	1910389	Fe. laminado	1	
7	Carro del rotor	1910390	Fe. laminado	1	

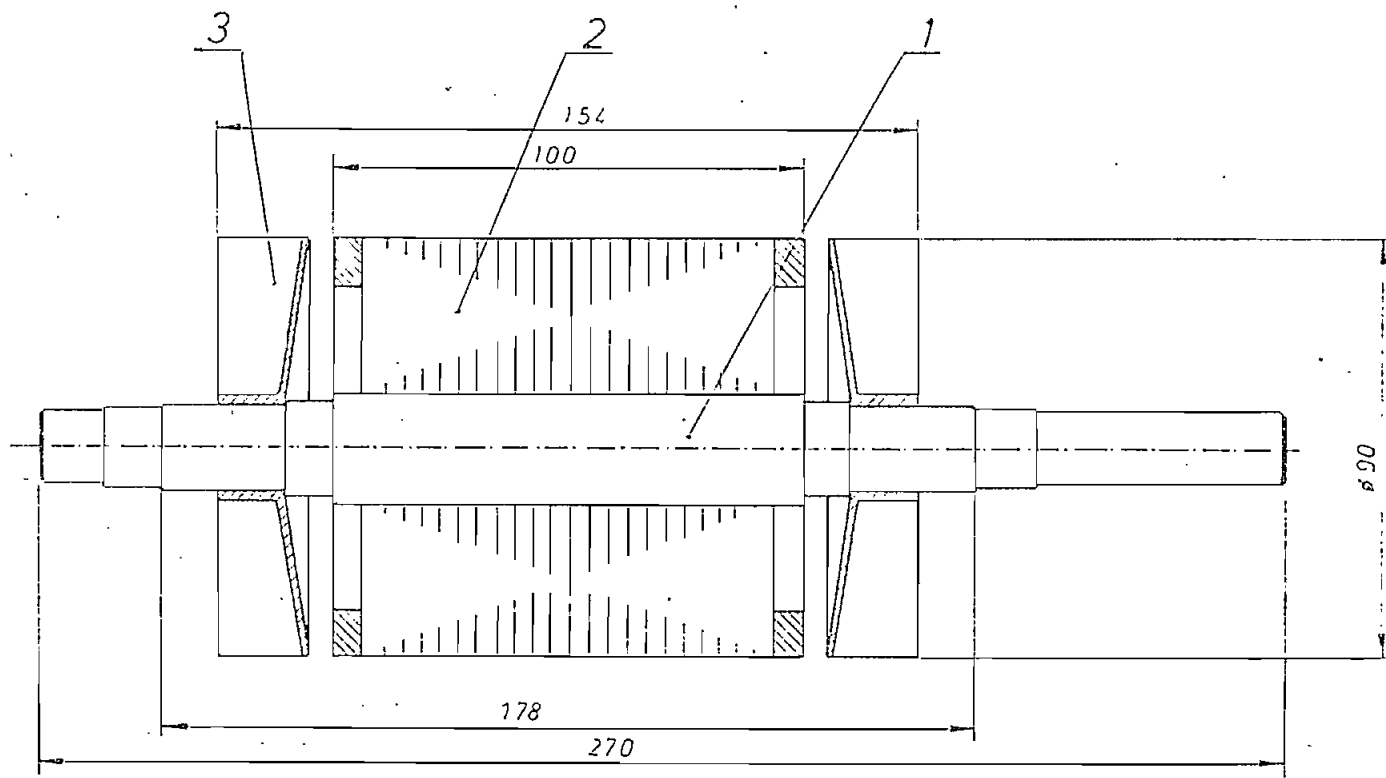
15	Tornillo	1910391	Fe. laminado	6	
14	Arandela	1910392	Fe. laminado	6	
13	Junta topográfica	1910393	Fe. laminado	6	
12	Tornillo	1910394	Fe. laminado	6	
11	Tapa	1910395	Fe. laminado	2	
10	Tuerca	1910396	Fe. laminado	2	
9	Perno	1910397	Fe. laminado	2	
8	Tapa lateral	1910398	Fe. laminado	2	

Rep.	Par.	Nota	Rev. No.	Fecha	EPN	
					ESCALA 1:1	
MOTOR ELECTRICO					91.07.001.2	II-1

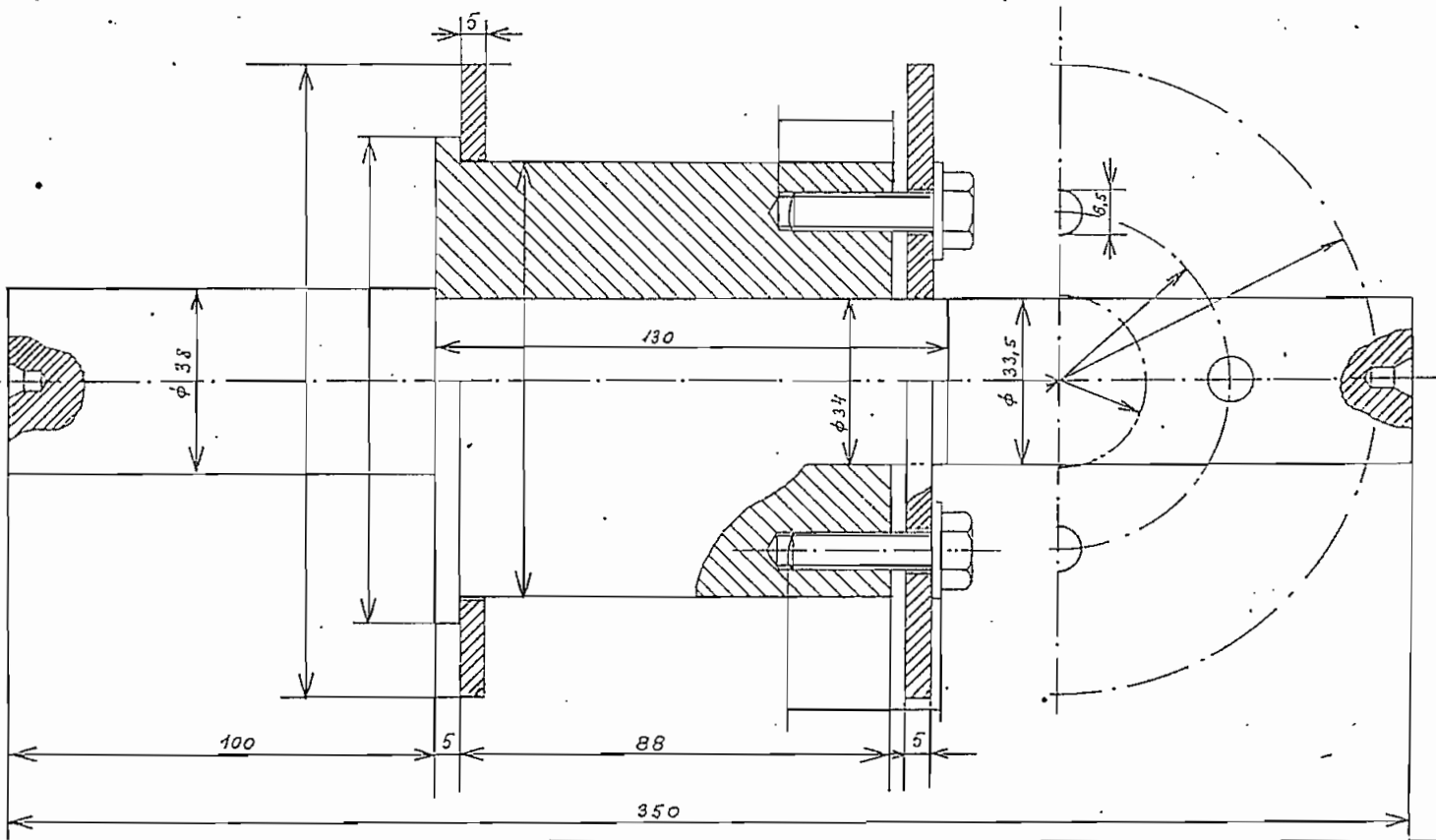


		EPN			
Material:		Precisión	ESCALA	Dib.	V-78
Hierro fundido		FINA	1:1,25	DIS.	
		INEN 138		Rev.	
CARCAZA			91.07.101.4		II-2





3	VENTILADOR	—	Plástico	1	Se suministra
2	ROTOR	—	Hierro silis.	1	
1	EJE	91.07.102.3	Acero de in.	1	
Pds	Denominación	Nº PLANO	Material	Cant.	Observaciones
			EPN		
			ESCALA	D. S.	
			1:1	Dis.	
				Rev.	
ROTOR-EJE				91.07.002.3	II-4



Herramienta para lornear
endiduras de tapas

II-5

C A P I T U L O I I I

REALIZACION DE LAS COMPONENTES
MECANICAS Y DE LOS DEVANADOS

3. 1. DESCRIPCION DE COMO SE REALIZARON LAS COMPONENTES MECANICAS

Carcasa . Luego de analizar, varias alternativas como fundir la car casa de aluminio o hierro ó utilizar cilindros de aluminio cobre o hierro fundido que cumplan con las dimensiones requeridas para el tor neado de la carcasa.

Se optó por utilizar un cilindro, de motor a diesel, de hierro fundi- do.

Antes del torneado de la carcasa: se procedió a un recocido para sua- vizar el material.

El recocido se lo realizó a 75° C y por el tiempo de 2 horas para luego enfriar lentamente en el mismo horno.

Se torneó la carcasa y se procedió al montaje en el estator.

Para obtener el centrado preciso de la carcasa con respecto al eje del motor se construyó un aparato especial decentrado.

Este aparato consta en el dibujo (II- 5) y se lo utiliza en las fábr*ic*as de motores eléctricos, para el centrado de la carcasa.

Las Tapas. La forma y dimensiones del diseño de las tapas se lo hizo con el criterio de facilitar su construcción y consecución del mate- rial.

Se decidió utilizar planchas de acero de transimisión de las medidas

adecuadas para el torneado.

Estas planchas no necesitan recocido y fueron torneadas, ajustadas y centradas tomando como referencia el centrado de la carcasa.

Se hicieron las perforaciones centrales en las tapas, para alojar los cojinetes, previamente seleccionados de acuerdo con el diseño.

Los cojinetes tienen la siguiente denominación

602 - Z S K F.

El Rotór. El torneado del eje del rotor, fue relativamente fácil ya que se disponía del núcleo montado en un eje lo que se hizo es adaptarlo a las nuevas dimensiones del diseño en cuestión.

Los ventiladores, fueron adaptados de acuerdo al diseño a partir de unidades, conseguidas en S. K. F.

Con las componentes mecánicas listas, se armó el motor y se hizo la prueba de centrado, constatándose que se había logrado el objetivo.

Esto es de interés ya que el entrehierro entre los diámetros interno y externo del estator y rotor respectivamente son 0,25 mm.

En la Foto III - 1 se pueden ver las partes mecánicas componentes descritas anteriormente.



FOTO III-1

3. 2. ESQUEMA Y REALIZACION DEL DEVANADO ESTATORICO

Del capítulo I se sacan los datos para la realización del devanado estatórico.

En este capítulo se estableció que el número de conductores por ranura $Z_1 = 52$ y el número de conductores por lado de bobina o sean espiras por bobina $= \frac{Z_1}{2} = 26$.

Se estableció además que $q_1 =$ bobinas por polo y por fase $= 3$.

El paso del devanado $S_1 = 8$ o sea que si el un lado de bobina va alojado en la ranura No. 1 el otro irá alojado en la ranura No. 9.

El esquema del devanado consta en el dibujo III - 2.

El esquema simplificado para las conexiones de los grupos de bobinas por polo y por fase se ve en la Figura III - 1.

Para la realización del devanado se empleó conductor de cobre barnizado # 21 AWG; se utilizó dos # 21 en vez de 1 # 18 para facilitar la inroducción del alambre en las ranuras, por ser estas muy estrechas.

Antes de proceder al trabajo de alojar el devanado en las ranuras del estator, se aisló las ranuras con doble capa de papel prespan de 0,5 mm de espesor.

Esto le da al motor un grado de aislamiento clase A.

Durante el proceso de alojamiento de las bobinas en sus respectivas ranuras, se iban intercalando entre lados de bobinas una lámina de prespan de 0,5 mm con el objeto de aislar las bobinas de diferentes fases.

Para asegurar las bobinas en las ranuras se utilizó tapas de prespan de 1 mm de espesor.

Terminado el trabajo de alojamiento del devanado, se hizo las conexiones de acuerdo al dibujo III - I.

Para comprobar si las conexiones no tenían equivocaciones, se utilizó el método del campo giratorio.

Para lo cual se conecta el devanado en estrella y se lo alimenta con una tensión baja, de tal valor que por los conductores circule como máximo 1.5 veces la corriente nominal.

Si las conexiones están bien hechas se va a tener en el interior del estator un campo giratorio. Lo que se prueba si al colocar un rodamiento de diámetro 1/10, con respecto al del estator, sobre la superficie interna del estator, gira alrededor de dicha superficie.

Después de esta prueba de conexiones del devanado se realizó una prueba de aislamiento del devanado con respecto a la carcasa y entre devanados, con los siguientes resultados:

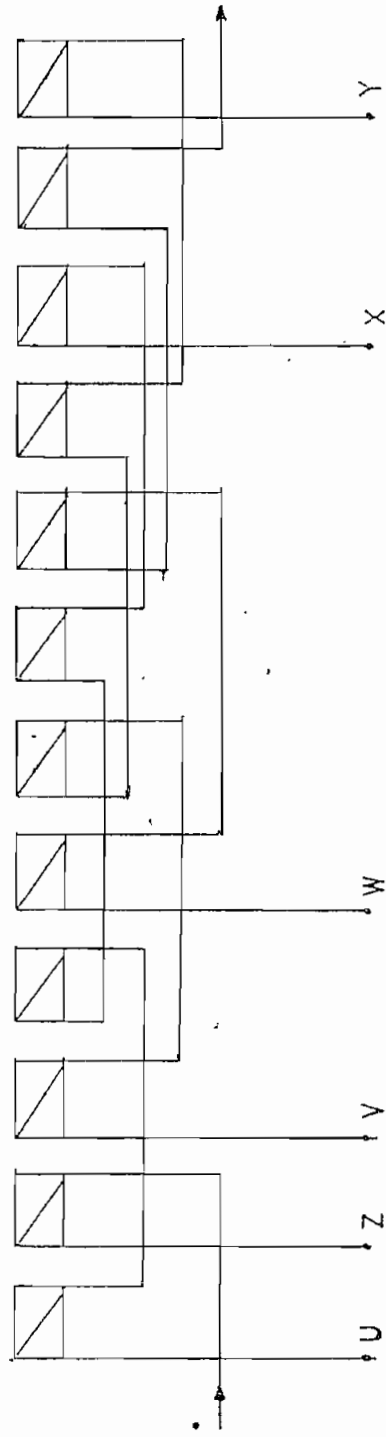
1.000 mega Ω . entre el devanado y carcasa al aplicar un voltaje de 500 V.

1.000 mega Ω . entre devanados de fase al aplicar 500 V.

Valores que dan seguridad para que el motor funcione a 208 V.

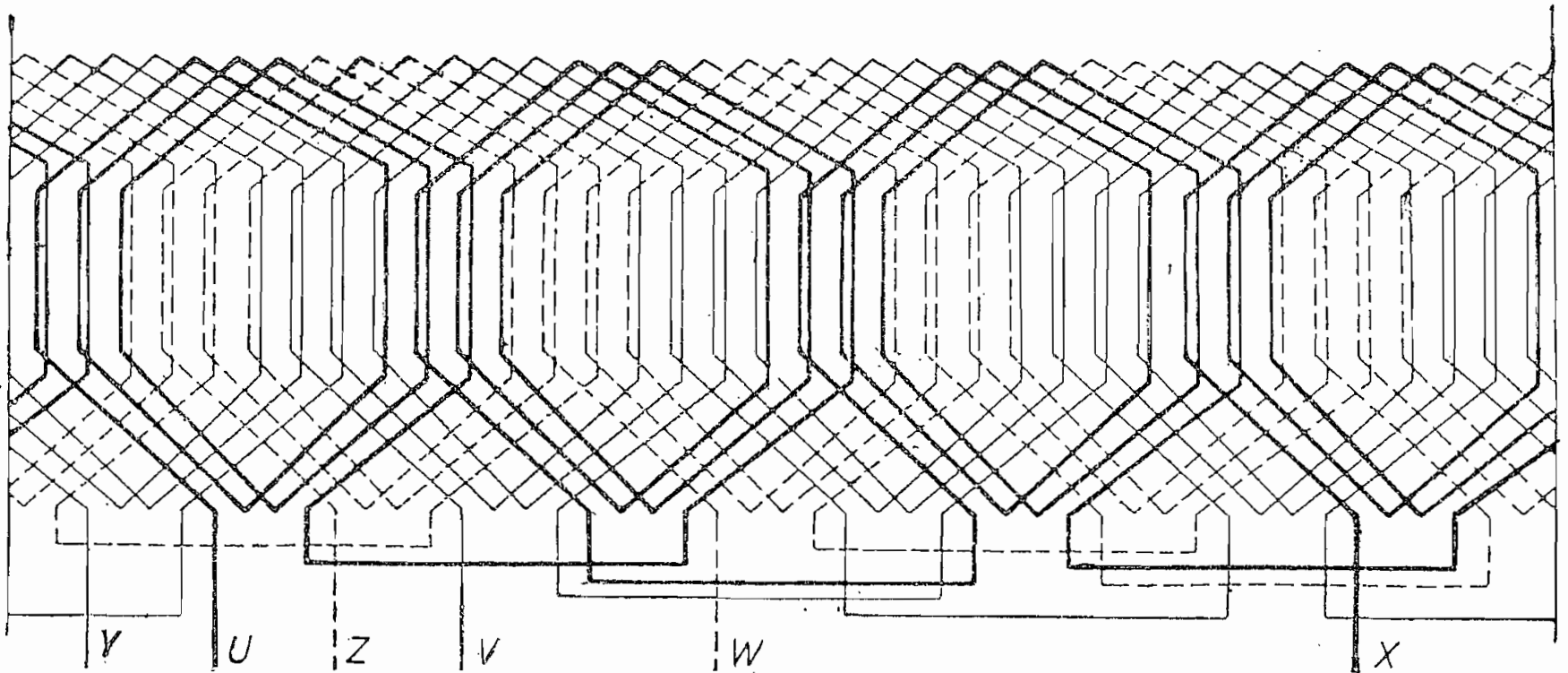
Se pasó luego al barnizado y secado del devanado con lo que se dió por terminada la realización del devanado estático. Foto III - 1.

FIGURA III - 1



ESQUEMA DE CONEXIONES DE LOS GRUPOS DE BOBINAS POR POLO Y POR FASE

Fig. III-2



Desarrollo del devanado trifásico del motor.- 3 Fases; Paso 1-9

3. 3. REALIZACION DEL DEVANADO ROTORICO (Jaula)

Para poder medir las dimensiones de una lámina del núcleo del rotor, se tuvo que sacarla del núcleo rotórico disponible. Fig. III - 3.

Pero para lograr esto en la mejor forma se tuvo que aflojar la jaula y destruir uno de los anillos.

De ahí que el trabajo realizado en el devanado rotórico, se redujo a la construcción de un nuevo anillo y la conexión, por soldadura, a los extremos de las 28 ranuras.

El material utilizado para la construcción es de platina de cobre.

El proceso para la construcción fue el siguiente:

Se centró la platina por medio de un eje, para el torneado; se formó un círculo con las medidas aproximadas del diámetro exterior del anillo original.

Luego se juntó rígidamente al círculo una matriz (lámina del rotor, Fig. III - 3) para hacer los 28 huecos.

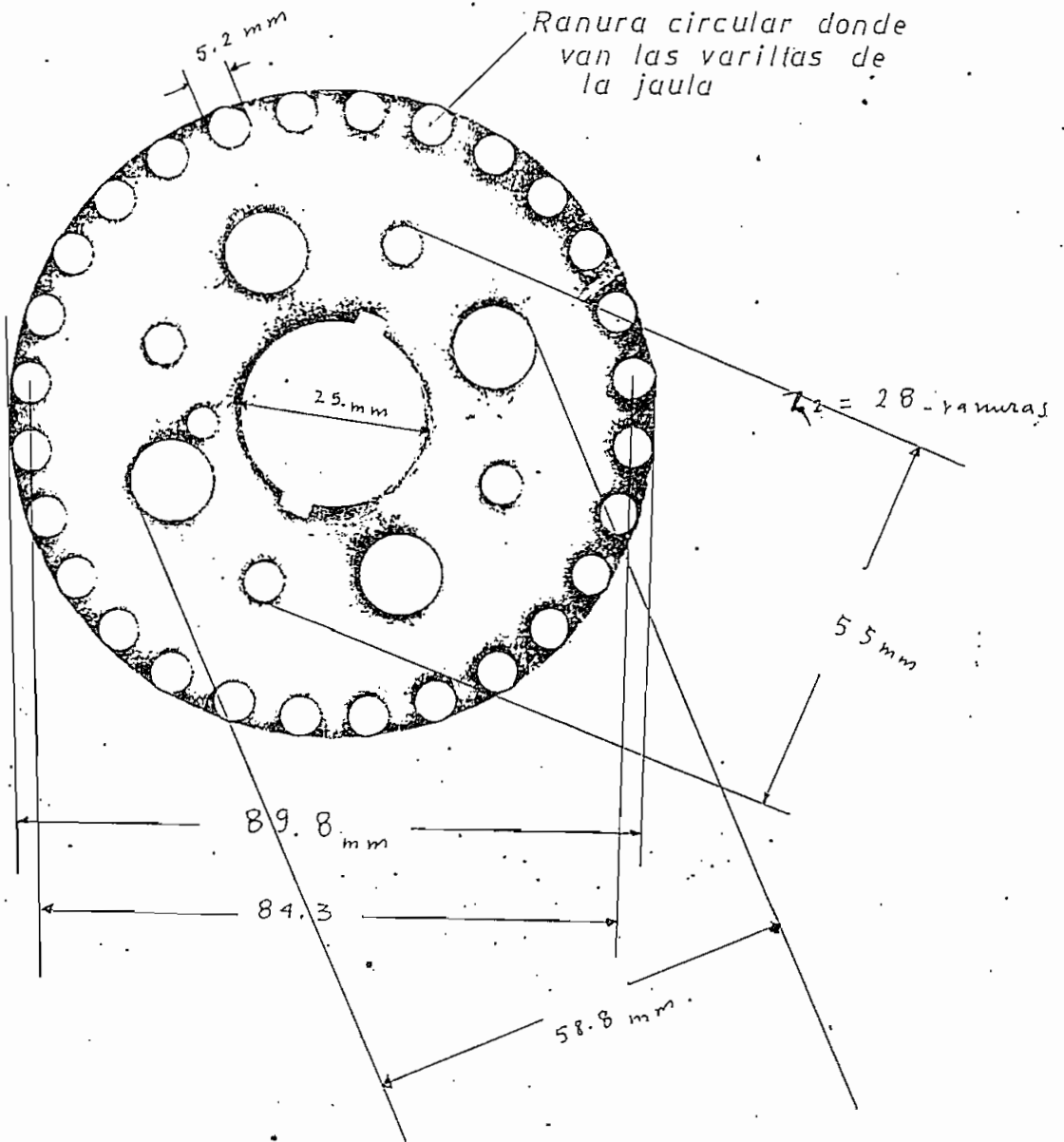
Se recortó la parte central del círculo para obtener el anillo.

El paso siguiente es la colocación del anillo, a las varillas, en tal forma que los extremos de éstas queden soldadas en los huecos del anillo.

Como paso final se montó el rotor en el torno para dar al anillo las dimensiones definitivas.

Una foto de conjunto está en la Foto III-1.

Lámina de hierro (para dínamo)
Del rotor



CAPITULO IV

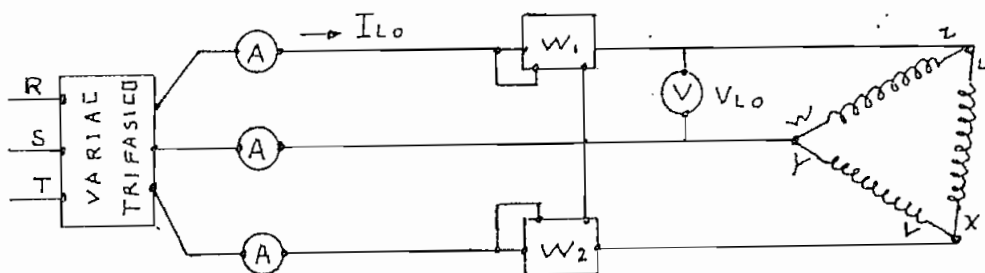
4. 1. PRUEBAS EN VACIO

1. CIRCUITOS Y CURVAS

La prueba en vacío, del motor asincrónico, se la realiza, con el objeto de determinar las pérdidas en el hierro y rotacionales.

El circuito empleado para esta prueba es el siguiente.

FIGURA 4 - 1



En esta prueba es necesario utilizar watímetros de bajo factor de potencia a fin de obtener valores de potencia con mínimo error, ya que el circuito es muy inductivo.

Los parámetros medidos por intermedio de la prueba son los siguientes.

P_o = potencia que absorbe el motor sin carga

I_{Lo} = corriente de línea

V_{Lo} = voltaje aplicado al motor

Con estos parámetros se calculan estos otros :

$\cos \varphi_0$ = factor de potencia del motor sin carga

P_{C1} = pérdidas en el cobre para la corriente de vacío I_{L0}

$P_R + P_H$ = pérdidas rotacionales más pérdidas en el hierro del motor .

Ejemplo de cálculo para obtener estos últimos parámetros.

Datos conocidos $P_0 = 15 \text{ w}$

$$I_{L0} = 0,62$$

$$V_L = 72,6$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_{L0} \times V_L \sqrt{3}} = \frac{15}{0,62 \times 72,6 \times \sqrt{3}}$$

$$P_{C1} = 3 I_F^2 R_F$$

$$I_F = \frac{I_{L0}}{3}$$

$$R_F = 2,86 \Omega \text{ valor medido (resistencia de una fase del estator)}$$

$$P_{C1} = 3 \times \left(\frac{0,62}{3}\right)^2 \cdot 2,85 = 1,1 \text{ w}$$

$$P_R + P_H = P_0 - P_{C1} = 15 - 1,1 = 13,9 \text{ w}$$

Normalmente a las pérdidas rotacionales se les asigna un valor de / 0,8 a 1 % de la P_N .

Para este caso:

$$P_R = \frac{0,8 \times 1100}{100} \approx 9 \text{ watio}$$

con los parámetros medidos y los calculados se elaboró el cuadro de valores IV - 1 que sirve de base para el trazado de las curvas siguientes:

Curva 1. $P_R + P_H$ en función del voltaje de fase al cuadrado. V_F^2

Curva 2. $\cos \varphi_0$ en función del voltaje de fase

Curva 3. I_0 en función del voltaje de fase.

Estas curvas están a continuación del cuadro IV - 1 y serán analizadas en el Capítulo V.

4. 2. PRUEBAS EN CORTO CIRCUITO

1. Circuito y curvas

La prueba de cortocircuito se la utiliza para determinar las pérdidas en el cobre de los devanados estático y rotórico del motor; así como para determinar la impedancia, reactancia y resistencia, e equivalentes del motor.

El circuito empleado para la prueba es el de la Fig. IV - 2.

CUADRO IV - 1

V_L	I_L	P_o	$\cos \varphi_o$	$3 I_f^2 R_F$	$P_R + P_H$	V_F
72.6 ⁵	0.62	15	0.192	1.1	13.9	42
86.5	0.722	19.5	0.177	1.54	17.96	50
103.8	0.88	24.7	0.156	2.21	22.5	60
129.75	1.14	34.1	0.133	3.72	30.38	75
138.4	1.22	37.5	0.128	4.26	33.24	80
155.7	1.44	46	0.118	5.93	40.1	90
173	1.66	55	0.110	7.88	47.1	100
190.5	1.96	69	0.1066	11	58	110
207.6	2.37	89.2	0.104	16.1	73.14	120
225	2.92	118	0.104	24.4	93.6	130

PERDIDAS EN EL HIERRO EN FUNCION DEL V_f^2

$P_H \neq P_R$

100 W

CURVA 1

$P_H = 64 \text{ W}$

$P_R = 9 \text{ W}$

130²

120²

110²

100²

90²

80²

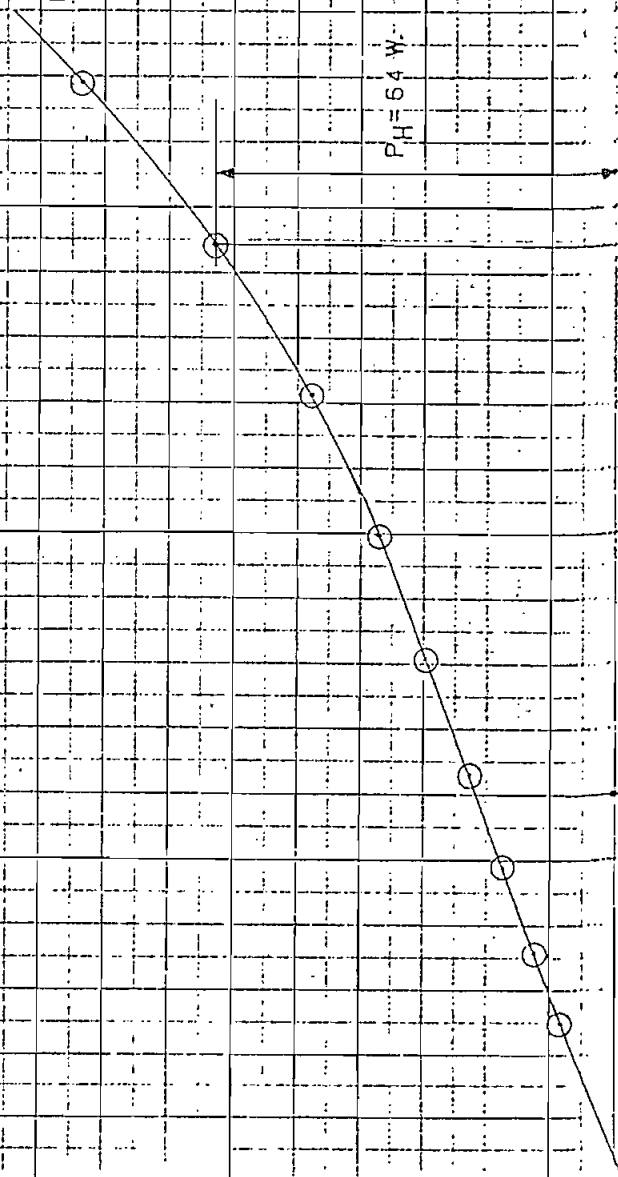
70²

60²

50²

0

V_f^2

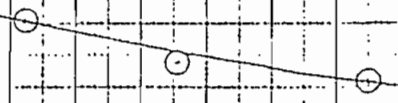


cos 10°

3

10

PRUEBA SIN CARGA

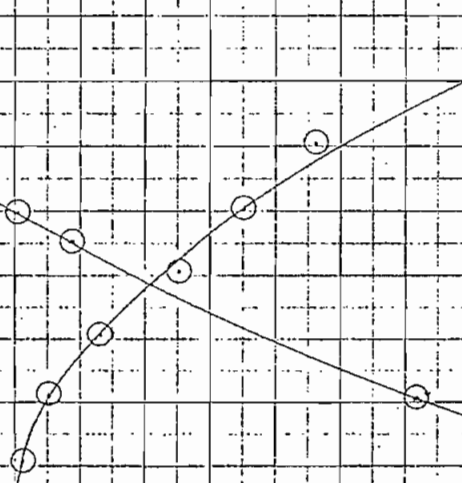


CURVA 3

cos 10°

0,2 - 2

CURVA 2



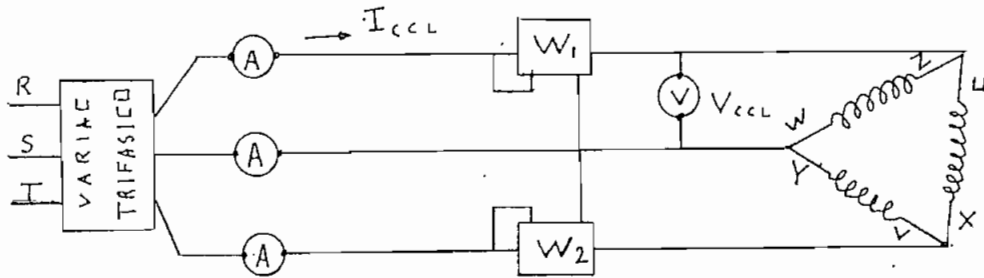
0,1 - 1

0,6

0,8

0,4

FIGURA IV - 2



Durante la prueba el rotor debe permanecer sin movimiento (bloqueado).

Parámetros medidos

P_{CCL} = Potencia del cortocircuito total

I_{CCL} = Corriente de cortocircuito

V_{CCL} = Voltaje de cortocircuito

A partir de estos parámetros obtenemos por cálculo los siguientes:

Z_{CC} = impedancia de cc por fase

R_F = Resistencia efectiva por fase

X_F = Reactancia por fase

R_2' = Resistencia del rotor referida al estator

Ejemplo de cálculo.

Datos. $P_{CC} = 19.5 \text{ w}$ $V_L = 20.76$ $I_{CCL} = 1.3$

Cálculo de $Z_{CC} = \frac{V_F}{I_F}$ para este caso

$$V_{CC}^F = V_{CCL} ; I_F = \frac{I_{CCL}}{\sqrt{3}}$$

$$Z_{CC} = \frac{20.76 \times \sqrt{3}}{1.3} = 27.7 \Omega$$

Cálculo de R_F por fase

$$R_F = \frac{\frac{P_{CC}}{3}}{I_F^2} = \frac{19.5}{1.3^2} = 11.54 \Omega$$

Cálculo de X

$$X = \sqrt{Z^2 - R_F^2} = \sqrt{27.7^2 - 11.54^2} = 25.17 \Omega$$

Cálculo de R_2'

$$P_{Fase} = I_F^2 (R_1 + R_2')$$

$$R_F - R_1 = R_2'$$

pero R_1 es la resistencia medida por fase del estator $R_1 = 2.85$

$$R_2' = 11.54 - 2.85 = 8.68 \Omega$$

$$\cos \varphi_{CC} = \frac{P_{CC}}{V_{CCL} I_{CCL} \sqrt{3}} = \frac{19.5}{20.75 \times 1.3 \times 1.73} = 0.417$$

Con los parámetros medidos y calculados se elabora el cuadro IV - 2. que sirve de base para dibujar las curvas de $\cos \phi_{cc}$; P_{Fase} ; I_f ; en función del voltaje de Fase V_F .

Estas curvas están dibujadas a continuación.

Dibujo IV - 3. Curvas de la prueba de cc.

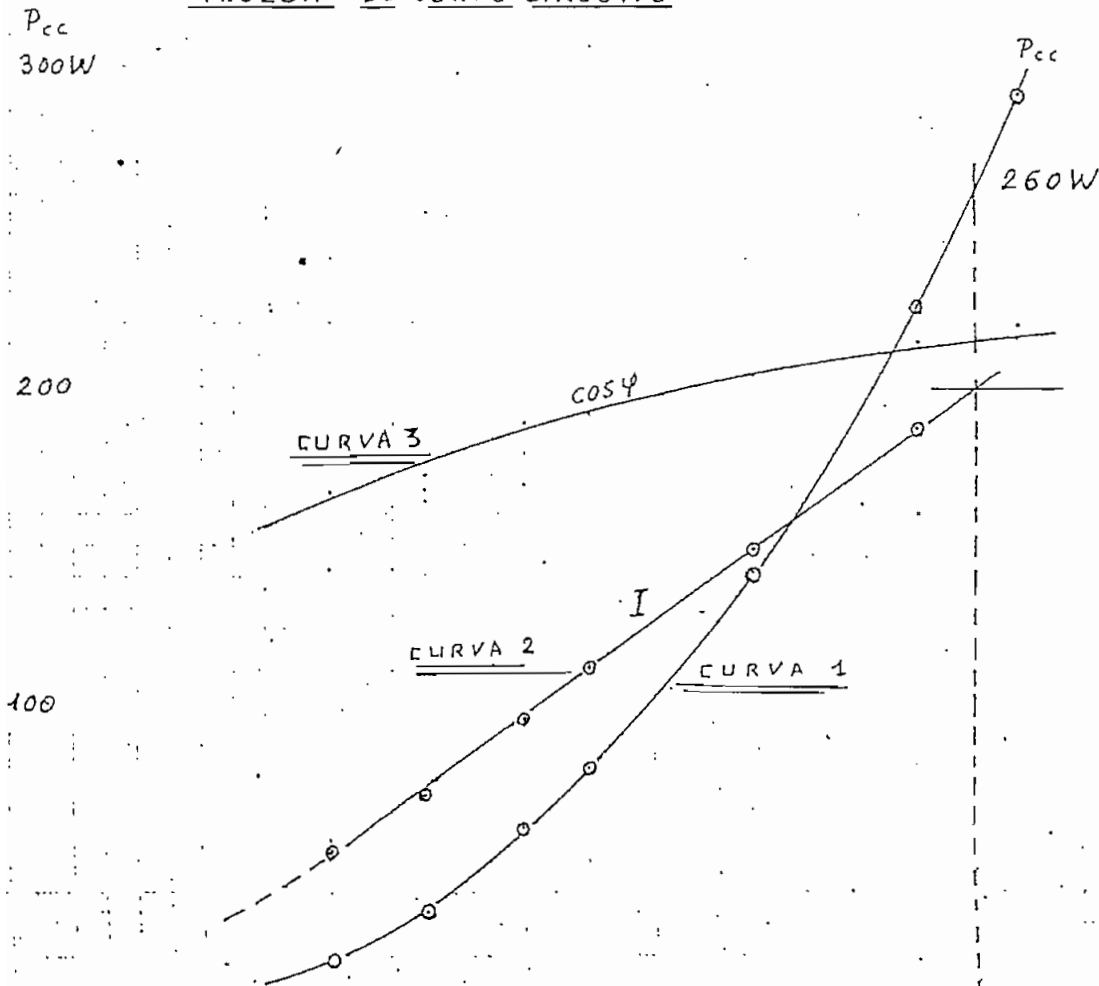
CUADRO IV - 2

V_F	V_L	I_L	P_{cc}	$\cos \varphi_{cc}$	Z_{cc}	R_F	X	R'_2
12	20.76	1.3	19.5	0.417	27.7	11.54	25.17	8.68
15	25.95	1.78	34.5	0.442	11.17	11.17	22.68	8.31
18	31.14	2.38	60.5	0.468	22.69	10.62	20	7.76
20	34.6	2.79	80	0.480	21.5	10.62	18.7	7.76
25	43.25	3.72	142	0.509	20.16	10.26	17.35	7.4
30	51.9	4.68	225	0.534	19.23	10.27	16.26	7.41
33	57.16	5.47	290	0.536	18.09	9.69	15.27	6.89

CURVAS DE LA

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

DIBUJO-IV-3



4. 3. PRUEBA DE CARGA

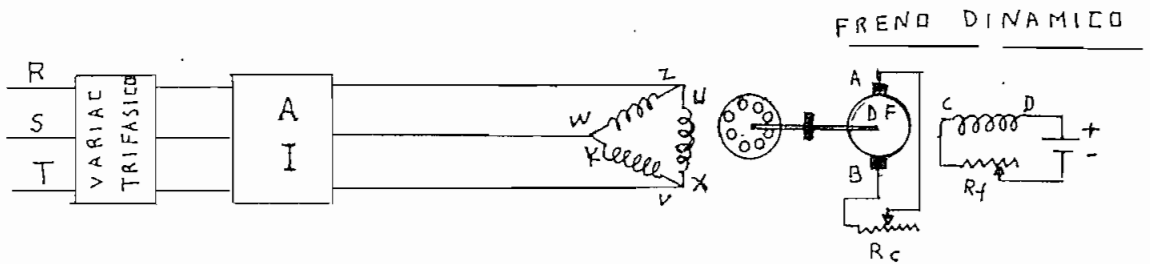
1. CIRCUITOS Y CURVAS

La prueba de carga se la realiza como culminación del trabajo de construcción del motor.

Para lo cual se acopla el motor a una dínamo-freno.

Se alimenta el motor a voltaje nominal 208 V y se sigue el procedimiento de carga.

El circuito eléctrico empleado para el efecto es el siguiente.



En el analizador industrial se obtienen los valores de los siguientes parámetros.

P_e = potencia de entrada

V_L = voltaje de línea

I_L = de línea

$\cos \varphi$ = factor de potencia

La dínamo freno da el valor del Torque

T = Torque en Kg. m

y con un tacómetro se mide la velocidad para cada estado de carga

n = velocidad asincrónica

Con estos datos se calcula el deslizamiento

$$s \% = \frac{(n_0 - n) \times 100}{n_0}$$

La potencia de salida

$$P_s = 0,001396 T_n 746 \text{ wátios y}$$

$$\text{el } \eta = \text{rendimiento} = \frac{P_s}{P_e}$$

Con los valores medidos y calculados se elabora el cuadro de valores IV - 3.

Este cuadro sirve de base para el dibujo de las curvas IV - 3.1, IV - 3.2 y IV-3.3

En las que se puede ver el comportamiento de los diferentes parámetros del motor bajo carga.

Curvas IV - 3 - 1. n y S en función de la potencia de salida.

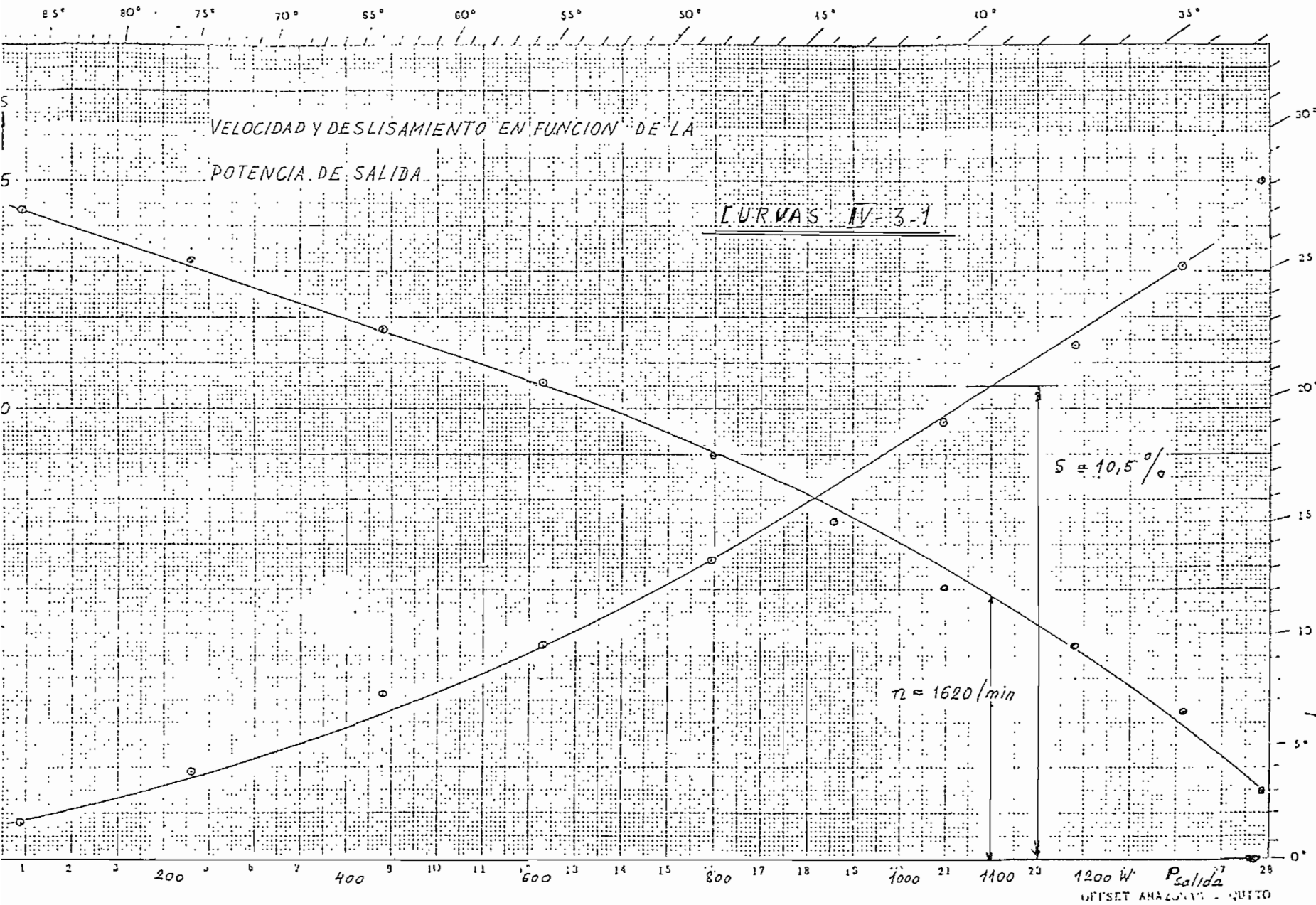
Curvas IV - 3 - 2. I_L y \cos en función de potencia de salida y

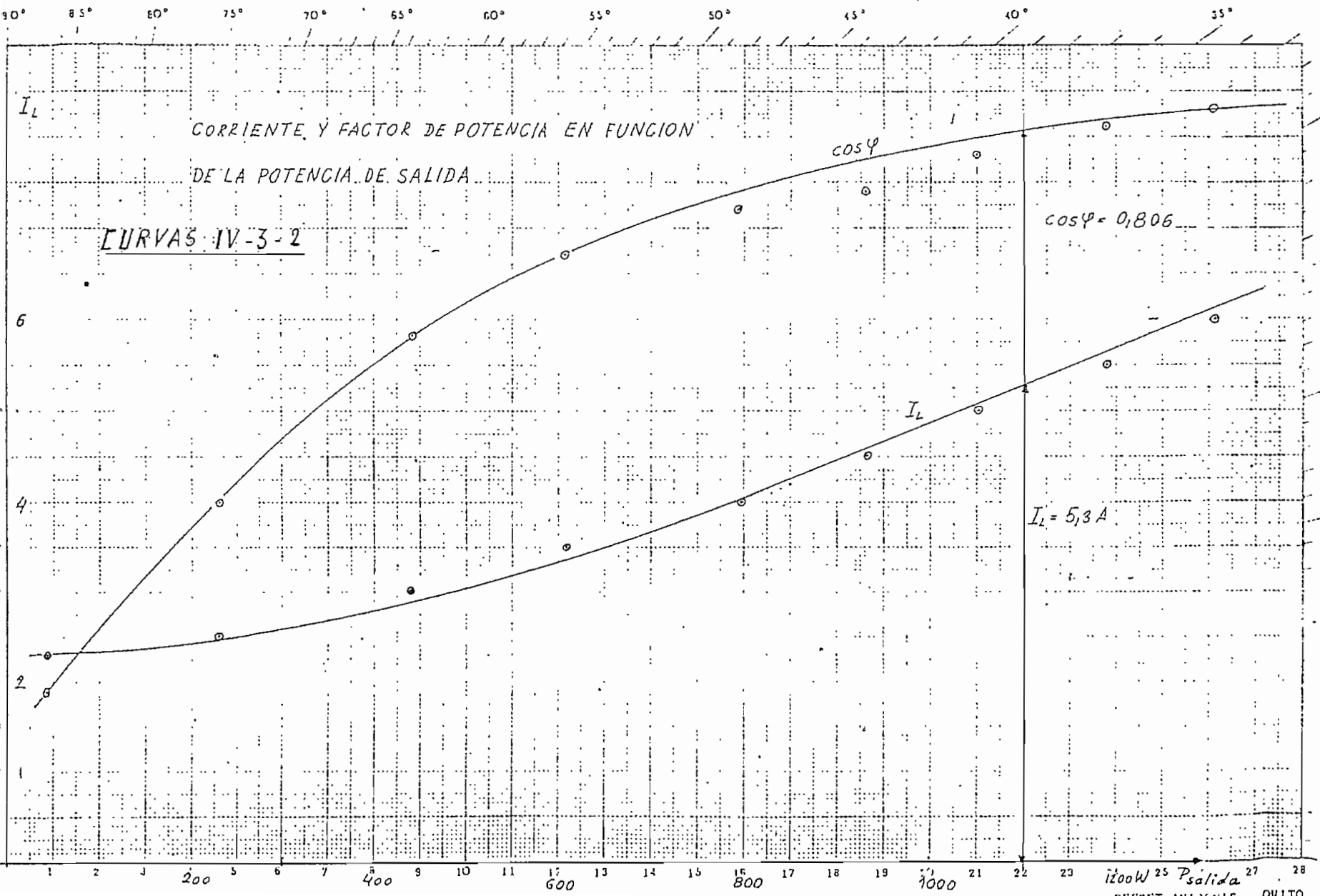
Curvas IV - 3 - 3. T y η en función del mismo parámetro

los resultados de esta prueba están en el capítulo V.

CUADRO IV - 3

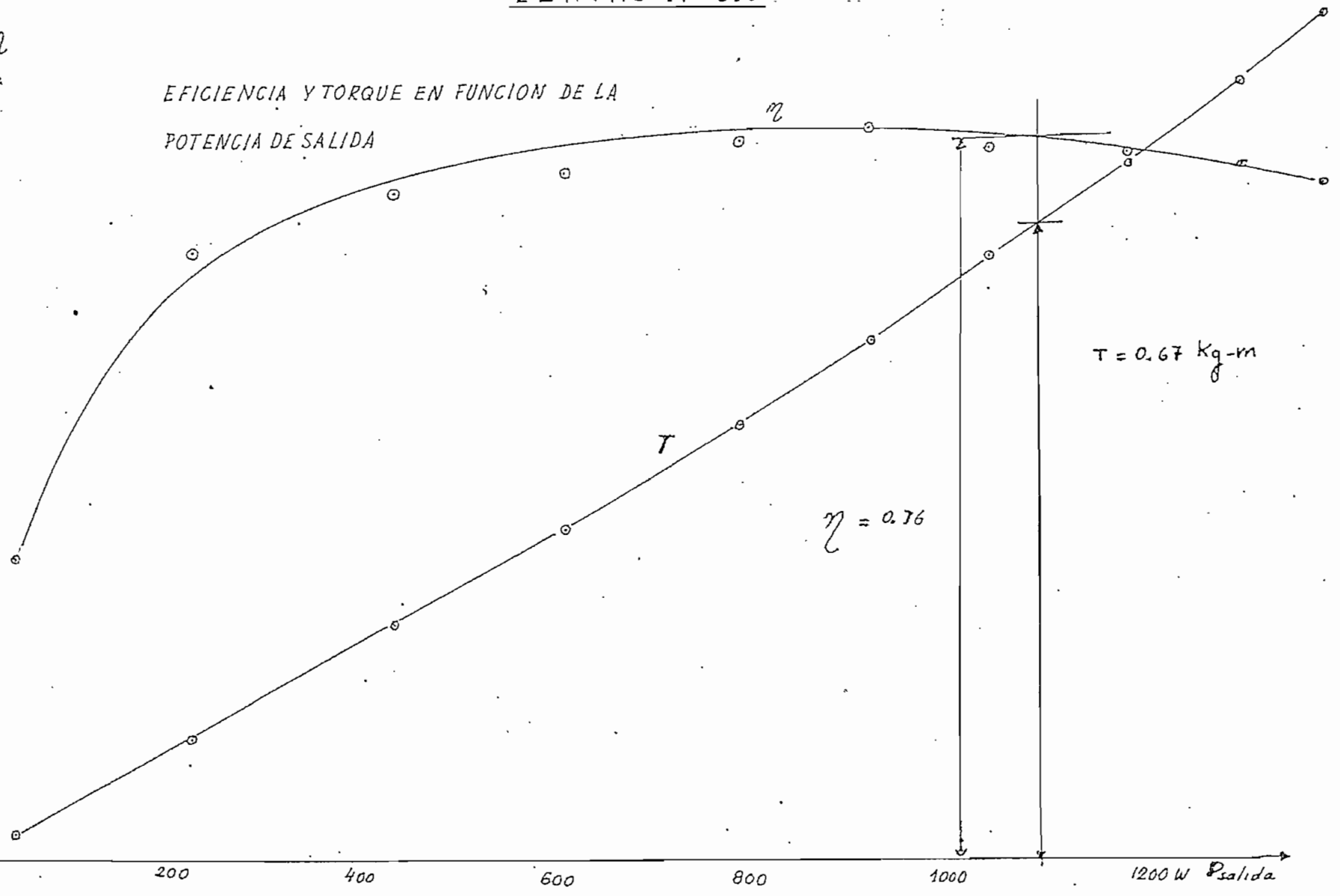
V_L	W	I_L	n (rpm)	F (kg)	P_{salida}	$\cos \varphi$	η	$s \%$	L_{-brazo} (m)	T (kg-m)
208	150	2.3	1786	0,13	47.52	0,18	0,32	0,78	0,20	0,026
208	360	2.5	1765	0,64	2.32	0,40	0.64	1.94	0,20	0,128
208	630	3	1735	1.240	441	0,58	0,70	3.61	0,20	0,248
208	850	3.5	1715	1.75	665	0,67	0,72	4.72	0,20	0,35
208	1.040	4	1680	2.31	796	0,72	0,76	6.67	0,20	0,462
208	1.200	4.5	1655	2.74	930	0,74	0,77	8.06	0,20	0,548
208	1.410	5	1625	3.16	1053	0,78	0,75	9.72	0,20	0,632
208	1.600	5.5	1595	3.64	1191	0,81	0,74	11.39	0,20	0,728
208	1.795	6	1565	4.07	1307	0,83	0,73	13.1	0,20	0,814
208	1.950	6.5	1530	4.44	1394	0,83	0,71	15	0,20	0,888





CURVAS IV-3.3

EFICIENCIA Y TORQUE EN FUNCION DE LA
POTENCIA DE SALIDA



C A P I T U L O V

C O N C L U S I O N E S

En el cuadro V - 1 estarían las conclusiones ya que en el se comparan los valores de las cantidades calculadas con las medidas, del motor.

En términos generales se puede decir, que la coincidencia entre éstos es bastante buena, ya que por los factores impuestos de manera aproximada (por ejemplo curva de magnetización real del hierro, etc) no se podía esperar resultados de cálculo más precisos.

En cuanto a la diferencia de valores de pérdidas en el cobre calculados con respecto a las obtenidas en la prueba de corto circuito hay que señalar lo siguiente :

- 1). La corriente de fase del rotor, en corto circuito, es bastante mayor que en régimen normal, porque la corriente de magnetización desaparece casi completamente en corto circuito.

El valor de las pérdidas en el cobre se calculó con los valores nominales de I_1 e I_2' y hay que considerar que con la condición de: $I_{1cc} = I_{1N}$; $I_{2cc} \gg I_{2N}$ Las pérdidas en la prueba de corto circuito. serán mucho mayores.

- 2). No se conoce un método exacto para calcular las pérdidas que se producen en la superficie del rotor en la prueba de cortocircuito. Se estima que estas pérdidas son bastante grandes, porque la superficie del rotor, siendo las ranuras cerradas, permite el pleno desarrollo de este tipo de pérdidas.

CUADRO COMPARATIVO DE LOS VALORES NOMINALES DEL MOTOR .. CALCULADOS E IMPUESTOS V/s LOS OBTENIDOS EN LAS CURVAS DE LAS PRUEBAS

CUADRO V - 1

CANTIDAD	VALOR IMPUESTO	VALOR CALCULADO	VALOR MEDIDO
Deslizamiento		8,5	10,5
Torque		0,65 Kgm	0,67
Rendimiento	0,78	0,82	0,76
Factor de potencia	0,79	-----	0,81
Corriente en vacío		2,23	2,37
Resistencia por fase		$R_1 + R_2' = 9,14 \Omega$	10,27
Reactancia por fase		$x_1 + x_2' = 14,21 \Omega$	16,26
Corriente de corto circuito por fase		$I_{cc} = 12,3 \text{ A}$	Valor extra 10,8 polado
Pérdidas en vacío		85	73
Pérdidas de cobre		$71 + 103 = 174 \text{ w}$	260 w
Factor de potencia C,C,		$\text{Cos} = 0,564$	0,53

R E F E R E N C I A

- REFERENCIA 1 . Para mejor conocimiento sobre las armónicas y su influencia en el comportamiento de los motores asincrónicos, se debe consultar:
Teoría de las máquinas de corriente alterna de
Alexander S. Langsalorf
Segunda Edición. Capítulo IV.
- REFERENCIA 2. El conocimiento de los factores de distribución y de paso de bobina. Se puede obtener en:
Electric Machinery de Fitzgerald - Kinsley - Kusko
Tercera Edición. páginas 606-607-608.
- REFERENCIA 3 El libro. Cálculo Industrial de máquinas eléctricas.
Tomo II. Autor. Juan Corrales Martin da conocimientos claros sobre corriente eficaz en los anillos de la jaula rotórica de los motores asincrónicos. páginas 277 y 278.
- REFERENCIA 4. Los valores de α y k constan en la curva de la figura I - 10. Capítulo I.
- REFERENCIA 5. El dibujo de las curvas de magnetización para chapas de dínamo, está en las hojas siguientes: a esta información.
La curva utilizada para determinar H a partir de B_{co}

nocida, es la $V_{10} = 3 \text{ w/Kg}$ que es la más utilizada cuando no se conoce la curva real del material empleado como en el caso presente.

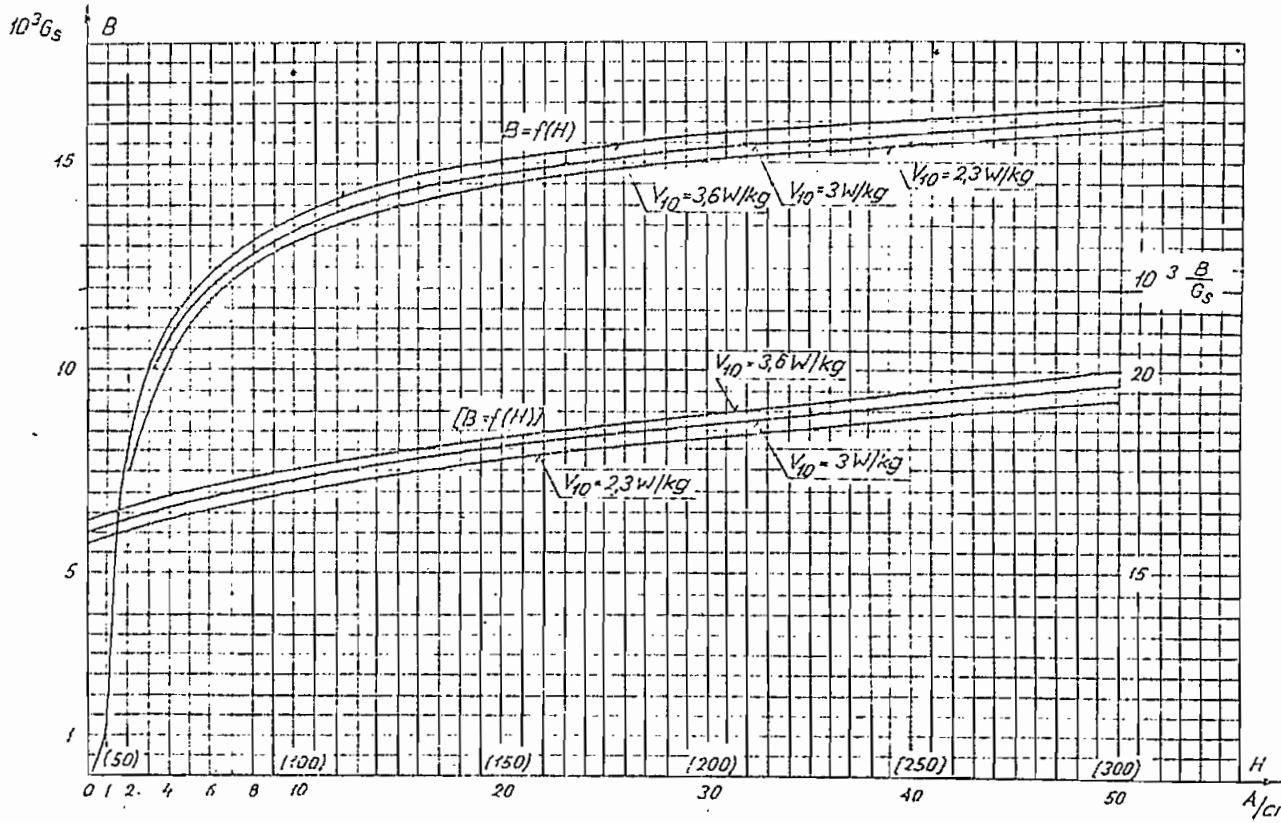
REFERENCIA 6.

A continuación del dibujo de la curva anterior está el de la curva de magnetización para coronas de estator y rotor. De la curva $V_{10} = 3 \text{ w/Kg}$ se obtuvo el Valor de H para el cálculo de la f_{mm} . en las coronas del estator y rotor.

REFERENCIA 7.

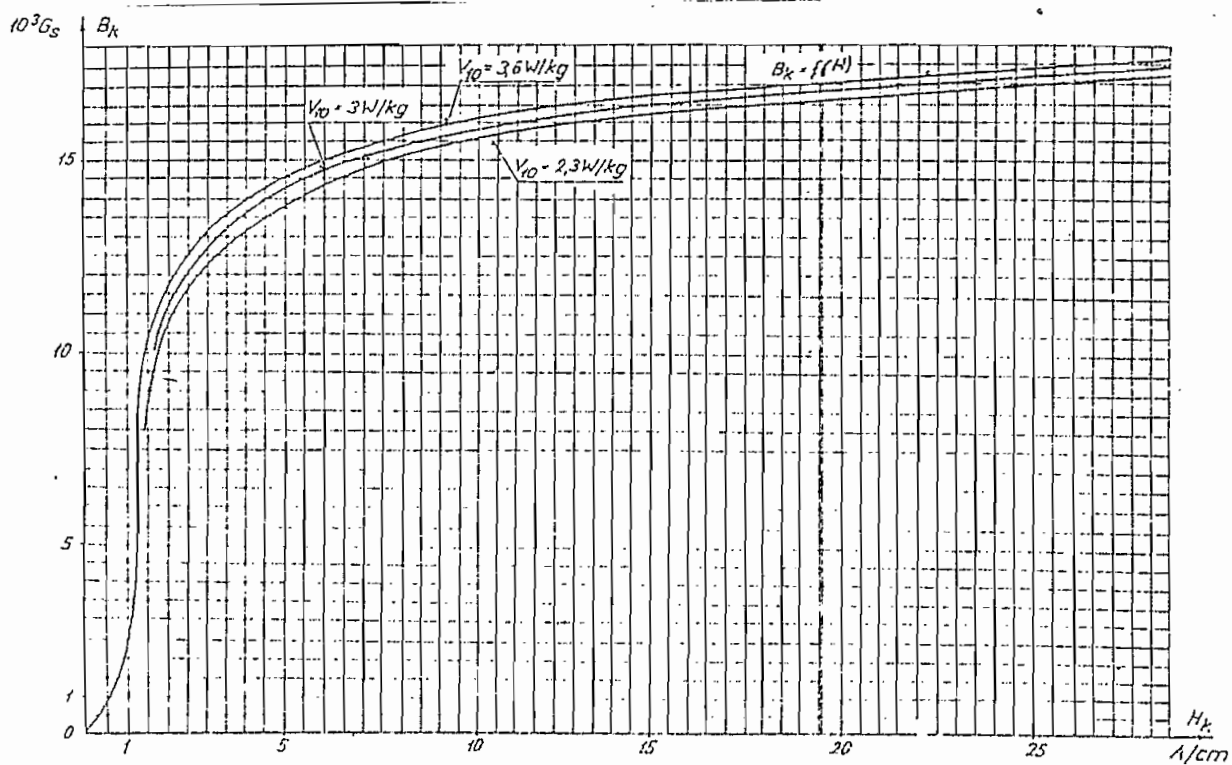
A continuación de las 2 curvas anteriores está la tabla de valores que se obtuvo el factor de amortiguamiento de la dispersión en el entrehierro, para rotores jaula de ardilla.

CURVA DE MAGNETIZACION DE CHAPAS DE DINAMO



REF - 5

CURVA DE MAGNETIZACION PARA LA CORONA
DE MAQUINAS ASINCRONICAS



REF- 6

FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO DE LA DISPERSION DEL ENTREHIERRO
 PRIMARIA SI EL ROTOR ES TIPO JAULA DE ARDILLA

q_1	ACORTAMIENTO DEL PASO EN RANURAS	FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO (Δ)					
		SIN INCLINACION			CON INCLINACION DE UN PASO		
		$q_2 - q_1$			$q_2 - q_1$		
		+ 2/3	- 1/3	- 4/3	+ 2/3	- 1/3	- 4/3
2	0	0,849	0,942	0,993	0,953	0,976	0,998
	1	0,928	0,983	0,996	0,995	0,998	1,00
	2	0,849	0,942	0,993	0,953	0,976	0,998
3	0	0,806	0,861	0,927	0,882	0,904	0,950
	1	0,899	0,934	0,960	0,947	0,956	0,976
	2	0,929	0,965	0,984	0,977	0,983	0,995
	3	0,806	0,861	0,927	0,882	0,904	0,950
4	0	0,733	0,769	0,800	0,795	0,812	0,847
	1	0,816	0,842	0,850	0,858	0,869	0,890
	2	0,938	0,960	0,953	0,971	0,975	0,983
	3	0,872	0,898	0,903	0,914	0,923	0,941
	4	0,733	0,769	0,800	0,795	0,812	0,847
5	0	0,651	0,676	0,694	0,704	0,718	0,742
	1	0,719	0,737	0,741	0,756	0,766	0,784
	2	0,871	0,887	0,880	0,900	0,905	0,914
	3	0,922	0,939	0,931	0,952	0,957	0,965
	4	0,786	0,806	0,809	0,825	0,835	0,851
	5	0,651	0,676	0,694	0,704	0,718	0,742
6	0	0,572	0,590	0,601	0,617	0,628	0,645
	1	0,623	0,637	0,641	0,657	0,666	0,679
	2	0,767	0,779	0,776	0,794	0,800	0,809
	3	0,901	0,914	0,906	0,927	0,931	0,937
	4	0,860	0,873	0,868	0,888	0,894	0,902
	5	0,693	0,708	0,711	0,729	0,737	0,751
	6	0,572	0,590	0,601	0,617	0,628	0,645
7	0	0,499	0,512	0,521	0,538	0,547	0,560
	1	0,537	0,547	0,551	0,568	0,575	0,585
	2	0,658	0,668	0,667	0,684	0,689	0,696
	3	0,820	0,829	0,825	0,843	0,847	0,853
	4	0,886	0,897	0,891	0,911	0,915	0,921
	5	0,770	0,781	0,779	0,798	0,803	0,811
	6	0,603	0,615	0,618	0,636	0,643	0,654
	7	0,499	0,512	0,521	0,538	0,547	0,560

BIBLIOGRAFIA

- 1ero. MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA Autor: Michael Liwschitz-Garik
Clyde C. Whipple
Editor: C.E.C.S.A, 5ta. Impresión
- 2do. TEORIA DE LAS MAQUINAS DE CO-
RRIENTE ALTERNA Autor: Alexander S. Langsdorf
2da. Edición,
Editor: Mc Graw - Hill.
- 3ero. ELECTRIC MACHINERY Autor : Fitzgerald - Kingsley -
Kusko.
Editor: Mc Graw - Hill, Koga Kusha
3ra. Edición.
- 4to. CALCULO INDUSTRIAL DE MAQUINAS
ELECTRICAS Tomo II, Método de Cálculo.
Autor: Juan Corrales Martin
Editor: PANAE
- 5to. VADEMECUM DEL BOBINADOR DE MA-
QUINAS ELECTRICAS Autor: Paul Arnoux
Editor: SINTES - BARCELONA
2da. Edición.