"DISEÑO DE UN GENERADOR DE C.C. DE 25 KW., 250 V.,1725 R.P.M."

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTROTECNIA DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

Francisco E. Contreras C.

Quito, Diciembre de 1960.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Quito, Diciembre de 1960

INDICE

Indice de Planos. V

Indice de Tablas. VI

Indice de Símbolos. VII

Introducción. XI

Diseño del inducido y su enrollamiento. Pág. 1

Breve deducción de las fórmulas para las dimensiones del inducido. 1

Cálculo del Diámetro. 4

Cálculo de la longitud. 4

Paso Polar. 5

Cálculo del Factor de Forma de Distribución del Campo. 5

Forma de la Zapata Polar. 6

Diagrama de la Trayectoria del Flujo en el entrehierro. 6

Diagrama de la Curva de Distribución del Flujo en el entrehierro. 7

Densidad de flujo en el entrehierro. 12

Tensión inducida en cada conductor. 12

Tensión de inducción en el Inducido. 13

Tipo de enrollamiento. 13

Número de conductores. 14

Número de ranuras. 15

Lados de bobina por ranura. 16

Número de bobinas. 16

Tensión máxima entre delgas adyacentes. 16

Pasos de la bobina. 17

Corriente nominal a plena carga. 18

Corriente del campo shunt. 18

Corriente del Inducido. Pág. 20
Area transversal del conductor del inducido. 20
Aislamiento de los conductores del inducido en las ranuras. 21
Dimensiones de la ranura. 23
Cuñas de sello de las ranuras. 24
Longitud promedio de media vuelta de las bobinas del inducido. 27
Resistencia del enrollamiento del inducido. 30
Peso del cobre del inducido. 31
Núcleo del inducido. 33

Diseño de los Polos principales y su enrollamiento. 37
Circuito Mágnético del Flujo Inductor. 37
Amper-vueltas para los dientes del inducido. 39
Amper-vueltas para el entrehierro. 43
Amper-vueltas para el yugo del inducido. 45
Amper-vueltas para el cuerpo polar. 46
Diámetro interior del yugo polar. 51
Amper-vueltas para el yugo polar. 51
Diámetro exterior del yugo polar. 52
Diseño del enrollamiento de Campo. 53
Cálculo de los Amper-vueltas por polo para neutralizar el efecto demagnetizante. 55
Diseño del enrollamiento de campo shunt. 58
Resistencia de la bobina de campo shunt. 61
Incremento de temperatura en el enrollamiento de campo shunt. 61
Diseño del enrollamiento de campo serie. 63

Area transversal del conductor de campo Serie. Pág. 64
Resistencia del enrollamiento de campo Serie. 65
Diseño del Reostato de campo Shunt. 66
Núcleo de los polos principales. 70

Diseño del colector. 75
Diámetro del colector. 75
Número del delgas. 75
Paso del colector. 75
Ancho de la zona de conmutación. 75
Ancho de la escobilla. 76
Clase de escobillas. 78
Número de escobillas por portaescobilla. 79
Longitud del colector. 79
Pérdidas en el colector. 80

Cálculo del eje. 83
Cargas. 83
Diámetro del eje. 86
Flecha máxima. 86
Cálculo de los gorrones del eje. 88
Cojinetes. 90

Diseño de los polos auxiliares. 91
Longitud del entrehierro del polo auxiliar. 91
Ancho de la zapata polar. 92
Longitud del polo auxiliar. 93

Diseño del enrollamiento del polo auxiliar. Pág. 93

Cálculo de la tensión de reactancia. 93

Amper-vueltas del polo auxiliar. 98

Amper-vueltas para el entrehierro del polo auxiliar. 99

Area transversal del conductor. 100

Resistencia del enrollamiento del polo auxiliar. 102

Peso del enrollamiento del polo auxiliar. 102

Cálculo de la Eficiencia. 102

Pérdidas en el cobre. 103

Pérdidas en el hierro. 103

Incrementos de temperatura. 107

INDICE DE PLANOS

Fig. 2	Diagrama de la Trayectoria del flujo en el entre-hierro.	Pág. 7
Fig. 3	Diagrama de Distribución del flujo en el entre-hierro.	10
Fig. 4	Diagrama del enrollamiento del inducido.	19
Fig. 5	Sección transversal de la ranura.	25
Fig. 6	Placa separadora del ducto de ventilación.	28
Fig. 7	Forma de la conexión terminal de la bobina.	29
Fig. 8	Lámina del inducido.	35
Fig. 9	Placa de presión.	38
Fig.10	Circuito Magnético del generador.	40
Fig.12	Curva de Saturación del Generador a vacío.	56
Fig.13	Polo Principal y enrollamientos.	62
Fig.14	Construcción de la Curva del Reóstato de Campo.	68
Fig.15	Curva de Resistencia del Reóstato.	69
Fig.16	Curva equivalente de Resistencia del Reóstato.	71
Fig.17	Lámina Polar.	72
Fig.18	Escobillas, Portaescobillas y yugo de escobillas.	79 A
Fig.22	Polo Auxiliar y enrollamiento.	101
Fig.23	Vista lateral y corte del generador.	102 A
Fig.24	Vista frontal y corte del generador.	102 B
Fig.25	Curva de Eficiencia del generador.	108

INDICE DE TABLAS

Tabla "A"	Número aconsejable de polos de acuerdo a la Potencia y velocidad Nominales.	Pág. 4
Tabla "B"	Espacio necesario para el aislamiento y tolerancia en enrollamientos de inducidos de C.C.	22
Tabla "C"	Amper-vueltas para los dientes del inducido a diferentes tensiones de inducción.	43
Tabla "D"	Amper-vueltas para el entrehierro a diferentes tensiones de inducción.	45
Tabla "E"	Amper-vueltas para el yugo del inducido a diferentes tensiones de inducción.	46
Tabla "F"	Altura aproximada de las bobinas de campo en función del factor de espacio del conductor y la velocidad del inducido.	48
Tabla "G"	Amper-vueltas para el cuerpo polar a diferentes tensiones de inducción.	51
Tabla "H"	Amper-vueltas para el yugo del campo a diferentes tensiones de inducción.	52
Tabla "I"	Amper-vueltas totales por polo para el circuito magnético.	53
Tabla "J"	Resistencia de los tramos del Reóstato de regulación.	70
	Lista de Materiales.	102 D
Tabla "K"	Eficiencia del Generador a distintos grados de carga.	107

INDICE DE SIMBOLOS

A_a Densidad de corriente en los conductores del inducido.

A_b Densidad de corriente en las escobillas.

A_f Densidad de corriente en los conductores del enrollamiento shunt del polo principal.

A_s Densidad de corriente en los conductores del enrollamiento serie de los polos principales.

AT_a Amper-vueltas máximos por polo de la reacción del inducido.

AT_g Amper-vueltas por polo para el entrehierro.

AT_{gi} Amper-vueltas por polo para el entrehierro del polo auxiliar o de conmutación.

AT_p Amper-vueltas por polo para el cuerpo polar.

AT_t Amper-vueltas por polo para los dientes del inducido.

AT_{ya} Amper-vueltas por polo para el yugo del inducido.

AT_{yf} Amper-vueltas por polo para el yugo de campo.

ATP_c Amper-vueltas por polo del campo magnético transversal del inducido.

a Numero de circuitos del inducido en paralelo.

B_g Densidad máxima de flujo en el entrehierro.

B_{gi} Densidad máxima de flujo en el entrehierro del polo auxiliar.

B_p Densidad de flujo en el cuerpo polar.

B_t Densidad de flujo en los dientes del inducido.

B_{t1} Densidad de flujo en los dientes en la superficie del inducido.

B_{t2} Densidad de flujo en los dientes al fondo de la ranura.

B_{t3} Densidad de flujo en los dientes a 2/3 de profundidad de la ranura (comsiderada como promedio).

b Parte recta de la prolongación de las bobinas del inducido.

b Número de delgas cubiertas por la escobilla.

b_t Ancho de la escobilla en pulg.

C_c Coeficiente de refrigeración.

C_s Número de lados de bobina por ranura.

D Diámetro exterior del inducido.

D_c Diámetro exterior del colector.

D_i Diámetro interior del inducido.

D_{yi} Diámetro interior del yugo del estator.

D_{yo} Diámetro exterior del yugo del estator.

d Espesor de la conexión terminal de las bobinas del inducido más la tolerancia.(Ver fig.7,Pág.29).

d_f Espesor de la bobina de campo shunt.

d_s Profundidad de la ranura.

d_{ya} Longitud radial doble del yugo del inducido.(Ver fig.10)

d_{yf} Longitud radial doble del yugo de campo.(Ver fig.10).

E Tensión inducida.

e_r Tensión de reactancia inducida en una bobina.

e_{sa} Tensión promedio entre delgas adyacentes.

e_{sm} Tensión máxima entre delgas adyacentes.

e_t Tensión por vuelta del enrollamiento del inducido.

f_d Factor de forma de distribución del flujo en el entrehierro

G_c Peso del núcleo del inducido.

G_{ct} Peso de los dientes del inducido.

G_{cy} Peso del yugo del inducido.

h_f Altura de la bobina de campo shunt.

K Número de delgas, número de bobinas.

L_a Longitud promedio de media vuelta de las bobinas del inducido.

l Longitud del inducido.

l_e Longitud horizontal de la conexión terminal de la bobina del inducido. (b f g, Ver fig.7, Pág.29).

l_s Longitud de la mitad de la conexión terminal del inducido

l_l Longitud axial del polo principal.

m Número de delgas por ranura. Núm. de bobinas por ranura.

n_s Número de revoluciones por segundo.

p Número de polos.

Q Amperios-conductores por pulg. de circumferencia del inducido.

r Resistencia específica del cobre. (0,826 a 75°C.)

S Número de ranuras del inducido.

S_a Superficie de radiación del inducido.

S_c Superficie de radiación del colector.

s Tolerancia entre las conexiones terminales de las bobinas del inducido.

s_{t1} Area transversal del diente en la superficie del inducido

s_{t2} Area transversal de la ranura en el fondo de la ranura.

s_{t3} Area transversal del diente a 2/3 de profundidad de la ranura.

s_{ya} Doble del área transversal del yugo del inducido.

s_{yf} Area transversal doble del yugo de campo.

t Tiempo de conmutación de una bobina.

t Número de vueltas de una bobina.

t_1 Paso entre dientes en la superficie del inducido.

t_2 Paso entre dientes mínimo.

w_b Espesor de la escobilla.

w_c Ancho de la zona de conmutación en la periferie del inducido.

w_d Ancho del ducto de ventilación.

w_s Ancho de la ranura.

w_{t1} Ancho del diente en la superficie del inducido.

w_{t2} Ancho del diente al fondo de la ranura.

w_{t3} Ancho del diente a 2/3 de profundidad de la ranura.

β Paso entre delgas en la periferie del colector.

δ Longitud del entrehierro en el centro del polo.

δ_i Longitud del entrehierro en el centro del polo auxiliar.

τ Paso polar en la periferie del inducido.

ϕ Flujo útil por polo.

ϕ_l Flujo de pérdida o de dispersión por polo.

ψ Porcentaje de abarcamiento del polo.

λ Constante de flujo de pérdida.

INTRODUCCION

El autor del presente trabajo ha escogido como Tema de su Tesis el "Diseño de un Generador de Corriente Contínua" de acuerdo a su criterio y al de algunos integrantes del Personal Docente de la "Escuela Politécnica Nacional",entre ellos el del Ing. Dimitri Kakabatze,Ex-Decano de la Facultad de Electrotecnia de este Establecimiento,respecto a la originalidad (relativa al medio) y a la variedad de los temas de Tesis.

Además,piensa el autor,que tan sólo el diseño de máquinas eléctricas logra dar un conocimento exaustivo sobre ellas,de tal modo que se pueda llegar a adquirir un concepto claro del funcionamiento global y de cada una de las partes de las referidas máquinas;conocimiento indispensable para un técnico que,dadas las circunstancias del marco en que actuará,debe dedicarse al mantenimiento.

Al entrar en materia,el autor encontró una falta casi total de literatura técnica correspondiente al tema a tratarse ya que los 2 libros existentes al respecto en Castellano carecen da abundantes tablas y datos prácticos imprescindibles para el desarollo de un tema que,como el presente,exije un método de solución badado casi por completo en experiencias.Por otro lado,dichos libros abundan en desarollos teóricos que no tienen aplicación práctica en la materia (muchos de ellos) y carecen de unidad en el estudio de los diversos asuntos relacionados con el tema.

Esto trajo el inconveniente de la falta de un método unificado de cálculo necesarísimo para quién,como el autor,no tenía experiencia ni un gran conocimiento sobre la materia.

Todo ello obligó a recurrir a libros técnicos en Inglés en donde sí se pudo encontrar un texto que presentara estas ventajas.Este libro,titulado "DESING OF ELECTRICAL APPARATUS" (Diseño de máquinas Eléctricas) de J.H. Kuhlmann,es utilizado como Texto de enseñanza en varias Universidades Norteamericanas y por su carácter era el más indicado para las necesidades del autor.

Como se verá a lo largo de este trabajo,todo el cálculo eléctrico del tema se basa en él debido al deseo de aprovechar el juego,muy completo,de Nomogramas y Tablas que posee,cuestión importantísima para la resolución de los problemas de este estudio que por su carácter debe hacerse por tanteo;y además,su método de cálculo contínuo y unificado.Pero ello presentó el inconveniente de tener que usar el Sistema Inglés de Unidades,inconveniente que no se pudo obviar ya que para ello era menester trasladar al Sistema Métrico más de na veintena de Nomogramas e innumerables fórmulas,trabajo que por su magnitud se sale del alcance de una sóla persona.Para remediar esto en algo,los valores de las dimensiones principales del generador se han transformado en unidades métricas para conocimiento complementario y con fines de comparación.

Con el objeto de que este trabajo pueda servir,aunque infimamente,en el estudio de los alumnos de la Escuela Politécnica (si es que ellos alguna vez lo hojean) se ha dividido el desarollo de la parte eléctrica del diseño en dos.En la primera parte se dan deducciones (a grandes rasgos por no permitirlo más la extensión de este estudio) de las fórmulas a intervenir,los criterios generales que se deben tomar en cuenta y los límites prácticos de variación de las magnitudes,pertinentes al asunto a tratarse.La segunda,está constituída por

los cálculos de diseño del caso específico.El método de cálculo es, como se explicó anteriormente,el de tanteo;es decir a partir de asumir valores iniciales.Para el escojimiento de estos valores se necesita un criterio sólido,basado en la experiencia y el dominio del tema,o disponer de elementos de juicio elaborados por expertos.De ahí la necesidad de disponer de un juego completo de tablas y nomogramas y un método unificado de cálculo,tales como los suministrados por el libro "Desing of Electrical Apparatus" muchas veces nombrado a lo largo de este trabajo.

Como el Sr.Profesor Director de Tesis de este trabajo creyera conveniente que se complete el estudio con la parte mecánica del mismo;se realizó ésta utilizando textos en español (que estaban al alcance del autor),ya que la antes anotada obra de J.H. Kuhlmann sólo cubre la parte eléctrica de la materia.Esto trajo nuevamente el inconveniente de las unidades,pero en todo caso los resultados se han trasladado al Sistema Inglés para dar uniformidad al trabajo a este respecto.En el desarollo de la parte mecánica del diseño no se ha procedido con el detenimiento que en la parte eléctrica por considerarse que las fuentes de consulta de ella están al alcance de los eventuales lectores de este trabajo,lo que no es el caso de la parte eléctrica.

Por ser la cantidad de símbolos empleados en este trabajo algo grande se ha dado en las páginas anteriores un índice de los más importantes de ellos con el fin de ayudar a quién lea este trabajo.

Para finalizar,el autor presenta su agradecimiento al Sr.Profesor Director de Tesis por la ayuda brindada.

Francisco Contreras C.

DISEÑO DEL INDUCIDO Y SU ENROLLAMIENTO.-

BREVE DEDUCCION DE LAS FORMULAS PARA LAS DIMENSIONES DEL INDUCIDO.-

La ecuación que da la tensión de inducción en un inducido de una dínamo es:

$$E = \frac{\phi \cdot p \cdot N \cdot n}{a \cdot 60 \cdot 10^8} \text{ volt.}$$

ϕ = Flujo útil por polo.
p = Núm. de polos.
N = Num. de conductores del inducido.
n = Veloc. angular del inducido en RPM
a = Núm. de circuitos del inducido en paralelo.

La imposibilidad de conocer la forma del campo bajo el polo, ya que ésta es una consecuencia del diseño, obliga a introducir un flujo hipotético correspomdiente a un valor constante de la inducción en toda la periferie del inducido que, teoricamente, se considera bajo la acción del polo y que se llama paso polar. El paso polar es:

$\tau = \pi \cdot D / p$ D = Diámetro exterior del inducido.

La relación por cociente del flujo útil al flujo hipotético es el llamado "Factor de distribución de forma del campo" f_d.

$f_d = \phi \cdot p / \phi_t$ ϕ_t = Flujo total hipotético.

Por otro lado, la fórmula que da la potencia en los enrollamientos de un inducido de C.C. es:

$Kw_a = E \cdot I_a \cdot 10^{-3}$ I_a = Corriente en los conductores del inducido.

Reemplazando el valor de E y tomando en cuenta que $\phi \cdot p = \phi_t \cdot f_d$:

$$Kw_a = \frac{\phi_t \cdot N \cdot n \cdot f_d \cdot I_a}{a \cdot 60 \cdot 10^{11}}$$

El flujo que penetra por la superficie periférica del inducido es:

$\phi_t = \pi \cdot D \cdot l \cdot B_g$ l = Longitud del inducido.

Por conveniencia se considera una nueva magnitud que es "Los Amperios conductores por pulgada de circunferencia del inducido", Q. Los cuales valen, por definición:

B_g = Dens. Máx. de flujo en el entrehierro considerada const.

$$Q = \frac{N \cdot I_a}{a \cdot \pi \cdot D} \qquad \text{de donde:} \qquad \frac{N \cdot I_a}{a} = \pi \cdot D \cdot Q$$

Reemplazando este valor en la última expresión de la potencia se obtiene:

$$Kw_a = \frac{n \cdot D^2 \cdot l \cdot f_d \cdot Q \cdot B_g \cdot \pi^2}{60 \cdot 10^{11}} \qquad \text{ó} \qquad \frac{D^2 \cdot l \cdot n}{Kw_a} = \frac{60 \cdot 10^{11}}{f_d \cdot Q \cdot B_g \cdot \pi^2}$$

La potencia máxima que puede suministrar un inducido de C.C. está subordinada y limitada por varios factores. Estos son: la eficiencia, el calentamiento, la conmutación y el factor económico. Ellos hacen que, para un inducido de longitud y diámetro determinados, se deban tomar en cuenta ciertos valores promedios que la experiencia da como convenientes para f_d, Q y B_g. En tal virtud se puede considerar el miembro derecho de la última igualdad como constante para una potencia y velocidad dadas

$$\frac{D^2 \cdot l \cdot n}{Kw_a} = C \qquad \text{ó} \qquad D^2 \cdot l = \frac{Kw_a}{n} C \qquad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Los valores prácticos y convenientes de C, que da la experiencia, los ha recolectado J.H. Kuhlmann en la fig. 22, pág. 18 de su libro "Design of Electrical Apparatus". Dicha fig. es un nomograma de C en función de Kw_a/n para máquinas de C.C. con polos auxiliares.

Como se desprende de la fórmula precedente hay que asumir un valor para D ó para l y luego calcular el otro.

Los siguientes razonamientos fijan los límites adecuados para estos valores. Si D es grande, la velocidad periférica es alta, lo cual se traduce en un costo inconveniente de la máquina. En cambio, si l es grande se hace difícil proveer una ventilación adecuada al inducido.

Para máquinas de una potencia como la del generador en diseño, recomienda la experiencia no pasar de una velocidad periférica de de 6.000 pies/min. con lo cual se han obtenido en la práctica relaciones de la longitud del inducido a la luz o paso polar de o,5 a 1.

$$l/\tau = o,5 \text{ a } 1 \qquad \text{como} \qquad \tau = \pi \cdot D/p$$

$$l = \frac{\pi \cdot D}{p} (0,5 \text{ a } 1)$$

Sustityendo este valor en la expresión (1) y despejando D se obtiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{Kw_a \cdot C \cdot p}{n(1,5 \text{ a } 3,14)}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

La fórmula para l se deduce de (1) y es:

$$l = C \cdot \frac{Kw_a}{n \cdot D^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

El número de polos debe ser escogido de tal manera que se obtengan buenas características de operación con el mínimo precio de material activo y al mínimo costo. Para ello hay que tomar en cuenta que las pérdidas en el hierro del inducido son directamente proporcionales a la frecuencia de inversión del flujo en el núcleo de éste.

La frecuencia de inversión del flujo es:

$$f = \frac{p \cdot n}{2 \cdot 60} \text{ ciclos/seg.} \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

Es decir, la frecuencia es directamente proporcional al número de polos. Los valores usuales de frecuencia para máquinas de C.C. están entre 15 y 60 cs./seg. Por otro lado con un pequeño número de polos el paso polar (τ) es grande; además, aumenta la longitud del cobre del inducido y, por lo mismo, las pérdidas debidas a éste.

La tabla "A" da los valores más convenientes para p en función de la potencia y de la velocidad en R.P.M.

Tabla "A"

POTENCIA NOMINAL (KW)	VELOCIDAD (RPM.)	NUM. DE POLOS
Arriva de 2	Sobre 1300	2
2 a 100	" 1300	4
50 a 300	" 1000	4 ó 6
200 a 600	" 600	6 a 10
600 a 1000	" 500	8 a 12

Tomada del Desing of Electrical Apparatus, p 22

Cálculo del diámetro.-

$10^3 \cdot Kw_a/n = 10^3 \cdot 25/1725 = 14,5$; con este valor se averigua C en el nomograma antes indicado : $C = 3,75 \cdot 10^4$. El número de polos más conveniente se toma de la Tabla A. Para 25 Kw y 1725 RPM.: $p = 4$. Reemplazando estos valores en la fórmula (2) se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{Kw_a \cdot C \cdot p}{n(1,5 \text{ a } 3,14)}} = \sqrt[3]{\frac{25 \cdot 3,75 \cdot 10^4 \cdot 4}{1725(1,5 \text{ a } 3,14)}} = 13,2 \text{ a } 8,3 \text{ pulg.}$$

Se escoje: D = 12 pulg. = 300,4 mm.

Cálculo de la longitud.-

$$l = C \cdot \frac{Kw_a}{n \cdot D^2} = 3,75 \cdot 10^4 \frac{25}{1725 \cdot 12^2} = 3,78 \text{ pulg.}$$

Se usará $l = 4$ pulg. = 157,5 mm.

Con el fin de calcular a manera de comprobación, si el inducido de estas dimensiones, está dentro de las limitaciones impuestas por la velocidad periférica y de la frecuencia, se averiguan éstas: la velocidad periférica está dada por la formula: $v = \pi \cdot D \cdot n/12$ pies/min.; en el caso presente: $v = 3,14 \cdot 12 \cdot 1725/12 = 5420$ pies/min. Valor que, que por estar bajo el límite de 6000 pies/min., es completamente aceptable.

La frecuencia de inversión del flujo se puede calcular con:

$$f = p \cdot n/120 = 4 \cdot 1725/120 = 57,5 \text{ c/seg.}$$

Valor que también está dentro del límite permisible.

LUZ O PASO POLAR.-

El tramo de periferie del inducido que, teoricamente, se considera está bajo la influencia de un polo es el Paso Polar y vale:

$$\tau = \pi \cdot D/p = 3,14 \cdot 12/4 = 9,43 \text{ pulg.} = 249 \text{ mm.}$$

CALCULO DEL FACTOR DE FORMA DE DISTRIBUCION DEL CAMPO.-

Para el cálculo de f_d hace falta conocer la longitud del entrehierro. Como quiera que el valor exacto para éste será determinado después, f_d deberá ser calculado en base a un valor sólo aproximado.

La longitud del entrehierro está en función del diámetro del inducido, a fin de permitir su libre movimiento. Un factor que da el límite contrario es el hecho que los ampervueltas requeridos para enviar a través del entrehierro una cierta cantidad de flujo crecen con la longitud de éste.

Los valores aconsejados por la práctica para la longitud del entrehierro que pueden ser utilizados en un diseño preliminar los da el nomograma de la fig. 25, pág. 24 del libro "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann y en función del diámetro del inducido.

En el caso presente $D = 12$ pulg., el entrehierro es $\delta = 0,15$ pulg

El factor f_d depende directamente de la forma del flujo en el entrehierro la cual, a su vez, depende de la forma de la zapata polar. La forma del flujo en el entrehierro debe ser tal que se obtenga la mejor conmutación posible, para ello la densidad del flujo debe disminuir gradualmente desde su máximo valor, en el centro del polo, hasta un valor muy bajo en la linea divisoria entre dos polos contiguos. Por consiguiente, la forma de la zapata polar debe escogerse de acuerdo a estas consideraciones.

Forma de la Zapata Polar.-

La experiencia ha puesto de manifiesto que la forma más conveniente para la Zapata polar es la mostrada en la fig.1.Dicho gráfico muestra sólo la mitad de la zapata polar debido a su simetría a ambos lados del eje del polo El arco Polar es la parte de la circumferencia del inducido cubierta efectivamente por la zapata polar.

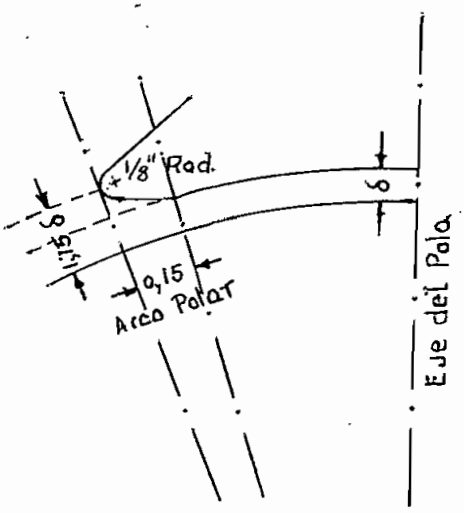


FIG 1

La relación por cociente del arco polar al paso polares el llamado porcentaje de abarcamiento del polo, Ψ.Los valores entre los cuales fluctúa Ψ para máquinas de C.C.son 60 y 75%,a fin de evitar um exeesivo flujo de pérdida por um lado y una alta densidad de flujo por otro.

Para máquinas con polos auxiliares el valor Ψ = 66% se ha encontrado muy satisfactorio.Adoptándo este valor se tiene en el caso de la dinamo em diseño:

Arco Polar = $\tau \cdot \Psi$ = 9,43·0,66 = 5,23 pulg. O em grados,ya que:

τ = 360°/4 = 90° Arco Polar = 0,66·90° = 59,4°

0,15 Arco Polar = 0,15·59,4° = 8,9°

1,75 δ = 1,75·0,15 = 0,26 pulg. = 6,6 mm.

El plano que muestra el detalle de la zapata polar para el generador em diseño lo da la fig. 2,pág. 7 de este trabajo.

Diagrama de la Trayectoria del Flujo em el entrehierro.-

Para trazar la trayectoria del flujo en el entrehierro se aprovecha la representación de campos electromagnéticos por medio de tubos de fuerza y superfivies de nivel.

El flujo que se mueve por un tubo de fuerza de un campo magnéti-

co creado por una bobina vale: $\phi = I \cdot n \cdot F \cdot \pi / l$;siendo π la conductibilidad magnética, F la sección transversal promedio del tubo de fuerza,I la corriente a través de la bobina,l la longitud del tubo de fuerza,n el núm. de vueltas de la bobina.

Si se divide el tubo de fuerza en varios tramos por medio de superficies de nivel,en cada uno de ellos,el cociente F/l será constante;y si se considera que la sección transversal F de un tubo de fuerza tiene el lado perpendicular al plano de la fig. igual a la unidad,en cada tramo del tubo de fuerza el cociente del ancho promedio para la longitud será constante.Lehmann (ver Bibliografía) se vale de esta proporcionalidad en su método;el cual consiste en rellenar el campo a voluntad con líneas de nivel,teniendo presente que las líneas límites del inducido y la zapata polar ya lo son.Después se dibujan las líneas de fuerza,normales a las líneas de nivel.Si la representación gráfica es correcta,en cualquier región del campo se verificará la proporcionalidad antes anotada.

El Diagrama de la trayectoria del flujo en el entrehierro, para el generador en diseño,lo da la fig. 2,pág. 7 de este trabajo. Debido a que para la elaboración de la curva de Distribución del flujo en el entrehierro es conveniente que todos los tubos de fuerza tengan una superficie igual sobre la periferie del inducido,se ha dividido el campo magnético en un número de tubos de fuerza que cumplan esta condición.Para simplificar el diagrama,el tubo de fuerza se ha representado por la línea de fuerza correspondiente a su altura media.

Diagrama de la curva de Distribución del flujo en el entrehierro.-

Cada uno de los tubos de fuerza en que se ha dividido el campo magnético en el entrehierro,tiene una longitud δ_x,un ancho medio b_x y un espesor de 1.Luego su permeancia es proporcional a b_x / δ_x.

El tubo de fuerza bajo el centro del polo tiene una longitud δ y un ancho b que es constante a todo lo largo de él, inclusive sobre la superficie del inducido. Su permeancia es proporcional a b/δ.

Las inducciones de los tubos considerados serán, en cambio, proporcionales a:

$$B_x :: \frac{b_x}{a \cdot \delta_x} \qquad y \qquad B_g :: 1/\delta \qquad \text{respectivamente.}$$

Siendo a el ancho de la superficie del tubo de fuerza sobre la periferie del inducido, y ya que en el centro del polo a = b.

Como la misma fuerza magnetomotriz actúa através de todos los tubos de fuerza, se puede escribir:

$$\frac{B_x}{B_g} = \frac{\frac{b_x}{a \cdot \delta_x}}{1/\delta} \qquad \delta \qquad B_x = \frac{b_x \cdot \delta}{a \cdot \delta_x} B_g$$

Atribuyendo a B_g, la densidad máxima del flujo en el entrehierro, el valor 100; y haciendo $a = 2\delta$ se logra convertir la última ecuación en:

$$B_x = \frac{b_x}{2\delta_x} \cdot 100 \qquad \text{,,,,.....} \qquad (4)$$

Si se calcula la inducción B_x para cada tubo de fuerza y se construye una curva de estos valores en función de su distancia al eje del polo se obtiene el Diagrama de distribución del flujo en el entrehierro. Para la dínamo en diseño dicho Diagrama lo constituye la fig. 3, pág. 10 de este trabajo.

Los valores del vector inducción obtenidos según la fórmula (4) son:

$B_2 = 100$	$B_{12} = 100$	$B_{22} = 55$	$B_{32} = 3,85$
$B_4 = 100$	$B_{14} = 100$	$B_{24} = 26,5$	$B_{34} = 3,15$
$B_6 = 100$	$B_{16} = 100$	$B_{26} = 13,8$	
$B_8 = 100$	$B_{18} = 96$	$B_{28} = 7,75$	
$B_{10} = 100$	$B_{20} = 80,4$	$B_{30} = 4,95$	

DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DEL FLUJO EN EL ENTREHIERRO
GENERADOR DE C.C. 25 KW. 250 V. 1725 R.P.M.

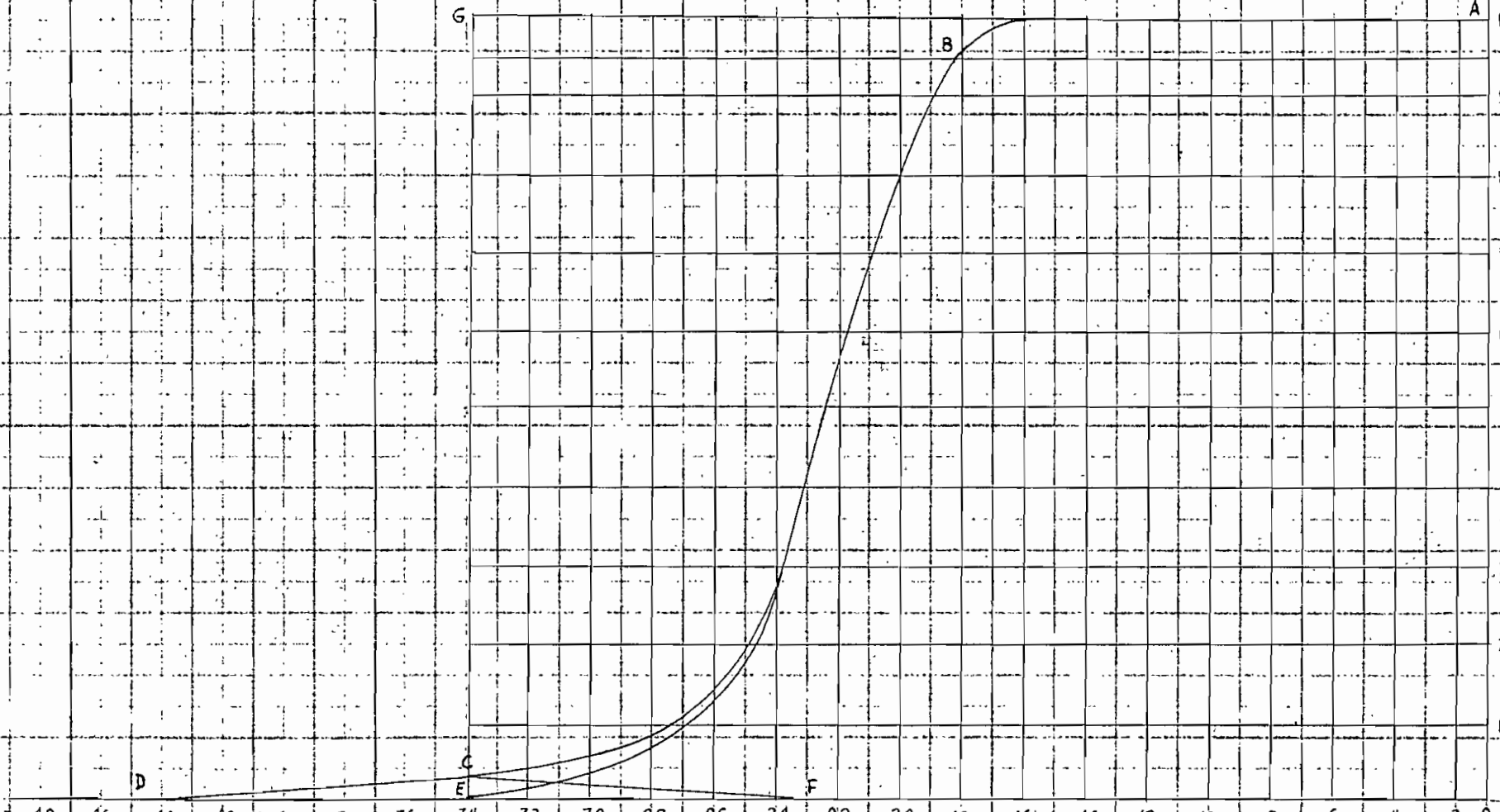


Fig 3
Pag 10

La curva obtenida con estos valores es la A,B,C;examinándola se desprende que el influjo del polo va más alla de la luz del polo y que penetra en la del siguiente en un tramo(que se obtiene al prolongar la curva A,B,C) C,D. De ello se deduce que el polo contiguo influirá en la zona del polo en estudio en un tramo igual,él que en la fig. se ha representado por C,F.Finalmente,restando en cada punto las inducciones respectivas se obtiene la curva (A,B,E) real de distribución del flujo en el entrehierro.

La superficie encerrada por la curva A,B,E,representa el flujo útil por polo,ya que es el producto de la inducción por la longitud de periferie del inducido y por un espesor (perpendicular al plano de la fig.) unidad,según se estableció al dibujar el campo magnético en el entrehierro por medio de tubos de fuerza.

En cambio,el flujo hipotético por polo estaría representado por una superficie rectangular,tal como la A,G,E,O,habida cuenta de que se supone corresponde a una inducción constante en todo el paso polar e igual a la densidad máxima del flujo en el entrehierro.

El factor de forma de distribución del campo

$$f_d = \frac{\phi \cdot p}{\phi_t} = \frac{\phi}{\frac{\phi_t}{p}}$$

se puede calcular como la relación por cociente del área A,B,E,O al área A,G,E,O;y más aún,considerando que ambas áreas tienen la misma base ($\tau/2$), como el cociente de la ordenada promedio ($B_{prom.}$) a la ordenada máxima (B_g)
Los valores de las ordenadas de la curva A,B,E son:

$B_2 = 100$	$B_{10} = 100$	$B_{18} = 96$	$B_{26} = 12,5$	$B_{34} = 0$
$B_4 = 100$	$B_{12} = 100$	$B_{20} = 80,4$	$B_{28} = 6,25$	Total 1080
$B_6 = 100$	$B_{14} = 100$	$B_{22} = 55$	$B_{30} = 3,1$	
$B_8 = 100$	$B_{16} = 100$	$B_{24} = 25,5$	$B_{32} = 1,25$	

La ordenada promedio es: $B_{prom.} = 1080/16 = 67,5$ y:

$$f_d = \frac{B_{prom.}}{B_{máx.}} = \frac{67,5}{100} = 0,675$$

DENSIDAD DEL FLUJO EN EL ENTREHIERRO B_g.-

La densidad máxima del flujo en el entrehierro, B_g, está limitada por la densidad máxima permisible en los dientes del inducido, B_{t_2}, y que, para ranuras con paredes paralelas está en la raíz del diente. B_{t_2} depende, por otro lado, de los valores permisibles para la inducción que da la curva de saturación del material que se construyan los dientes.

La fuerza magnetomotriz requerida para enviar el flujo a través de los dientes será grande para altas densidades en ellos, lo cual exige una gran cantidad de cobre en el enrollamiento de campo. También las pérdidas en el hierro serán grandes para altas densidades en los dientes.

Tomando en cuenta estas consideraciones, es aconsejable que el valor de la densidad máxima de flujo en los dientes no pase, para los materiales normales de que se construyen ellos, de 150.000 líneas/pulg^2.

Los valores para B_g que han resultado prácticamente satisfactorios los recolecta el nomograma de la fig. 20, pág. 16, de la obra de J.H. Kuhlmann ya enunciada. En el cual se hallan en función de Kw/n.
Para Kw/n = 14,5 el nomograma indicado da: B_g = 43 Kilolíneas/pulg^2.
Este valor se utilizará en el diseño preliminar, el definitivo se fijará después.

Flujo total hipotético.-

El flujo total hipotético se puede calcular con la ecuación de definición: $\phi_t = B_g \cdot \pi \cdot D \cdot l$
En el caso presente: $\phi_t = 3,14 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 43 = 6.480$ Kilolíneas.

TENSION INDUCIDA EN CADA CONDUCTOR.-

La tensión inducida en cada conductor se puede calcular por medio de la igualdad siguiente:

$$e_i = \frac{\phi_t \cdot n \cdot f_d}{60 \cdot 10^8}$$ Reemplazando valores:

$$e_i = \frac{6480 \cdot 10^2 \cdot 1725 \cdot 0,675}{60 \cdot 10^8} = 1,26 \text{ volt.}$$

Tensión de inducción en el inducido.-

La tensión nominal de una máquina es aquella que se tiene disponible en sus bornes.Por lo tanto la tensión inducida en un generador debe ser igual a la tensión nominal más la caída de tensión que se produce en el enrollamiento del inducido,contacto de las escobillas,el enrollamiento de campo serie y el enrollamiento de los polos auxiliares.

Esta caída de tensión depende de cada una de estas partes y de la corriente del inducido.Como es lógico,por todavía no estar diseñadas dichas partes se ignora el valor de sus resistencias.Debido a ello hay que recurrir a valores porcentuales dados por la experiencia.

Para fines de diseño,estos valores han sido compilados en el nomograma de la fig. 48,pág. 55 del libro "Desing of Electrical Apparatus" en función de n·Kw.

Para el generador en diseño: $n \cdot Kw = 1725 \cdot 25 = 4,31 \cdot 10^4$ y el valor correspondiente de la caída de tensión es: 5,2% de la tensión nominal.La tensión de inducción deberá ser:

$$E = 250 + 250 \cdot 0,052 = 263 \text{ volt.}$$

TIPO DE ENROLLAMIENTO.-

Al escoger el tipo de enrollamiento para un inducido se deben tomar en cuenta varias consideraciones,las cuales se resumen en las siguientes líneas.

El enrollamiento ondulado se prefiere usar,generalmente,en máquinas de pequeña y mediana capacidad con altas tensiones y bajas RPM.

Los enrollamientos ondulados multiplex se usan para máquinas

grandes con gran número de polos,mientras que enrollamientos imbricados del tipo multiplex solamente se usan para máquinas muy grandes y para muy altas velocidades.Debido a las limitaciones impuestas por las conexiones equilibradoras de potencial entre las delgas del mismo potencial,los enrollamientos multiplex se usan en los casos especiales que son necesarios.El enrollamiento imbricado del tipo simplex se usa para máquinas de pequña y mediana capacidad,bajos voltajes y velocidades medianamente altas.Otro factor que hay que considerar al escojer el tipo de enrollamiento es el hecho de que este debe ser tal que impida una tensión entre delgas adyacentes capaz de producir la formación de chispas entre ellas.Según B.G. Lamme (ver Bibliografía) la tensión máxima entre delgas adyacentes no debe exceder de 35 volt.

La dínamo en estudio es de pequeña capacidad (25 Kw),bajo voltaje (250 volt.) y velocidad relativamente alta (1725 RPM.);se escoje el enrollamiento imbricado simplex como el más conveniente.

Número de conductores.-

El número de conductores está dado por la siguiente fórmula: $N = E \cdot a/e_1$;el número de circuitos del inducido en paralelo (a) es igual al número de polos para el enrollamiento imbricado simplex,$a = 4$ Reemplazando los valores pertinentes en la fórmula anterior:

$$N = 263 \cdot 4/1,26 = 835 \text{ conductores.}$$

Paso entre dientes.-

Se llama así a la longitud entre el filo de un diente y el filo correspondiente del siguiente en la superficie del inducido.
El valor del paso entre dientes es: $t_1 = \pi \cdot D/S$ en donde S es el número de ranuras del inducido.
El paso entre dientes sirve de guía para escojer el num. de ranuras del

inducido.Es decir que se a tribuye un valor para t_1 y con él se calcula S.Valores pequeños de t_1 demandan valores pequeños para el ancho del diente.Esto puede conducir a dificultades en la construcción y en el enfriamiento del inducido.

Para máquinas con polos auxiliares,la luz entre dientes,está comprendida entre 0,7 y 1,3 pulg.

Número de ranuras.-

El número de ranuras está dado por: $S = \pi \cdot D/t_1$;donde t_1 vale de 0,7 a 1,3 pulg.

$$S = \frac{3,14 \cdot 12}{0,7 \text{ a } 1,3} = 54 \text{ a } 29 \text{ ranuras.}$$

S debe ser tal que el número de ranuras por polo sea un entero más un medio con el fin de lograr una reluctancia del circuito magnético por par de polos casi invariable enttodas las posiciones del inducido,según lo indica J.H.Kuhlmann en la pág. 46 de su obra (ver Bibliografía).

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se escoge: S = 38,con lo que se obtiene 9,5 ranuras por polo.Con ello,la luz o paso entre dientes definitivo es: $t_1 = 3,14 \cdot 12/38 = 0,992$ pulg.= 25,5 mm.

Número de conductores por ranura.-

Es: $N/S = 835/38 = 22,2$ conductores/ranura

Se toma $N/S = 24$ con el fin de tener un número de conductores por ranura facilmente divisible en varias bobinas.Con lo que el número defitivo de conductores del inducido es: $N = 24 \cdot 38 = 912$ conductores.

Ahora se puede calcular el flujo total hipotético y la inducción máxima en el entrehierro, definitivos.

$$\phi_t = \frac{E \cdot a \cdot 60 \cdot 10^8}{N \cdot n \cdot f_d} = \frac{263 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 10^8}{912 \cdot 1725 \cdot 0,667}$$

$$\phi_t = 6100 \text{ Kilolíneas.}$$

y:
$$B_g = \frac{\phi_t}{\pi \cdot D \cdot l} = \frac{6100}{3{,}14 \cdot 12 \cdot 4} = 40{,}5 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

Lados de bobina por ranura.-

En cada ranura se tienen que poner 24 conductores, los cuales pueden ser parte de una o de varias bobinas. El número de bobinas y, por lo mismo, el número de delgas (el número de bobinas es igual al número de delgas) debe escogerse de tal forma que la tensión máxima entre delgas adyacentes no pase de un valor permisible a fin de evitar la formación de arcos entre ellas.

En el caso presente se distribuyen los 24 conductores en 4 lados de bobina por ranura, teniendo cada bobina 6 vueltas.

$C_s = 4$ lados de bobina/ranura; $t_a = 6$ vueltas/bobina.

Número de bobinas.-

El número de bobinas, y por lo tanto, el número de delgas es:

$$K = \frac{912 \text{ conductores}}{2 \cdot \frac{\text{conductores}}{\text{vuelta}} \times 6 \frac{\text{vueltas}}{\text{bobina}}} = 76 \text{ bobinas}$$

Tensión máxima entre delgas adyacentes.-

Con el fin de comprobar si los conductores están repartidos en bobinas de una manera conveniente es necesario verificar si la tensión máxima entre delgas está bajo los límites permisibles.

El número de delgas en serie es igual al número total de delgas dividido para el número de circuitos en paralelo, es decir: K/a. Por otro lado, entre la primera y la última de estas delgas en serie se tendrá una diferencia de tensión igual al voltaje total inducido E.

Tomando en consideración que para enrollamientos imbricados simplex, a = p; la tensión entre delgas adyacentes es:

$$e_{sa} = \frac{E}{\frac{K}{p}} = \frac{E \cdot p}{K} = \frac{263 \cdot 4}{76} = 13,82 \text{ volt.}$$

Al calcular el factor de distribución del campo se vió que éste era igual a: $f_d = B_{prom.}/B_{máx.}$ luego: $B_{máx.} = B_{prom.}/f_d$
Como el flujo está en proporción directa y lineal con la inducción y, a su vez, la tensión inducida es función directa y lineal del flujo, se puede deducir que: $E_{máx.} = E_{prom.}/f_d$ .Para el caso del voltaje máximo entre delgas se tiene:

$$e_{sm} = \frac{e_{sa}}{f_d} = \frac{E \cdot p}{K \cdot f_d}$$

El hecho de que el flujo del campo aumenta en algunas partes por acción del flujo del inducido, produce un incremento del 30% en la densidad máxima de flujo en el entrehierro a plena carga. Esto obliga a introducir un factor 1,3 en la fórmula anterior. Por lo tanto:

$$e_{sm} = \frac{E \cdot p}{K \cdot f_d} \times 1,3 = 13,82 \times \frac{1,3}{0,675} = 26,7 \text{ volt.}$$

Valor perfectamente admisible por estar bajo el límite de 35 volt.

Paso de la bobina.-

El paso, o el número de ranuras de intervalo, de la bobina para devanados imbricados simplex lo da la fórmula:

$$Y_s = S/p = 38/4 = 9,5$$

Como Y_s debe ser entero escogemos $Y_s = 9$, es decir que los lados de la 1ª bobina se pondrán en las ranuras 1 y 10.

Paso posterior de la bobina.-

El intervalo entre los dos lados de una bobina unidas por la conexión terminal del lado posterior del inducido (el lado opuesto al colector) expresado en lados de bobina de separación es el llamado "paso posterior de la bobina". Para devanados del tipo imbricado simplex es igual a: Y_1

$Y_1 = C_s \cdot Y_s + 1$; donde C_s = Lados de bobina por ranura.

$Y_1 = 4$ lados de bobina/ranura x 9 ranuras+1

$Y_1 = 37$ lados de bobina.

Paso anterior de la bobina.-

Se llama así al intervalo entre los dos lados de bobina conectados en el frente del inducido y expresado en el número de lados de bobina de separación. Para devanados imbricados simplex el paso anterior de la bobina está dado por: $Y_2 = Y_1 - 2Y_c$; Y_c = Paso del colector. Como $Y_c = 1$ para devanados imbricados del tipo simplex, se tiene:

$Y_2 = 37 - 2 = 35$ lados de bobina.

Tensión máxima por vuelta.-

Para devanados imbricados simplex la tensión máxima por vuelta es igual a la tensión máxima entre los terminales de la bobina dividido para el número de vueltas por bobina; como la tensión máxima entre terminales de la bobina es igual a la tensión máxima entre delgas, se tiene: $e_t = e_{sm}/t_a = 27,3/6 = 4,55$ volt.

Corriente nominal a plena carga.-

Se calcula mediante la fórmula:

$$I_n = \frac{Kw \cdot 10^3}{E_{nom.}} = \frac{25 \cdot 10^3}{250} = 100 \text{ amp.}$$

Corriente del campo shunt.-

Debido a que aún no se ha diseñado el campo shunt se desconoce el valor de la corriente que pasa por él; más, ya que es necesario su valor para calcular la corriente del inducido (I_a), se tiene que recurrir a valores que enseña la experiencia.

El nomograma de la fig. 48, pag. 55 del "Desing of Electrical Apparatus" también da los valores de i_f en porcentaje de la corriente nominal de plena carga para una potencia y velocidad angular dadas.

Para el generador en diseño: $n \cdot Kw = 1725 \cdot 25 = 4{,}32 \cdot 10^4$

el % para i_f que da el nomograma es 1,6%. $i_f = 0{,}016 \cdot 100 = 1{,}6$ amp.

Se escoge 2 amp. para tener un margen de seguridad adicional.

Corriente del inducido.-

Es: $I_a = I_n + i_f = 100 + 2 = 102$ amp.

Amperios-conductores por pulg. de periferie del inducido.-

Son, por definición: $Q = I_a \cdot N/\pi \cdot D \cdot a = 102x912/\pi x12x4 = 617$ amp-cond/pulg

Densidad de corriente en los conductores del inducido.-

La densidad de corriente del cobre del inducido (A) está limitada por el incremento prmisible de temperatura en el enrollamiento del inducido y por la eficiencia de la máquina. la densidad de corriente, por otro lado, conviene que sea lo más alta posible ya que ello produce un ahorro en el cobre y permite el uso de ranuras poco profundas, hecho que ayuda en la construcción. Para máquinas que como el generador a diseñarse son del tipo abierto y sin ventilación forzada, se pueden determinar valores de A, útiles para un prediseño, con ayuda del nomograma de la fig. 49, pág. 56 del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann. Dicho nomograma da valores para $A_a \cdot Q$ (Densidad de corriente en los conductores del inducido por amp-cond./pulg.) en función de la velocidad periférica del inducido y del diámetro de él. En el caso presente, para: $v = 5420$ pies/min. y $D = 12$ pulg da el nomograma: $A_a \cdot Q = 21{,}5 \cdot 10^5$. Como $Q = 617$ amp-cond./pulg.

$$A_a = 21{,}5 \cdot 10^5 / 617 = 3483 \text{ amp./pulg}^2.$$

Area transversal del conductor del inducido.-

La corriente del inducido I_a se divide en los a circuitos en paralelo. Luego la corriente que pasa por unconductor del inducido es: I_a/a , y la sección del mismo:

$$S_a = \frac{I_a}{A_a \cdot a} = \frac{102}{3483.4} = 0{,}00732 \text{ pulg}^2.$$

Se usará alambre redondo de cobre, calibre #10 de 0,00817 pulg^2. de sección.

AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES DEL INDUCIDO EN LAS RANURAS.-

En el diseño de un generador de C.C. debe proveerse aislamiento entre los conductores que forman la bobina, entre bobinas contiguas y entre las bobinas y el hierro de las ranuras. El espesor del aislante depende directamente de la tensión entre los elementos considerados y de la calidad del aislante. El aislamiento de los conductores que forman una bobina depende del voltaje máximo por vuelta y, de acuerdo a éste, debe escojerse un conductor recubierto con la clase de aislamiento conveniente. Para tensiones entre vueltas, de pequeña magnitud, se usan generalmente conductores aislados con doble capa de esmalte. Para tensiones por vuelta de hasta 25 volt. se usa conductores con recubrimiento doble de algodón y para tensiones mayores con recubrimiento triple de algodón o alguna otra clase especial de aislamiento.

En el caso presente se tiene un voltaje por vuelta de 4,55 volt, y se usará conductores con recubrimiento doble de esmalte (Heavy Formvar Coated wire) cuyo espesor es, para el calibre escogido, de 0,003 pulg. (Tabla de "Alambres redondos de cobre, desnudos y con aislamiento" pág. 477 del Appendix de la obra "Design of Electrical Apparatus" de Kuhlmann) o sea 0,0762 mm. El Esmalte, según Arnold-Le Cour (pág. 13, Tomo II de "La máquina Dínamoeléctrica de C.C.") tiene una resistencia a la perforación de 1000 volt. si su espesor es de 0,025 mm.

Para el aislamiento entre bobinas adyacentes y entre bobinas y el hierro del inducido se ha estandarizado clases y formas de éste de acuerdo a la tensión. La Tabla "B" da los espesores para aislamiento y to-

lerancias para enrollamientos de inducidos de máquinas de C.C. de acuerdo a la tensión y al diámetro, tanto para la profundidad como para el ancho de la ranura.

TABLA "B"

Espacio necesario para aislamiento y tolerancias de enrollamientos de Inducidos de Corriente Contínua

Tensión	Tolerancia entre terminales de bobinas	2b	En la profundidad de la ranura			A lo ancho de la ranura		
			Diámetro del inducido			Diámetro del inducido		
			20	30	40	20	30	40
0-300	0,10	1,50	0,27	0,28	0,33	0,060	0,065	0,080
300-600	0,12	1,75	0,29	0,31	0,37	0.075	0,085	0,095
600-1500	0,14	2,00	0,32	0,34	0,40	0,090	0,095	0,110

Estos valores son aproximados por exceso y, por lo mismo, tienen un alto márgen de seguridad.

La forma de aislar las bobinas umas de otras consiste, generalmente, en un doble recubrimiento de cintas de algodón cuyo espesor varía entre 0,005 y 0,007 pulg. de espesor; separándolas, además, com papel aislante. Todo este material tiene una rigidez eléctrica enorme (el papel áislante 7900 volt./mm.) que hace innecesario el cálculo.

Para aislar las bobinas del hierro de las ranuras se utiliza también papel aislante (papel de pescado) y tela cambray. Su objeto es, principalmente, protejer a las bobinas al ser introducidas en las ranuras.

En el caso del generador en diseño la Tabla "B" da los siguientes espesores para aislamiento y tolerancia:

Para V de 0-300 volt. y D = 20 pulg.; 0,27 pulg. en profundidad y 0,06 pulg. en ancho.

Dimensiones de la ranura.-

El ancho de la ranura debe ser tal que aloje a los conductores y al aislamiento necesario.También hay que tomar en cuenta que la longitud que el ancho de la ranura deje para el ancho del diente sea tal que la máxima densidad de flujo en el diente no sobrepase el límite permisible (155 klíneas/pulg^2.)

Para un diseño preliminar se puede tomar el ancho de la ranura como 0,4 ó 0,45 del paso entre dientes.

$w_s = t_1$ (0,4 ó 0,45) = 0,992(0,4 ó 0,45) = 0,397 a 0,446 pulg.

El espacio disponible para los conductores será:

0,397 - 0,06 = 0,337 pulg. ó 0,446 - 0,06 = 0,416 pulg.

Como el diámetro del alambre usado (#10 Heavy Formvar Coated wire) es de 0,1062 pulg.,en este espacio alcanzarán:

0,337/0,1062 = 3 conductores ó 0,446/0,1062 = 4 conductores

En vista de que para máquinas con polos auxiliares es preferible tener ranuras profundas y angostas se arreglarán los conductores 3 a lo ancho y,ya que van 24 conductores por ranura,8 en profundidad.

Como anteriormente se dividieron los 24 conductores de cada ranura en cuatro lados de bobina constando de seis conductores cada una de ellas,se tendrá que formar cada bobina con dos filas de tres conductores superpuestos en cada una.

Entonces el ancho definitivo de la ranura es:

$w_s = 3 \cdot 0,1062 + 0,062 = 0,38$ pulg. = 9,65 mm.

y el alto de la misma:

$d_s = 8 \cdot 0,1062 + 0,418 = 1,27$ pulg. = 32,26 mm.

La tolerancia para el aislamiento se usará asi:

Ancho: Papel pescado de 0,01 pulg. ..... 0,01 pulg.

Tela cambray de 0,07 pulg. ..... 0,07 pulg.

Cinta de algodón con medio recubrimiento ..... 0,014 plg.

Suman 0,31 pulg./lado.Como el aislamiento es a ambos lados,se necesitan 0,62 pulg. en total.

Alto:	Papel pescado 2 x 0,01	0,02 pulg.
	Tela cambray 2 x 0,007	0,014 pulg.
	Cinta de algodón 2 x 8 x 0,007	0,112 pulg.
	Papel separador 4 x 0,005	0,02 pulg.
	Total:	0,166 pulg.

Sobran 0,418 - 0,166 = 0,252 pulg. disponibles para el objeto que sellará la ranura a fin de impedir la deformación de las bobinas debida a la fuerza centrífuga.

El sello de la ranura puede hacerse con trozos de madera o de cuero impregnado en parafina.Los espesores de estas bandas de sello van usualmente de 0,1 a 0,2 pulg.(2,54 a 5,1 mm.).

En el caso presente se utilizará una cuña de cuero impregnada en parafina de 0,15 pulg. de espesor.El cálculo de comprobación de dicha cuña se hace en el artículo siguiente.

Con todo lo anotado anteriormente,la sección transversal de la ranura queda como indica el diagrama de la pág. siguiente.

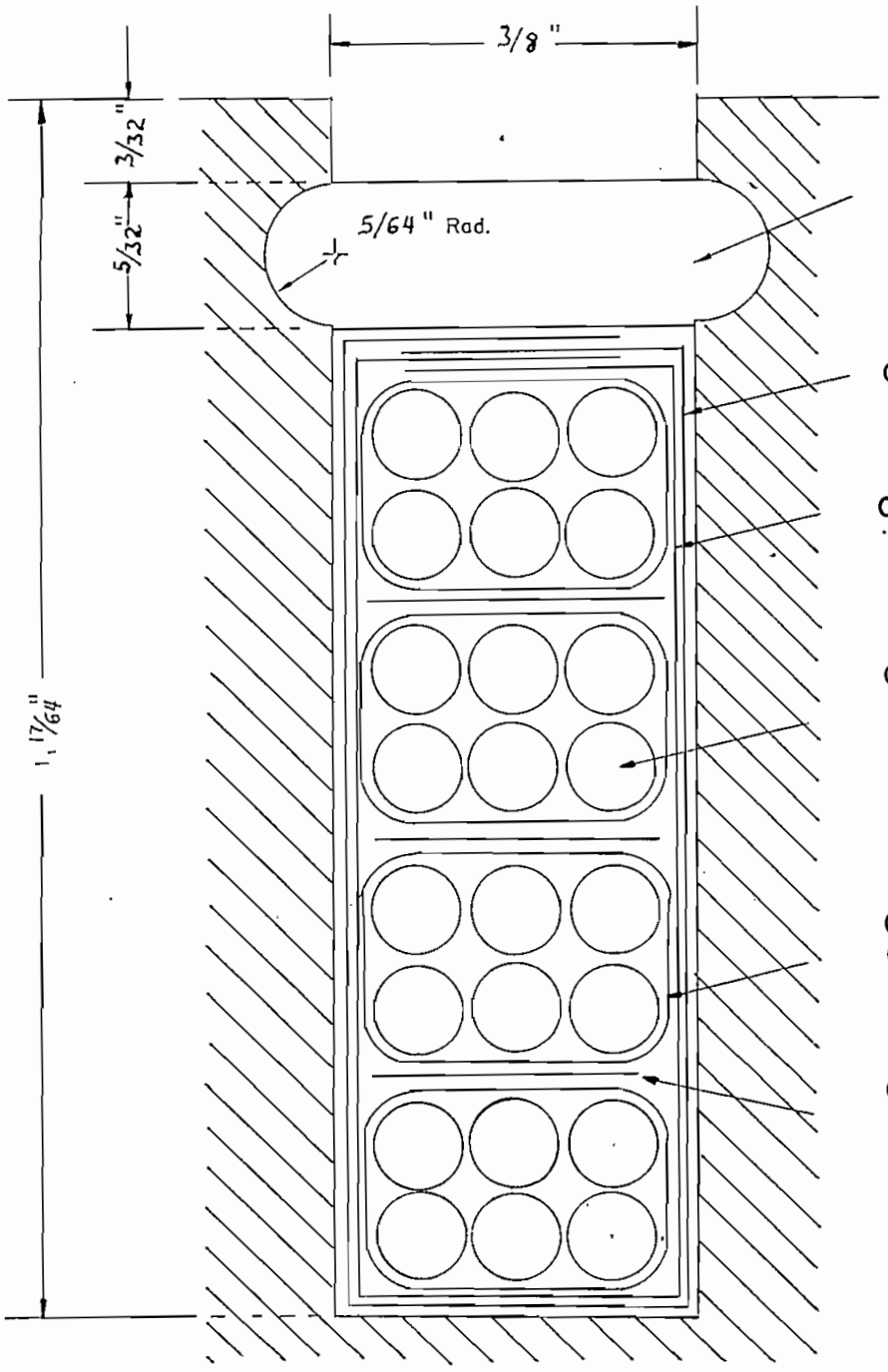
Cuñas de sello de las ranuras.-

La cuña de sello se puede considerar como una viga de luz igual al ancho de la ranura,ancho igual a la longitud del inducido;sobre la cual se ejerce la carga debida a la fuerza centrífuga proveniente de los conductores ubicados en la ranura.Sobre esta base,la pág. 321,Tomo IV de "La Escuela del Técnico Electricista" deduce la siguiente fórmula para el esfuerzo de flexión al cual está sometido la cuña.

$$k_f = \frac{15\ G_{cur} \cdot v^2 \cdot w_s}{D \cdot l \cdot h_{cu}^2}\ \text{Kg./cm}^2.$$

SECCION TRANSVERSAL DE LA RANURA

GENERADOR DE C.C. 25 KW. 250V. 1.725 RPM.



CUÑA DE CUERO

0,010" PAPEL PESCADO

0,007" CAMBRAY BARNIZADO

CONDUCTOR REDONDO DE COBRE, CALIBRE Nº 10 AWG. CON DOBLE CAPA DE ESMALTE 0,1062" Diam.

0,007" CINTA DE ALGODON CON MEDIO RECUBRIMIENTO.

0,005" PAPEL SEPARADOR

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
001492

FIG. 5

ESCALA: 5/1

En donde: G_{cur} = Peso del cobre de una ranura en Kg.

h_{cu} = Espesor de la cuña de sellado en cm.

v = Velocidad periférica del inducido en m/seg.

w_s = Ancho de la ranura en cm.

D = Diámetro del inducido en cm.

l = Longitud del inducido en cm.

El peso del cobre de la ranura es:

$$G_{cur} = \frac{N \cdot l \cdot S_a \cdot \gamma}{10^5 \cdot S} \text{ Kg.}$$

N = Núm. de conductores del inducido.

S = Núm. de ranuras del inducido.

S_a = Sección del conductor en mm^2.

γ = Peso específico del cobre.

Reemplazando los valores pertinentes y tomando en consideración los factores correspondientes de corrección de unidades.

$$G_{cur} = \frac{912 \cdot 4 \cdot 2,54 \cdot 817 \cdot 10^{-5} \cdot 25,4^2 \cdot 8,9}{38 \cdot 10^5} = 0,134 \text{ Kg.}$$

La velocidad periférica del inducido en m/seg. es:

$$v = \frac{5420 \text{ pies/min x } 0,305 \text{ m/pie}}{60 \text{ seg./min.}} = 27,6 \text{ m/seg.}$$

Con lo cual, el coeficiente de esfuerzo a la flexión vale:

$$k_f = \frac{15 \cdot 0,134 \cdot 27,6^2 \cdot 0,38 \cdot 2,54}{12 \cdot 2,54 \cdot 4 \cdot 2,54 \cdot 0,15^2 \cdot 2,54^2} = 32,8 \text{ Kg./cm}^2.$$

Como el límite permisible para el material usado es de 60 Kg/cm^2., el espesor de la cuña de sello está perfectamente adoptado.

Densidad máxima de flujo en el inducido.-

Para realizar este cálculo se necesita previamente conocer el número y dimensiones de los ductos de ventilación de disposición radial. En vista de que no se conoce todavía el monto de energía de pérdida por calor, no queda más remedio que atribuírse un número y dimensiones pruden-

tes de ductos.La experiencia da como regla que se deben usar los ductos necesarios para evitar que haya secciones de hierro de una longitud,paralela al eje,de más de 3 pulg.El ancho de estos ductos varía entre 1/4 y 3/4 de pulg.,de acuerdo al número de ductos y a la potencia de la máquina.Para el generador en diseño se escoje un ducto de 3/8 de pulg.(9,525 mm.) debido a la corta longitud del inducido (4 pulg.) y a la pequeña potencia (25 Kw).Este ducto irá provisto de una plancha circular de acero de forma tal que ayude a la ventilación del inducido.La fig. de la página siguiente da una vista y el corte de la misma.

Tomando esto en consideración,la longitud neta de hierro es:

$l_n = (l - w_d \cdot n_d)k_l$ $\quad$ w_d = Long. del ducto.

$= (4 - 0,375)0,88$ $\quad$ n_d = Núm. de ductos.

$l_n = 3,18$ pulg. $\quad$ k_l = Factor de laminación = 0,88 a 0,93

El paso entre dientes en el fondo de la ranura es:

$t_2 = \pi(D - 2d_s)/S$ y el ancho del diente en ese punto;

$$w_{t_2} = t_2 - w_s = \frac{\pi(D - 2d_s)}{S} - w_s$$

$$w_{t_2} = \frac{3,14(12 - 2 \cdot 1,27)}{38} - 0,38 = 0,40 \text{ pulg.} = 15,8 \text{ mm.}$$

La densidad de flujo en este punto es:

$$B_{t2} = \frac{\phi_t}{s_{t2}} = \frac{6100}{0,4 \cdot 3,18 \cdot 38} = 126,5 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

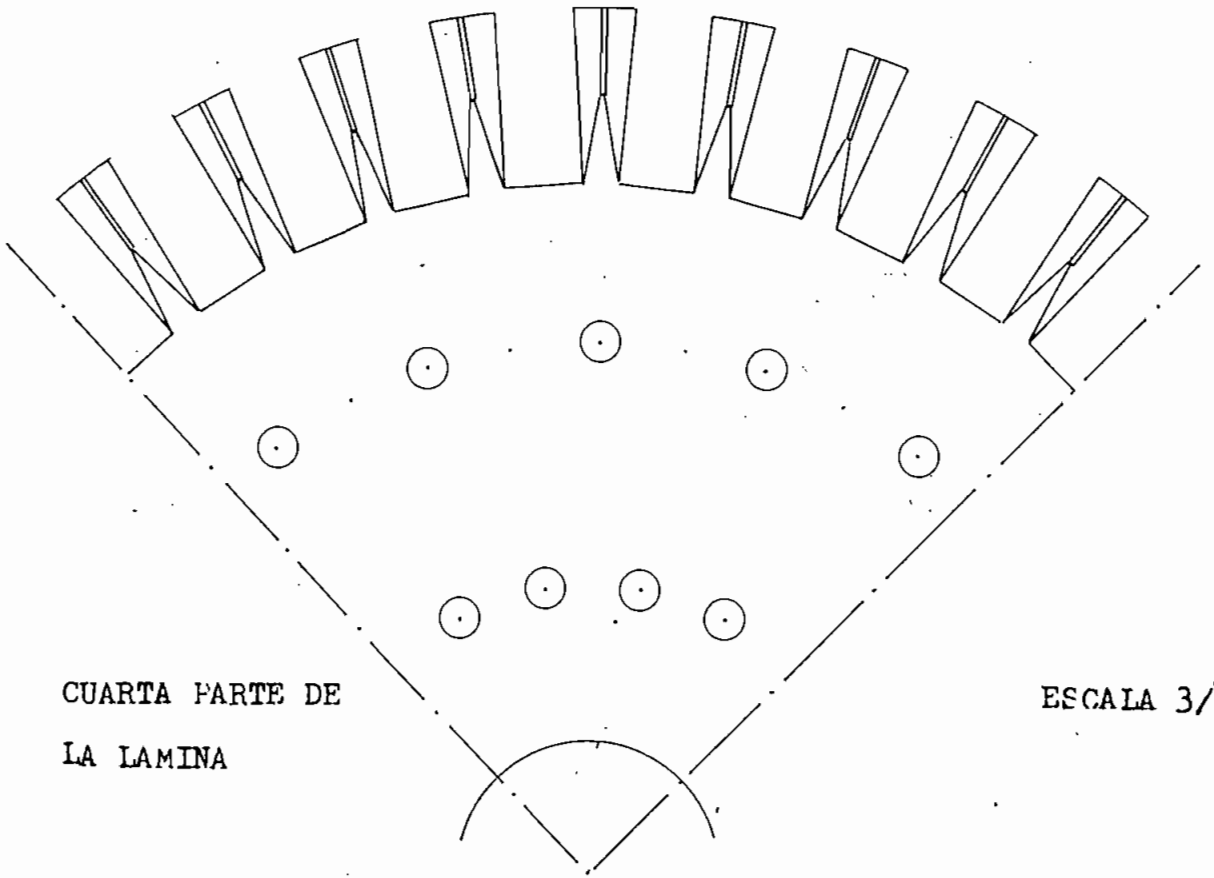
Valor enteramente aceptable por estar bajo el límite de 155 Kilolíneas por pulgada cuadrada.

Longitud promedio de media vuelta de las bobinas del inducido.-

La forma más conveniente de las conexiones terminales de las

PLACA SEPARADORA DEL DUCTO DE VENTILACION

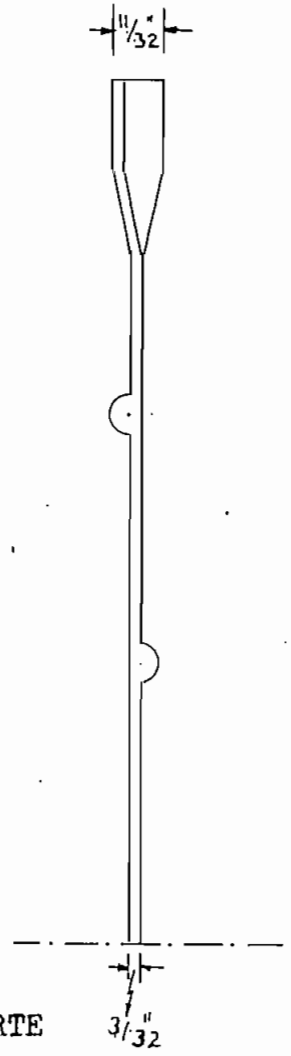
GENERADOR DE C.C.,25 KW,250 V,1725 R.P.M.



CUARTA PARTE DE
LA LAMINA

VISTA

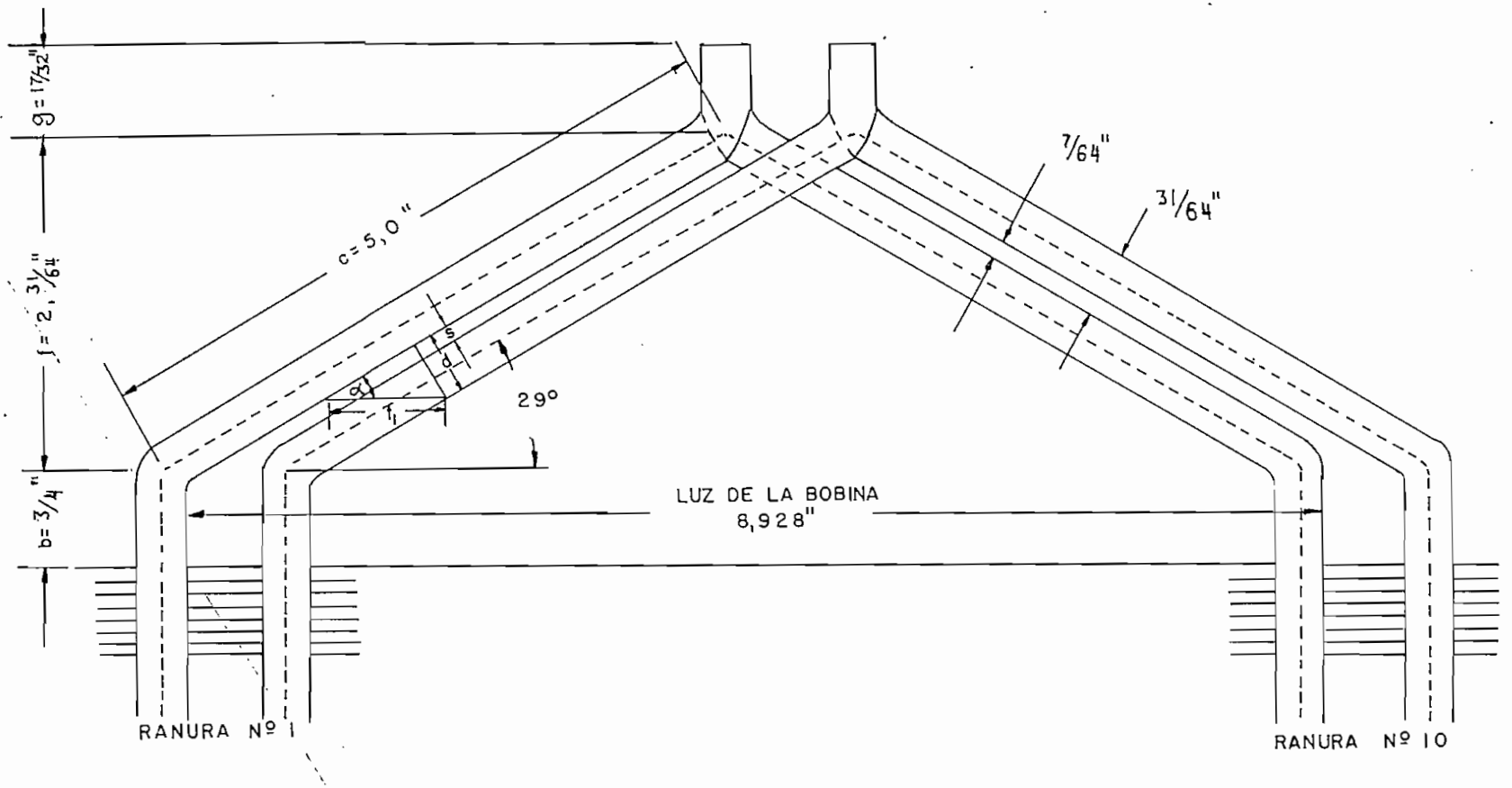
ESCALA 3/4 : 1



CORTE

FIG. 6

ESCALA: 0,75/1



FORMA DE LA CONEXION TERMINAL DE LA BOBINA

GENERADOR DE C.C. DE 25 K.W. 250V.

1.725 R.P.M.

FIG. 7

PAG. 29

bobinas del inducido para enrollamiento imbricado en doble plano se aprecia en el gráfico de la pág, anterior que muestra sus detalles.

De la fig. se desprende que: $\text{Sen.}\,\alpha = d/t_1$

d es igual al ancho de la ranura más la tolerancia entre bobinas s.

t_1 es el paso entre dientes en la superficie del inducido.

La tolerancia s depende de la tensión entre bobinas y su valor es facilitado por la Tabla "B".

La luz de la bobina se calcula con el diámetro de la circunferencia que pasa por la altura media de la ranura, y vale:

$$Y_{s1} = (D - d_s)/p$$

Los valores prácticos para la prolongación de la parte recta de un lado de la bobina (b) también se dan en la Tabla "B". La longitud del lazo al fin de la bobina (g) se toma generalmente como igual a la mitad de la profundidad de la ranura.

Tomando esto en cuenta, la expresión que da la longitud promedio de media vuelta de una bobina del inducido es:

$$L_a = \frac{\pi(D - d_s)}{p \cdot \cos\alpha} + 2b + d_s + 1$$

En el caso presente se tienen los siguientes valores:

$s = 0{,}1$ (visto en la Tabla "B") $\qquad w_s = 0{,}38$ pulg.

$d = s + w_s = 0{,}1 + 0{,}38 = 0{,}48$ pulg. $\qquad t_1 = 0{,}992$ pulg.

$\text{sen}\,\alpha = 0{,}48/0{,}992 = 0{,}484$; $\alpha = 29^\circ$; $\cos\alpha = 0{,}875$; $\text{tg}\alpha = 0{,}555$

$2 \cdot b = 1{,}5$ pulg. (visto en la Tabla "B") $\qquad 2 \cdot g = 1{,}27$ pulg.

$$L_a = \frac{3{,}14(12 - 1{,}27)}{4 \cdot 0{,}875} + 1{,}5 + 1{,}27 + 4 = 16{,}41 \text{ pulg.}$$

Resistencia del enrollamiento del inducido.-

Según las normas de la A.I.E.E. se considera 75° C. la tempe-

ratura de trabajo de la máquina bajo cualquier condición de carga, Siguiendo estas Normas, en el caso presente, el cálculo de la resistencia del enrollamiento del inducido se hará en base a esta temperatura.

El valor resistivo de cualquier circuito lo da la fórmula:

$$R = r \cdot \frac{l}{s}$$

Donde: l = Longitud del conductor que forma el circuito

s = Sección transversal del conductor.

r = Resistividad del conductor a una temperatura.

En el caso del inducido en estudio, se tiene; el número de conductores en serie es N/a, su logitud $L_a \cdot N/a$, la sección transversal es $s_a \cdot a$ ya que hay a conductores en paralelo. Por lo tanto la resistencia es:

$$R_a = \frac{L_a \cdot N}{a^2 \cdot s_a} r \cdot 10^{-6}$$

$r \cdot 10^{-6}$ es la resistencia específica de un cilindro de cobre de 1 $pulg^2$. de sección y una pulg. de longitud. Para $75^{\circ}C$. r = 0,826

$$R_a = \frac{16,41 \cdot 912 \cdot 0,826}{4^2 \cdot 0,00817 \cdot 10^6} = 0,0947 \text{ ohms.}$$

Caída de tensión en el enrollamiento del inducido.-

Viene dada por la expresión:

$$I_a \cdot R_a = 102 \cdot 0,0947 = 9,65 \text{ volt.}$$

Que expresada en porcentaje de la tensión nominal es:

$$\frac{9,65}{250} \times 100 = 3,86 \%$$

Peso del cobre del inducido.-

El peso del cobre del enrollamiento del inducido es:

$G_a = L_a \cdot N \cdot s_a \cdot \gamma$ $\quad \gamma$ = Peso específico = 0,321 $lb/pulg^3$.

$G_a = 16,18 \times 912 \times 0,00817 \times 0,321 = 38,7$ lbs. = 17,554 Kg.

Bandajes de sujeción de los lados terminales de las bobinas del inducido.-

Tienen la finalidad de sujetar los terminales de las bobinas del inducido para impedir que la fuerza centrífuga los levante.Estos bandajes se hacen,de bronce o de cuerdas de piano de diámetros de 0,6 a 1,5 mm.El cálculo de el número de bandajes necesario se lo puede realizar a partir de la siguiente fórmula deducida en la pág. 322 del Tomo IV de "La Escuela del Tecnico Eléctricista".

$$n_b = \frac{90 \cdot G_{cu} \cdot D \cdot n^2}{k_{tr} \cdot S \cdot 10^6}$$

S es la sección del alambre de bandaje en mm^2.
k_{tr} el esfuerzo máximo admisible en $Kg./cm^2$.
G_{cu} el peso del cobre de los terminales de las bobinas.

En el caso presente los bandajes se harán de cuerdas de piano que tiene $k_{tr} = 1200\ Kg./cm^2$.

El peso de todo el cobre del inducido se calculó anteriormente y es 17,554 Kg.,el peso del cobre de una ranura,también averiguado con anterioridad,es 0,134 Kg.Luego el peso de los terminales de bobina es: 17,554 - 0,134·38 = 12,454 Kg.;y el numero de bandajes,reemplazando valores y tomando en cuenta los factores de conversión de unidades, es:

$$n_b = \frac{90 \cdot 12,454 \cdot 12 \cdot 2,54 \cdot 1725^2}{1200 \cdot \frac{\pi \cdot 1,525^2}{4} \cdot 10^6} = 46 \text{ vueltas.}$$

Habiéndose tomado el diámetro de los bandajes de alambre 0,06 pulg.,o sea 1,525 mm.

El número de bandajes sacado es para ambos lados terminales las bobinas,luego el número de bandajes necesario para cado lado es: 23 vueltas.La longitud de cada bandaje es: 23·0,06 = 1,38 pulg.=35 mm.

CONEXIONES EQUILIBRADORAS DE POTENCIAL.-

Las conexiones equilibradoras de potencial tienen el objeto de eliminar las corrientes que circulan entre escobillas del mismo signo debidas al potencial diferente que se puede originar en los varios circuitos en paralelo del inducido,si ellos cortan flujos desiguales. Esta desigualdad en los flujos puede ser causada por defectos de construcción en los polos.

El no proveer a una dínamo de estas conexiones puede ser puede ser causa de sobrecargas en las escobillas y la producción de arcos entre ellas y el colector.

Para máquinas de características normales como el generador en diseño,se utilizan estas conexiones cada 3 ó 4 delgas.En el caso presente se pondrán cada 4 delgas,es decir en un número de 76/4 = 19.

El conductor empleado en estas conexiones es el mismo que el del enrollamiento del inducido,es decir alambre redondo de cobre,calibre # 10 con doble recubrimiento de esmalte.

NUCLEO DEL INDUCIDO.-

En vista del pequeño diámetro del inducido de la máquina en diseño,el núcleo de éste estará formado por láminas de una sóla pieza. Dichas láminas se cortaran de planchas de acero al silicio (2,5 a 3%) de silicio,de calibre # 29 (calibre americano) de 0,014 pulg. (0,356 mm) de espesor.Este material tiene un punto de saturación de 102 Kilolíneas por pulg.^{2} (16,4 Kilogauss) según se aprecia de la curva de magnetización respectiva suministrada por los fabricantes y que ha compilado J.H. Kuhlmann en el Appendix 5 de su obra (ver Bibliografía).

Este material trabajará en algunos sitios con inducciones que sobrepasen su punto de saturación (base de los dientes 126,5 Kilolíneas por pulg^2.) a fin de evitar un excesivo costo.En realidad la densidad

de flujo en ese punto será menor pués parte del flujo atraviesa las ranuras.

La fig,de la pág. siguiente es la vista de una lámina del inducido.

Como se puede apreciar en la fig. las láminas van provistas de agujeros circulares para permitir el paso de los pernos de ajuste de ellas los que se calcularán más adelante.Además,las láminas tienen un chavetero. El número de láminas necesarias es: l_n/e_s ,siendo e_s el espesor de cada lámina y l_n la longitud neta del inducido. $3,18/0,014 = 227$ láminas.

Pernos de ajuste de las láminas del inducido.-

Las láminas del inducido son presionadas por las llamadas placas de presión,las que a su vez,se ajustan por medio de pernos y sus respectivas tuercas.

Según Arnold-Le Cour (pág. 42 de "La máquina Dinamoeléctrica de C.C.) la presión que debe ejercerse para mantener perfectamente unidas las láminas del inducido es de 10 Kg./cm^2.Adoptándo este valor se tiene:

la superficie de las láminas es:

superficie de los dientes: $S \cdot d_s \cdot \frac{w_{t_1} + w_{t_2}}{2} = 38 \cdot 1,27 \cdot \frac{0,612 + 0,4}{2} = 24,4$ plg^2

superficie del núcleo:

$$\pi \left[(12 - 2 \cdot 1,27)^2 - 2^2\right] / 4 = 62,3 \text{ pulg.}$$

$$24,4 + 62,3 = 86,7 \text{ pulg}^2. = 560 \text{ cm}^2.$$

La fuerza total necesaria para sujetar las láminas es:

$$P = 10 \text{ Kg./cm}^2 \times 560 \text{ cm}^2 = 5600 \text{ Kg.}$$

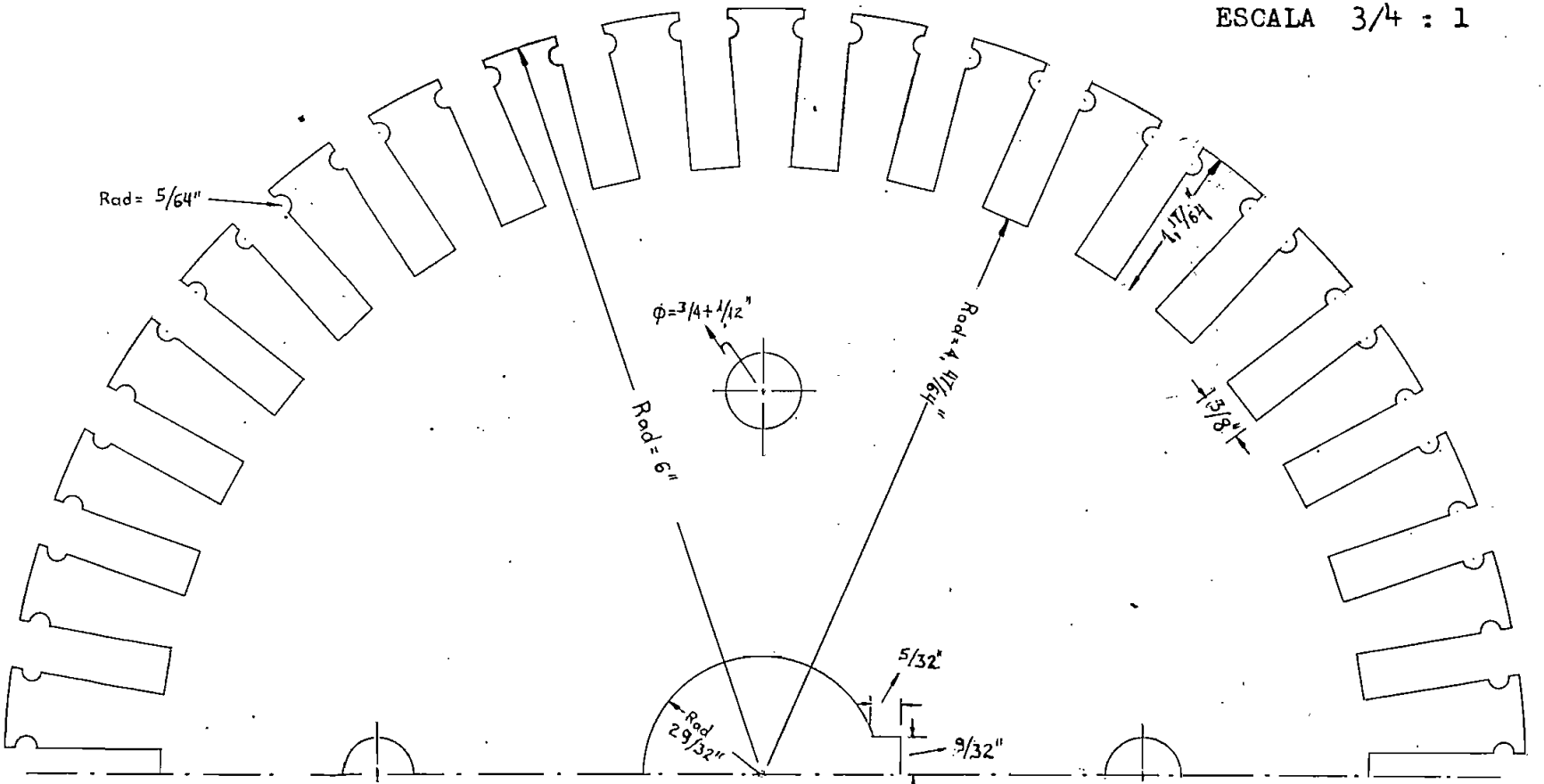
Según el Tomo II de "Manual del Ingeñiero" de Hutte (pág. 14) se debe considerar una fuerza $P' = 5/4\ P$,con la cual se debe calcular la sección transversal de los pernos.

$$P' = 5600 \times 5/4 = 7000 \text{ Kg.}$$

LAMINA DEL INDUCIDO

GENERADOR DE 25 KW, 250 V, 1725 R.P.M.

ESCALA 3/4 : 1



Corte Simétrico

FIG. 8

La sección transversal mínima del perno es; $s_{per} = \frac{P'}{k \cdot n}$ Donde k es la fatiga admisible en los pernos y n es el número de ellos. Para el generador en diseño se adopta n = 4 y k = 1200 $\frac{Kg}{cm^2}$ que, según pág. 848, Tomo I, Manual del Ingeñiero de Hutte, corresponde a acero dulce.

$$s_{per} = \frac{7000}{1200 \cdot 4} = 1,46 \text{ cm}^2. = 0,227 \text{ pulg}^2.$$

Se usarán pernos de 3/4" pulg. de diámetro exterior, los cuales tienen una sección transversal de 0,3020 pulg^2. en la raíz del diente (Según Tabla XIX, pág. 282 del libro "Construcción de Elementos de Máquinas" de D. S. Kimball y J. H. Barr).

La tuerca y la cabeza serán exagonales y deberán tener las siguientes dimensiones a fin de evitar esfuerzos de cortadura:

Cabeza;	Dist. entre aristas opuestas	1,263 pulg.
	Dist. entre caras opuestas	1 1/8 pulg.
	Altura	9/16 pulg.
Tuerca;	Altura	21/32 pulg.

Según Tabla XX, pág. 285 "Construcción de Elementos de Máquinas", Kimball y Barr; que ha sido elaborada bajoslas Normas A.S.A.

Para el aislamiento magnético de los pernos se usarán tubos de bronce de 3/4 pulg. de diámetro interior y 1/24 de pulg de espesor.

Placas de presión.-

Como se dijo anteriormente, sirven para prensar las láminas del inducido y van colocadas a ambos lados de éste. Su dimensionado debe hacerse desde el punto de vidta que trabajan al esfuerzo cortante, y en el punto más peligroso, es decir, bajo el filo de la tuerca.

La superficie resistente, considerándo la tuerca como circular, es: $\pi \cdot D \cdot e$ y debe ser proporcional a la fuerza : $n \cdot \pi \cdot e \cdot D \cdot \tau = F$

en donde: n = Núm. de pernos. e = Espesor de la placa.

D = Diám. de la tuerca. τ = Coef. admisible de trabajo a la cortadura.

Para acero τ vale 1000 Kg/cm^2 según Hütte, Tomo I, pág. 848. Por lo tanto:

$$e = \frac{7000 \text{ Kg.}}{4 \cdot \pi \cdot 1{,}263 \text{ pulg} \cdot 2{,}54 \text{ cm/pulg} \cdot 1000 \text{ Kg/cm}^2} = 0{,}174 \text{ cm} = 0{,}0685 \text{ pulg.}$$

Para facilidad en la construcción se adoptam las medidas indicadas en la fig. de la pág. siguiente que da la vista y el corte de la placa de presión.

Aros de sostén de las bobinas del inducido.-

Sirven para facilitar una base de apoyo a las bobinas y permitir su fijación por medio de bandajes de alambre com el objeto de evitar las deformaciones debidas a la fuerza centrífuga.

El cálculo de estas piezas es innecesario ya que los esfuerzos a que están sometidas son mínimos y, por lo tanto, se pueden despreciar.

La forma y las dimensiones de estas piezas pueden apreciarse em el diagrama del corte del generador.

DISEÑO DE LOS POLOS PRINCIPALES Y SUS ENROLLAMIENTOS.-

CIRCUITO MAGNETICO DEL FLUJO INDUCTOR.-

La fórmula que da los amper-vueltas para enviar el flujo Φ a través de un circuito magnético de longitud L, sección transversal s y permeabilidad μ es:

$$AT = \frac{L \cdot \Phi}{0{,}4\pi \cdot \mu \cdot s}$$

Como $B = \Phi/s$

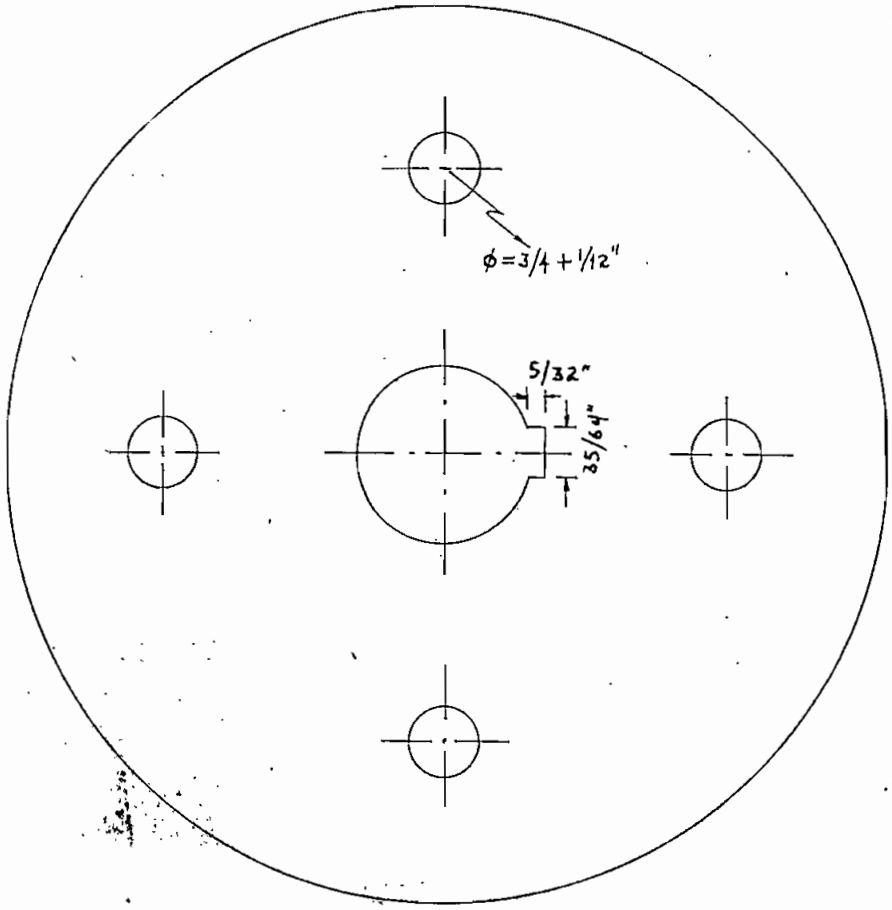
$$AT = \frac{L \cdot B}{0{,}4 \cdot \pi \cdot \mu}$$

En donde L está em cm. y B en gauss (líneas/cm^2). Al expresar L en pulg. y B em líneas por pulg^2 hay que introducir un factor de conversión, que-

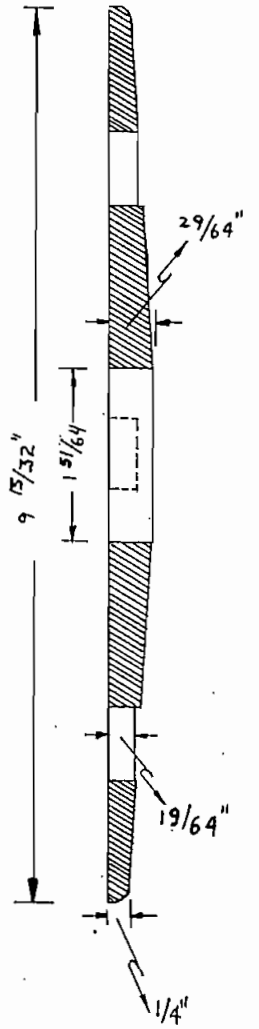
PLACA DE PRESION

GENERADOR DE C.C.,25 KW,250 V,1725 R.P.M.

ESCALA 1/2 : 1



VISTA



CORTE

FIG. 9

dando la fórmula en definitiva así: $AT = \frac{L \cdot B}{3,2\mu}$; $\frac{AT}{L} = \frac{B}{3,2 \cdot \mu} = at$

Donde at son los amper-vueltas para enviar el flujo Ø a través de 1 pulg. de circuito de permeabilidad μ y con la densidad B.

La permeabilidad μ vale 1 para el aire y toma diferentes valores para otros materiales,dichos valores no son constantes sino que dependen de B.Los fabricantes de materiales para aparatos eléctricos facilitan Tablas gráficas de los amper-vueltas por pulg. de longitud de un circuito magnético para cada material y a diversas inducciones.

La fig. de la pág. siguiente,muestra que el circuito magnético por par de polos de una dínamo está compuesto por varios tramos de distinto material y,por lo mismo,de distinta permeabilidad.Tampoco la densidad de flujo (B) es la misma,por lo que habrá que calcular los amper-vueltas separadamente para cada tramo.

Los amper-vueltas serán totalizados para cada polo y,según la fig. lO valen:

$$ATP = AT_g + AT_t + AT_{ya} + AT_p + AT_{yf}$$

Donde: ATP = Amper-vueltas totales por polo.

AT_g = Amper-vueltas para el entrehierro.

AT_t = Amper-vueltas para los dientes del inducido.

AT_{ya} = Amper-vueltas para el yugo del inducido.

AT_p = Amper-vueltas para el cuerpo polar.

AT_{yf} = Amper-vueltas para el yugo polar.

<u>Amper-vueltas para los dientes del inducido</u>.-

Para facilidad en el bobinado se acostumbra construir las ranuras del inducido con paredes paralelas,debido a ello los dientes sufren un estrechamiento que, a la vez,produce un crescimiento de la inducción a través de ellos .

CIRCUITO MAGNETICO

GENERADOR DE C.C. 25 KW. 250V.

1.725 RPM.

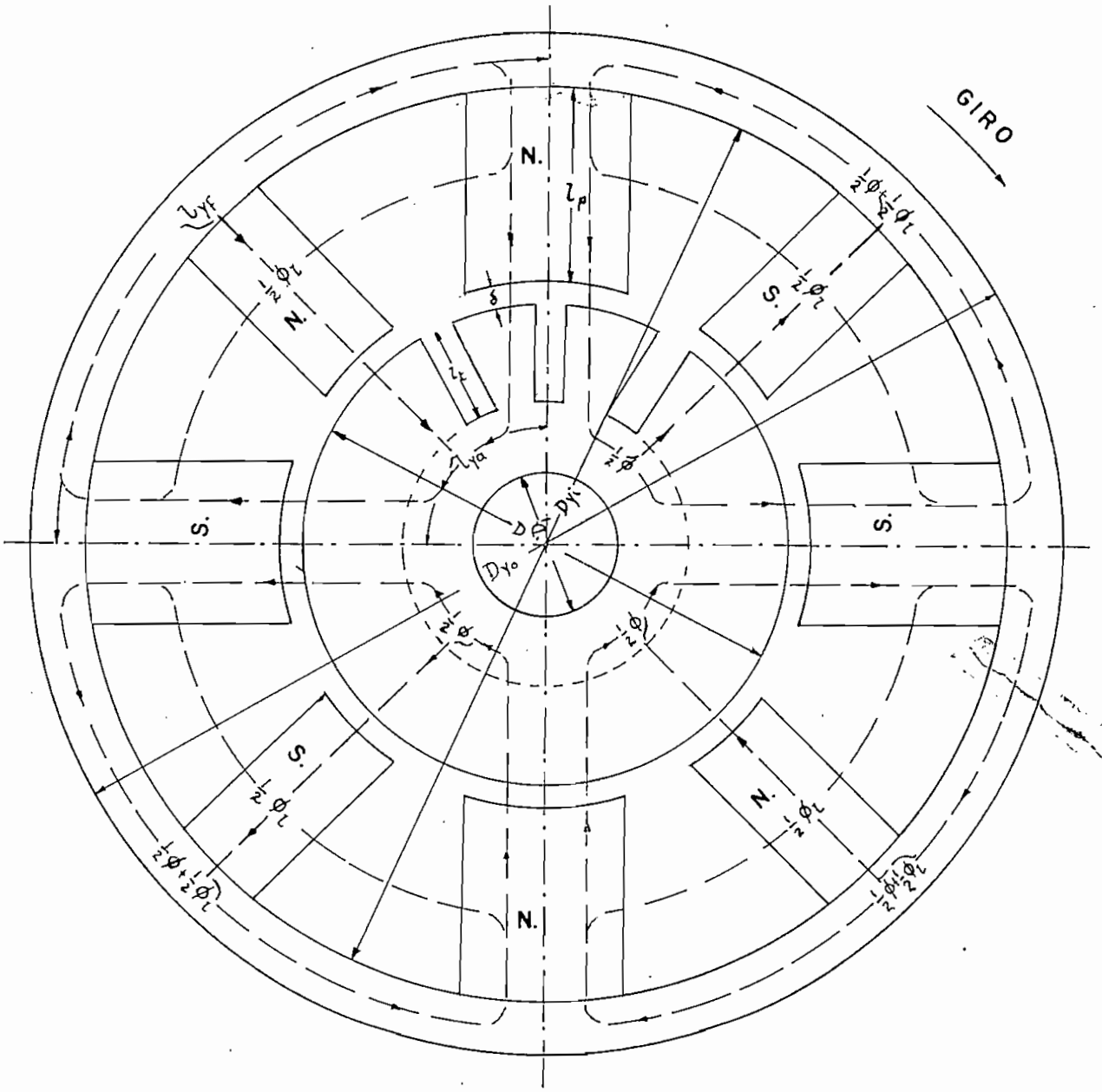


FIG. 10

PAG. 40

Como inducción promedio (por haber dado buenos resultados prácticos) se toma el valor de ésta en el área transversal que corresponde al diente a 2/3 de profundidad de la ranura.

El ancho del diente en este punto es:

$$w_{t_3} = \frac{\pi(D - 4/3 \cdot d_s)}{S} - w_s$$

y la sección del diente del inducido en el mismo punto: $s_{t_3} = l_n \cdot w_{t_3}$

En el diseño de dínamos no se pueden evitar altas densidades de flujo en los dientes del inducido.Este hecho hace que parte del flujo atraviese las ranuras y los ductos de ventilación.

Si B_{t_3} es la densidad de flujo promedio real de los dientes,correspondiente a cierto valor de amper-vueltas por pulg.,el flujo real a través de un diente es: $B_{t_3} \cdot l_n \cdot w_{t_3}$ .El resto del flujo debido a esos amper-vueltas por pulg. pasará,como se ha dicho,por las ranuras y ductos de ventilación;es decir por una sección: $1 \cdot t_3 - l_n \cdot w_{t_3}$.Siendo t_3 el paso entre dientes enel punto correspondiente al ancho w_{t_3}.

Como: $B = 3,2 \cdot at \cdot \mu$; y μ para el aire vale 1,el valor del flujo que pasa por las ranuras y ductos de ventilación es:

$$3,2 \cdot at(1 \cdot t_3 - l_n \cdot w_{t_3})$$

Entonces el flujo total que penetra en el inducido vale:

$$B_{t_3} \cdot l_n \cdot w_{t_3} + 3,2 \cdot at(1 \cdot t_3 - l_n \cdot w_{t_3})$$

que se puede considerar igual a: $B'_{t_3} \cdot l_n \cdot w_{t_3}$

siendo B'_{t_3} la densidad promedio aparente de flujo en los dientes del inducido.Simplificando esta expresión se tiene:

$$B'_{t_3} = B_{t_3} + 3,2 \cdot at\left(\frac{1 \cdot t_3}{l_n \cdot w_{t_3}} - 1\right)$$

Como los términos encerrados en el paréntesis son constantes para un caso dado,se puede escribir:

$$B'_{t_3} = B_{t_3} + k_t \cdot at \qquad \text{Ecuación en la cual:}$$

$$k_t = 3{,}2\left(\frac{l \cdot t_3}{l_n \cdot w_{t_3}} - 1\right) = 3{,}2\left\{\frac{l \cdot \pi \cdot \frac{(D - 4/3 \cdot d_s)}{S}}{l_n\left[\frac{\pi(D - 4/3 \cdot d_s)}{S} - w_s\right]} - 1\right\}$$

$$k_t = \left\{\frac{l \cdot \pi \cdot (D - 4/3 \cdot d_s)}{l_n\ \left[\pi(D - 4/3 \cdot d_s) - S \cdot w_s\right]} - 1\right\}\ 3{,}2$$

En el caso del generador en diseño los valores son:

$l = 4$ pulg.

$D = 12$ pulg.

$d_s = 1{,}27$ pulg.

$l_n = 3{,}18$ pulg.

$w_s = 0{,}38$ pulg.

$S = 38$

$$k_t = 3{,}2\left\{\frac{\pi \cdot 4(12 - 4/3 \cdot 1{,}27)}{3{,}18\ \left[\pi(12 - 4/3 \cdot 1{,}27) - 38 \cdot 0{,}38\right]} - 1\right\}$$

$$k_t = 4{,}07$$

Por otro lado, la densidad aparente del flujo en los dientes del inducido deberá ser igual a :

$$B'_{t_3} = \frac{\phi_t}{l_n \cdot w_{t_3} \cdot S} = \frac{61{,}00}{3{,}18 \cdot 38 \cdot 0{,}47} = 107{,}3 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

ya que: $w_{t_3} = \frac{\pi(D - 4/3 \cdot d_s)}{S} - w_s = \frac{\pi(12 - 4/3 \cdot 1{,}27)}{38} - 0{,}38 = 0{,}47$ pulg

En las curvas de magnetización del material del cual se hacen las láminas del inducido se ve el valor de los amper-vueltas por pulg. correspondientes a la densidad aparente de flujo.

Así, para $B'_{t_3} = 107{,}3$ Kilolíneas por pulg^2

$at = 190$ amper-vueltas/pulg.

La densidad promedio real será, entonces:

$$B_{t_3} = B'_{t_3} - k_t \cdot at = 107.300 - 4{,}07 \cdot 190 = 106{,}4 \text{ Kilolíneas/pulg}^2$$

Los amper-vueltas para toda la trayectoria del flujo en los dientes se

obtiene multiplicando el valor de at por la longitud del trayecto magnético en los dientes,es decir,por la profundidad de la ranura.

$$AT_t = 190 \cdot 1,27 = 242 \text{ amper-vueltas.}$$

Por tener necesidad de la curva de saturación del generador a Circuito Abierto se calcula AT_t para otros valores de la tensión inducida.Los resultados de este cálculo se Tabulan en la Tabla siguiente:

Tabla "C"

E	250	263	275	300
B'_{t3}	102	107,3	112	122,2
at_t	120	190	280	570
AT_t	153	242	356	725

Amper-vueltas para el entrehierro.-

El valor de los amper-vueltas para el entrehierro de un inducido liso lo da la expresión siguiente:

$$AT_g = \frac{B_g \cdot \delta}{3,2}$$

La presencia de las ranura hace que la reluctancia del entrehierro se incremente debido a la baja permeancia del espacio de aire de la ranura y a la alta densidad en los dientes.Para tomar en cuenta este efecto se introduce en la fórmula anterior un factor

$k = \frac{t_1}{w_{t_1} + y \cdot \delta}$; cuyo valor fluctúa entre 1,05 y 1,25;el cual ha dado resultados prácticos satisfactorios.

En esta fórmula: t_1 = Paso entre dientes en la superficie del inducido.

w_{t1} = Ancho del diente en la superficie del inducido.

δ = Longitud del entrehierro.

y = Función del cociente del ancho de la ranura para la longitud del entrehierro (w_s/δ)

La fig. 53,pág. 67 del "Desing of Electrical Apparatus"de Kuhlmann es el nomograma correspondiente de y.

La ecuación de los amper-vueltas para el entrehierro queda,por lo tamto,así:

$$AT_g = \frac{B_g \cdot \delta \cdot k}{3,2}$$

Expresión en la cual,por desconocerse δ y AT_g,hay que imponerse el valor del uno y deducir el del otro.

La experiencia aconseja adoptar para los amper-vueltas para el entrehierro un valor tal que se cumpla la igualdad siguiente:

$$AT_g + AT_t = K_g \cdot ATP_a$$

En donde: ATP_a son los amper-vueltas del inducido por polo.

k_g es una constante que varía entre 0,75 y 0,85,prefiriéndose para generadores los valores altos.

El valor de los amper-vueltas del inducido por polo es,por definición,

$$ATP_a = \frac{N \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot p}$$

$$ATP_a = \frac{912 \cdot 102}{2 \cdot 4 \cdot 4} = 2910 \text{ Amper-vueltas por polo.}$$

Luego: $AT_g + AT_t = 0,85 \cdot 2910 = 2470$ Amper-vueltas/polo.

y $AT_g = 2470 - AT_t = 2470 - 242 = 2228$ amper-vueltas/polo.

Densidad máxima de flujo en el entrehierro.-

La densidad máxima de flujo en el entrehierro es:

$$B_g = \frac{\phi_t}{\pi \cdot D \cdot l} = \frac{6100 \text{ Kilolíneas}}{\pi \cdot 12,4 \text{ pulgadas}^2} = 40,5 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

Longitud definitiva del entrehierro.-

Adoptamdo para k un valor 1,2 se tiene:

$$\delta = \frac{3,2 \cdot AT_g}{B_g \cdot k} = \frac{3,2 \cdot 2228}{40,5 \cdot 1,2 \cdot 1000} = 0,147 \text{ pulg.}$$

Se escoje δ = 0,15 pulg. = 3,8 mm.

Recalkulando los otros datos:

Para w_s/δ = 0,38/15 = 2,53 el momograma da y = 1,65

El valor correspondiente de k es:

$$k = \frac{0,992}{(0,992 - 0,38) + 1,65 \cdot 0,15} = 1,15$$

El número exacto de amper-vueltas/polo para el entrehierro es,entonces:

$$AT_g = \frac{40,5 \cdot 1000 \cdot 0,15 \cdot 1,15}{3,2} = 2185 \text{ amper-vueltas/polo.}$$

Para otros valores de la tensión inducida:

Tabla "D"

E	250	263	275	300
B_g	38,5	40,5	42,4	46,2
AT_g	207,5	2185	2290	2490

Amper-vueltas para el yugo del inducido.-

De la fig. 10 se desprende que cada sección del hierro del inducido bajo la ranura lleva la mitad del flujo útil por polo.

El flujo por polo es:

$$\phi = \frac{\phi_t \cdot f_d}{p} = \frac{6100 \cdot 0,675}{4} = 1035 \text{ Kilolíneas.}$$

Luego,la densidad del flujo vale: $B_{ya} = \phi / S_{ya}$

Donde S_{ya} es el doble de la sección transversal del núcleo del inducido.

Llamando d_{ya} (ver fig.10) al doble de la profundidad radial del hierro del inducido bajo los dientes,se tiene: $S_{ya} = l_n \cdot d_{ya}$

Por otro lado,se deduce de la fig.10 que: $d_{ya} = (D - 2^{ds}) - D_i$

Donde Di es el diámetro interior del inducido cuyo valor lo fija el diámetro del eje.

En los cálculos preliminares de ste trabajo ya se determinó el diámetro del eje,y por lo mismo,se puede asignar un valor para D_i;2 pulg. Partiendo de este dato,d_{ya} vale: $d_{ya} = (D - 2d_s) - D_i$

$$d_{ya} = (12 - 2 \cdot 1,27) - 2 = 7,46 \text{ pulg.} \qquad \text{y:}$$

$$B_{ya} = \frac{\phi}{l_n \cdot d_{ya}} = \frac{1035}{3,18 \cdot 7,46} = 50,3 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

La longitud media de la trayectoria del flujo en el yugo del inducido es,según la fig.10:

$$l_{ya} = \frac{\pi \left[D - (2 \cdot d_s + 1/2 \cdot d_{ya})\right]}{2p}$$

Reemplazando los valores pertinentes:

$$l_{ya} = \frac{3,14 \left[12 - (2 \cdot 1,27 + 1/2 \cdot 6,46)\right]}{2 \cdot 4} = 2,45 \text{ pulg.}$$

De la curva de magnetización para el material usado se deduce que:

para $B_{ya} = 50,3$ Kilolíneas/pulg^2 $\quad at_{ya} = 3,1$ amper-vueltas/pulg.

Entonces: $AT_{ya} = 3,1 \cdot 2,45 = 7,6$ Amper-vueltas.

Para otros valores de la tensión inducida:

Tabla "E"

E	250	263	275	300
B_{ya}	47,8	50,3	52,6	57,4
at_{ya}	2,8	3,1	3,3	3,9
AT_{ya}	6,85	7,6	8,08	7,55

Amper-vueltas para el cuerpo polar.-

Debido a que parte del flujo originado en el polo va perdiéndose en distinta trayectorias a todo lo largo de éste,la densidad en él no es constante.El flujo de pérdida,ϕ_l,no puede ser determinado sólo analíticamente,debido a sus muchas y diferentes trayectorias.Es-

te hecho hace que se tome para él un valor porcentual del flujo útil por polo (20% generalmente).

La relación por cociente del flujo total al flujo útil por polo se llama factor de pérdida de flujo, λ.

$$\lambda = \frac{\phi + \phi_1}{\phi} = 1 + \frac{\phi_1}{\phi}$$

Para calcular la densidad de flujo se puede asumir, sin cometer error apreciable, que el flujo en el polo es uniforme e igual a $\phi \cdot \lambda$. Sobre este supuesto, la densidad de flujo en el polo es: $B_p = \phi \cdot \lambda / s_p$. El aréa transversal del polo, s_p, es: $s_p = l_1 \cdot w_p$. ; donde l_1 es la longitud del polo paralela al eje del generador y w_p el ancho del polo.

La densidad de flujo en el polo (B_p) debe ser escogida de tal manera que no sobrepase el punto de saturación de la curva de magnetización del material respectivo. Esto quiere decir, que no debe sobrepasar, para los materiales usados de 100 Kilolíneas/pulg^2.

En la curva de magnetización del material de que se construya el polo se puede ver el valor de los amper-vueltas/pulg. para la inducción fijada. Luego: $AT_p = at_p \cdot l_p$.

La longitud l_p del polo, en el sentido radial del generador, no es conocida y, además, debe ser tal que facilite el espacio requerido para el enrollamiento de campo.

Debido a ello se recurre a un método que da la longitud aproximada del polo, para luego establecer la verdadera. Este método consiste en atribuírse un valor conveniente para la corriente del campo shunt; lo cual puede hacerse, a falta de experiencia en el diseño, con ayuda del nomograma de la fig. 48, pág. 55 del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann. Es te nomograma da valores para la corriente del campo shunt

en porcentaje de la corriente nominal y en fumción de n·Kw.

Luego se asume la densidad de corriente en este mismo enrollamiento, para lo cual también puede utilizarse la Tabla siguiente;

Tabla "F"

V	A_f	Amper-vueltas/pulg. a		
		f_s = 0,40	0,60	0,80
1000	1085	590	670	755
2000	1215	615	727	825
3000	1330	640	768	877
4000	1425	655	795	920
5000	1505	672	825	960
6000	1570	685	845	995
7000	1622	700	865	1080
8000	1670	715	885	1063

Tomada del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann, Tabla V, pág 22.

Conocidos la corriente de campo shunt y la densidad de corriente (i_f y A_f), se puede calcular la sección del conductor requerido.

$$s_f = i_f/A_f \quad pulg^2.$$

Inmediatamente se determina el factor de espacio (f_s) ocupado por el conductor, que es la relación por cociente de la sección neta de cobre al cuadrado del diámetro del conductor con aislante. Con estos valores se puede deducir de la Taba "F", de acuerdo a la velocidad periférica del inducido y al factor de espacio, los amper-vueltas por pulgada.

Por último, si se admite un valor razonable para los amper-vueltas totales por polo (ATP_f) se puede calcular la altura apróximada de la bobina mediante : $h_f = ATP_f/at$ pulg.

Para el cálculo aproximado de ATP_f es necesario estimar el valor de los amper-vueltas por polo para el cuerpo y el yugo polar. Una regla práctica dice que éstos son aproximadamente iguales a 30veces el paso polar ($30\,\tau$) para plena carga. Luego: $ATP_f = AT_g + AT_t + AT_{ya} + 30\,\tau$.

A la altura de la bobina de campo shunt (h_f) hay que añadir el espacio suficiente para aislamiento y tolerancias; él que usualmente es de 0,1 a $0{,}15\cdot\tau$, a fin de obtener la longitud radial del polo.

$$l_p = h_f + (0{,}1 \text{ a } 0{,}15\cdot\tau)$$

Efectuando estos cálculos para el generador en estudio se tiene:

$$\lambda = \frac{\phi + \phi_1}{\phi} = \frac{100 + 20}{100} = 1{,}2$$

es decir que se adopta para el flujo de pérdida el 20% del flujo útil.

La longitud axial del polo se toma igual a la del inducido. Es decir: $l_1 = 4$ pulg.

Considerando que los polos serán laminados se asume para B_p el valor 85 Kilolíneas/pulg^2. Entonces, el área transversal del cuerpo polar es: $s_p = \phi\cdot\lambda/B_p = 1035\cdot 1{,}2/85 = 14{,}6$ pulg.

y el ancho del polo: $w_p = s_p/l_1 = 14{,}6/4 = 3{,}65$ pulg.

Se usará $w_p = 3{,}7$ pulg.

La densidad de flujo correcta es:

$$B_p = \frac{\phi\cdot\lambda}{l_1\cdot w_p} = \frac{1035\cdot 1{,}2}{4\cdot 3{,}7} = 83{,}8 \text{ Kilolíneas/pulg}^2.$$

De la Tabla "F" se deduce por interpolación que, para: $v = 5420$ pies/min. $A = 1532$ amp/pulg^2. Por otro lado, del nomograma de la fig. 48, pág. 55 del "Desing of Electrical Apparatus" se obtiene:

para $n\cdot Kw = 4{,}31\cdot 10^4$; $i_f = 1{,}52\%\ I_n$. o sea:

$$i_f = 1{,}52\cdot 100/100 = 1{,}52 \text{ amp.}$$

A fin de obtener de este cálculo previo un espacio olgado para la bobi-

na de campo shunt,se admite $i_f = 1,75$ amp.La sección del conductor es:

$$s_f = i_f/A_f = 1,75/1532 = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{pulg}^2.$$

Se escoge conductor redondo de cobre calibre 18,que tiene 0,00126 pulg^2 de sección,con aislamiento doble de esmalte (Heavy Formvar) cuyo diámetro con aislante es 0,0436 pulg.El factor de espacio es:

$$f_s = \frac{s_f}{d_f^2} = \frac{1,26 \cdot 10^{-3}}{(4,36 \cdot 10^{-2})^2} = 0,663.$$

La tabla "F" da los amp-vueltas/pulg. para este f_s y son,interpolando para la velocidad y el factor de espacio correctos:

$$at_p = 878 \text{ amp-vueltas/pulg.}$$

Los amper-vueltas totales/polo son:

$$ATP_f = AT_g + AT_t + AT_{ya} + 30 \cdot \tau = 2185 + 242 + 7,6 + 30 \cdot 9,43 = 2718 \text{ Ampvuelt.}$$

Con lo cual,la altura radial del polo es:

$$l_p = \frac{ATP_f}{at} + 0,10 \cdot \tau = \frac{2718}{878} + 0,10 \cdot 9,43 = 4,033 \text{ pulg.}$$

Se escoge $l_p = 4$ pulg. = 100,3 mm.

El material del cual se construirán los polos es,como más adelante se explica detenidamente,de chapas de acero al silicio (1% de Si) calibre 24 (0,0250 pulg. de espesor).La curva de magnetización de este material lo suministra J.H. Kuhlmann en el Appendix 4 de su obra.

De la curva nombrada se obtiene que los amper-vueltas/pulg. correspondientes a la inducción respectiva (83,8 Kilolíneas/pulg^2) son: $at_p = 14,5$ amper-vueltas/pulg. Por lo tanto:

$$AT_p = 14,5 \cdot 4 = 58 \text{ amper-vueltas.}$$

Para otros valores de la tensión inducida:

Tabla "G"

B	250	263	275	300
B_p	80	83,8	88	96
at_p	11,5	14,5	21,5	47
AT_p	46	58	86	188

Diámetro interior del yugo polar.-

El diámetro interior del yugo de campo es:

$$D_{yi} = D + 2\cdot\delta + 2\cdot l_p \qquad \text{(ver fig.10)}$$

Reemplazando valores: $D_{yi} = 12 + 0,30 + 4\cdot 2 = 20,3$ pulg. = 515 mm.

Amper-vueltas para el yugo polar.-

De la fig.10 se desprende que el flujo llevado por cada sección del yugo es igual a $1/2\ \phi\cdot\lambda$. Luego, la densidad en el yugo es:

$$B_{yf} = \phi\cdot\lambda / s_{yf}$$

s_{yf}, el área transversal del yugo vale: $s_{yf} = l_2\cdot d_{yf}$; en donde l_2 es la longitud axial del yugo y d_{yf} el doble de la longitud radial del yugo.

El espesor o longitud radial del yugo debe ser lo suficientemente grande para dar al armazón la resistencia mecánica necesaria, y para obtener una sección transversal que no produzca altas densidades de flujo innecesarias. Además, como el yugo también debe llevar el flujo producido por los polos auxiliares se deben escoger densidades muy bajas. En el caso presente, el yugo se hará de acero fundido. La inducción en yugos polares de este material se recomienda no pase de 65 Kilolíneas por pulgada cuadrada.

Con el fin de no obtener una sección transversal innecesariamente grande, se adopta este valor para B_{yf}.

En el caso del generador en diseño, y para proteger a las bo-

binas de campo se hace la longitud axial del yugo con una extensión de 2,5 pulg.,en cada lado,mayor que el ancho del polo.Es decir: $l_2 = 9$ pulg

Luego:
$$d_{yf} = \frac{\phi \cdot \lambda}{B_{yf} \cdot l_2} = \frac{1035 \cdot 1,2}{65 \cdot 9} = 2,12 \text{ pulg.}$$

Como d_{yf} es el doble de la altura radial del yugo,ésta es 1,06 pulg. Se esgoje: 1 pulg. 1/8.

Debido a la alta resistencia del material no es necesario efectuar el cálculo de comprobación de la sección transversal del yugo polar contra el esfuerzo cortante al que le someten el peso de los polos y el de los enrollamientos.

Diámetro exterior del yugo polar.-

Es: $D_{yo} = D_{yi} + d_{yf} = 20,3 + 2,1 = 22,4$ pulg. = 568 mm.

La longitud promedio del circuito magnético en el yugo polar se toma sobre la circumferencia media y es:
$$l_{yf} = \frac{(D_{yf} + 1/2 \cdot d_{yf})}{2p} = \frac{(20,3 + 1,05)3,14}{2 \cdot 4} = 8,39'' \text{ (ver fig.10)}$$

Los amper-vueltas/pulg. de trayectoria del flujo se sacan de la curva de saturación del material (acero fundido) para la inducción dada,que suministran las casas fabricantes y que ha compilado J.H. Kuhlmann en el Appendix 1 de su obra:

Para $B_{yf} = 66$ Kilolíneas/pulg^2. ; $at_{yf} = 19,5$ amper-vueltas/pulg.

y: $AT_{yf} = 19,5 \cdot 8,39 = 166$ amper-vueltas.

Para otros valores de la tensión inducida:

Tabla "H"

E	250	263	275	300
Byf	62,7	66	69	75,3
at_{yf}	18	19,5	22	27,5
AT_{yf}	152	166	185	231

Los amper-vueltas totales por polo (para todo el circuito magnético) se obtienen sumando los resultados parciales anteriores y son:

Tabla "I"

E	250	263	275	300
AT_t	153	242	356	725
AT_g	2075	2185	2290	2490
AT_{ya}	7	8	8	10
AT_p	46	58	86	188
AT_{yf}	152	166	185	231
ATP	2583	2922	3200	3944

DISEÑO DEL ENROLLAMIENTO DE CAMPO.-

Para el diseño del enrollamiento de campo hay que tomar en cuenta el efecto que sobre el flujo inductor causa la reacción del inducido.

La reacción del inducido no es más que los efectos debidos a la aparición de un campo magnético,transversal al campo inductor,en el inducido.Este campo se origina debido a la circulación de corriente a través de los devanados del inducido,al conectarse cargas al generador.Estos efectos son los siguientes:

1.- El vector inducción de este campo electromagnético forma,juntamente,con el vector inducción del campo originado por los polos principales un momento de torsión,él que debe contrarestar el momento de torsión cedido al generador por la máquina motriz (turbina,motor,etc.)

2.- Produce una desviación del flujo inductor,lo cual,a su vez,causa la desviación de la línea neutra de su posición a circuito abierto. Este efecto es neutralizado por el campo creado por los polos auxilia-

res y se tomará en cuenta al diseñar éstos.

3.- Causa una disminución parcial del flujo inductor bajo los polos ya que su flujo tiene una trayectoria contraria a la de áquel en el borde de la zapata polar llamada de ataque (ver fig.11).Este efecto se llama demagnetizánte.

El campo magnético transversal del inducido es creado por los amper-vueltas del inducido que están fuera de la zona de la posición de la línea neutra a circuito abierto;pero el efecto demagnetizante obedece sólo a los amper-vueltas del inducido que están bajo los polos,ya que el flujo creado por el resto puede ser desechado debido a su trayectoria muy larga por el aire.

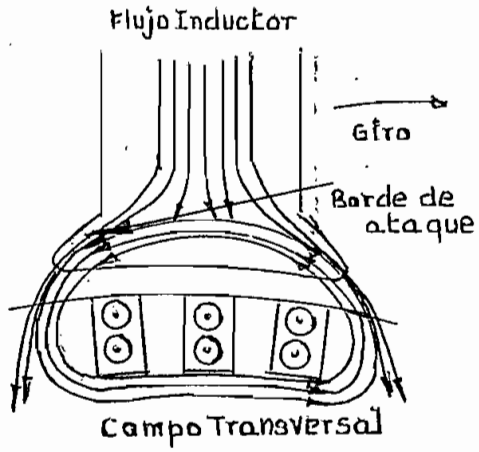


FIG 11

De este razonamiento se desprende que los amper-vueltas por polo que crean el campo transversal del inducido son:

$$ATP_c = 1/2\ \tau \cdot f_d \frac{I_a \cdot N}{a \cdot \pi \cdot D}$$

ya que el número de espiras es: N/2;y el valor de la corriente que pasa por ellas : I_a/a.Por lo mismo,el numero de amper-vueltas por pulg. de periferie del inducido es: $\frac{1}{2} \cdot \frac{I_a \cdot N}{a \cdot \pi \cdot D}$

Como se considera solamente la zona periférica bajo un polo son: $\tau \cdot f_d$ pulg./polo.Recordando que: $\tau = \pi \cdot D/p$ se tiene:

$$ATP_c = \frac{f_d \cdot \pi \cdot D \cdot I_a \cdot N}{2 \cdot p \cdot a \cdot \pi \cdot D}$$

y teniendo en cuenta que: $ATP_a = \frac{\pi \cdot D \cdot I_a \cdot N}{2 \cdot p \cdot a \cdot \pi \cdot D}$

siendo ATP_a, como se explicó anteriormente, los Amper-vueltas del inducido por polo: $ATP_c = f_d \cdot ATP_a$.

Cálculo de los Amper-vueltas por polo necesarios para neutralizar el el efecto demagnetizante.-

El flujo que produce el efecto demagnetizante entra en sentido contrario al del inductor en el borde de ataque del polo y sale en el mismo sentido por el borde de salida (ver fig. 11). Debido a que la tensión, luego del punto de saturación, no es una función lineal de los amper-vueltas; el decremento de tensión producido por el efecto demagnetizante en el borde de ataque del polo es mayor que el incremento producido por ese mismo efecto en el borde de salida.

El cálculo de los amper-vueltas por polo necesarios para neutralizar el efecto demagnetizante se realiza gráficamente en la curva de la "Característica en vacío del generador" y es el siguiente:

Se traza la curva de saturación del generador a circuito abierto, que es sensiblemente igual a la Característica en vacío del mismo, utilizando los valores de la Tabla "I". La fig. 12 (de la pág. siguiente) da dicha curva.

En esa fig., OE es la tensión inducida a plena carga (263 V) y OF es el correspondiente número de amper-vueltas por polo, sin tomar en consideración el efecto del campo transversal del inducido. Así pues, el segmento de curva ad representa la distribución de la tensión debajo de un polo con carga, la cual es proporcional al flujo. Si la tensión producida por el generador fuera constante, estaría representada por una recta tal como la bc; luego la superficie del rectángulo hbci es proporcional al flujo y, por lo mismo, se puede decir que si no se quiere

CURVA DE SATURACION DEL GENERADOR A VACIO

GENERADOR DE C.C. DE 25 KW. 250 V. 1725 RPM.

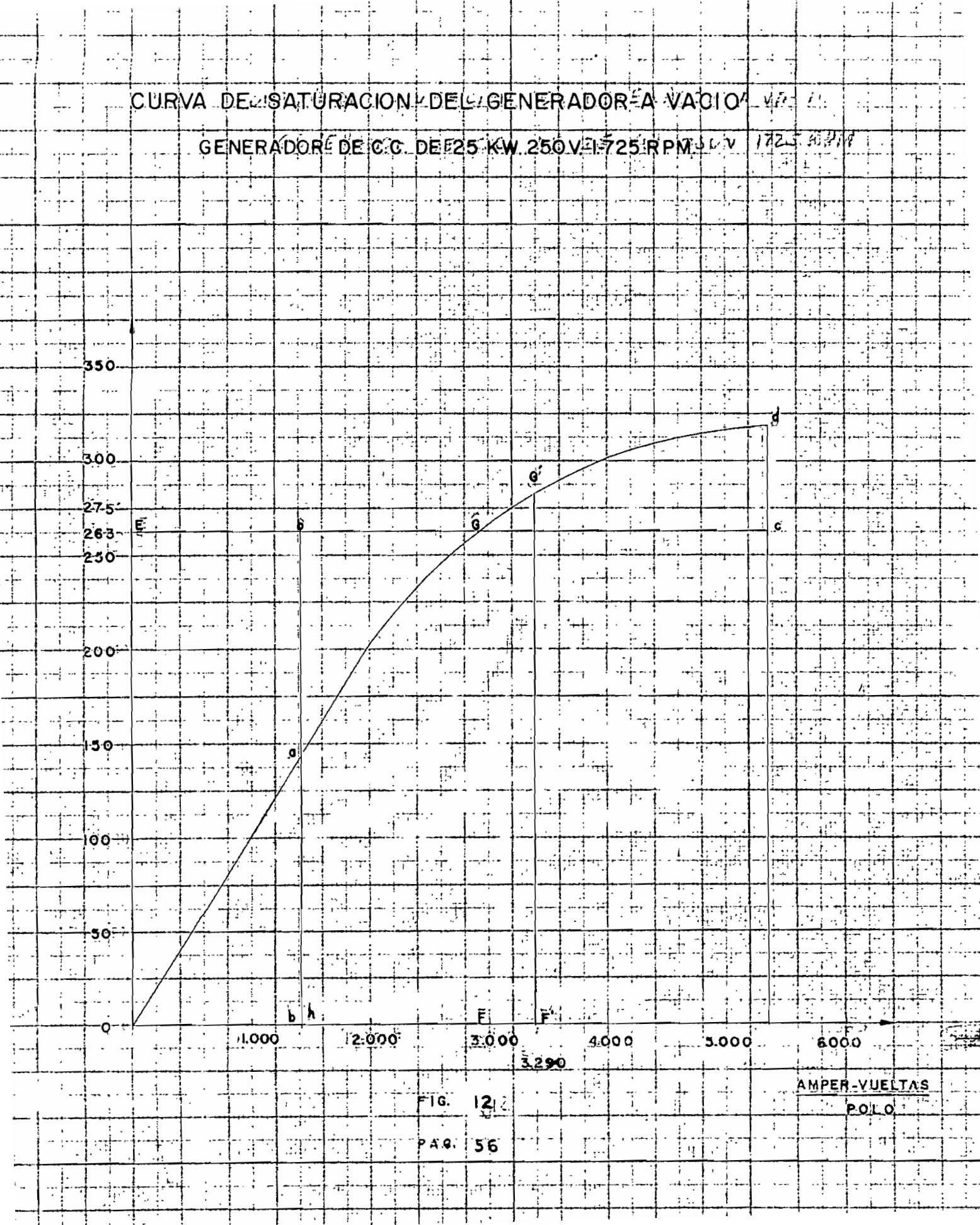


FIG. 12

PAG. 56

que la cantidad de flujo necesaria para engendrar la tensión OE varíe se debe mantener constante esta superficie.

De lo dicho se desprende que las superficies hadi y hbci deben ser iguales y,lógicamente,también las abG y cdG.Para lograr esto se toma un segmento de línea horizontal,bc,a la altura de la tensión inducida a plena carga e igual a $2 \cdot f_d \cdot ATP_a$ en la escala correspondiente,este segmento se mueve horizontalmente hasta obtener que las áreas abG y cdG sean iguales.La perpéndicular a bc que corta este segmento en dos partes iguales FG' da la tensión que debe ser inducida en el enrollamiento del inducido a plena carga,cuando las escobillas están en la linea neutra a vacío a fin de mantener constante la tensión a los bornes. OF' es el número correspondiente de Amper-vueltas por polo y OF'-OF es el número de Amper-vueltas necesarios para neutralizar el efecto demagnetizante.

En el caso presente: $bc = 2 \cdot f_d \cdot ATP_a = 2 \cdot 0,675 \cdot 2907 = 3924$ ampvuel/polo

Trazando esta línea a la escala del dibujo se logra hacer iguales estas áreas para la posición de bc dibujada,lo cual se ha comprobado por medio de un planímetro.OF'-OF se mide a escala y es:

$$OF'-OF = 3290 - 2922 = 368 \text{ amper-vueltas/polo.}$$

El generador de C.C, en estudio se diseñará con excitación compound acumulativa de tensión constante.Es decir debe tener dos campos inductores;el uno en derivación con el inducido y el otro en serie con el mismo,por ser acumulativo ambos enrollamientos deben devanarse en el mismo sentido.El campo shunt debe ser tal que mantenga la tensión constante tanto a plena carga como a vacío,por lo tanto el número de amper-vueltas por polo para este campo es el mismo que el requerido para la tensión a los bornes a circuito abierto(2680 amper-vueltas/polo.).

El campo serie debe tener el número de amper-vueltas necesarios para inducir la tensión que se pierda en las caídas de voltaje en los enrollamientos del inducido,de este mismo campo,de los polos auxiliares y en los contactos de las escobillas y,además,el número de amper-vueltas para vencer el efecto demagnetizante del campo magnético transversal del inducido.

Diseño del enrollamiento de campo shunt.-

En el caso presente los amper-vueltas/polo del campo shunt son $ATP_f = 2680$ amper-vueltas/polo (ver fig. 12).

La forma de construcción adoptada para los polos principales y,sus enrollamientos,es la que se aprecia en la fig. 13 que da la vista frontal y un corte transversal de ellos.Es decir se ha previsto un ducto de ventilación entre las dos mitades del enrollamiento de campo shunt y el enrollamiento de campo serie está devanado encima del anterior.

La longitud de vuelta promedio del enrollamiento de campo shunt es,según se desprende de la fig.13:

$$L_f = 2(l_1 + w_p - 2w_{d1} - w_{d2}) + \pi (d_f + 2w_{d1} + w_{d2} + 3/16)$$

Donde 3/16 pulg. es el valor de la tolerancia necesaria para el aislamiento entre el hierro del polo y las bobinas y,entre ellas.

La resistencia del enrollamiento de campo shunt es:

$$R_f = \frac{L_f \cdot t_f \cdot p \cdot r}{s_f \cdot 10^6}$$

t_f = Núm. de vueltas/polo.

p = Núm. de polos.

s_f = Sección del conductor.

$r/10^6$ = Resistencia específica del cobre a una temperatura dada.

La corriente que circula por este enrollamiento es: $i_f = E_f/R_f$;donde E_f es la tensión aplicada a este bobinado.Para generadores el enrollamiento de campo shunt se diseña,generalmente,para una tensión que fluctúa entre el 70 u 80% de la tensión nominal,dejando el resto para que consuma

el reóstato de camposhunt para fines de regulación.

$$E_f = E_n(0,7 \text{ a } 0,8)$$

Tomando en cuenta este valor y el de R_f:

$$i_f = \frac{E_n(0,7 \text{ a } 0,8)s_f \cdot 10^6}{L_s \cdot t_f \cdot p \cdot r}$$

Como $i_f \cdot t_f = ATP_f$;

$$s_f = \frac{ATP_f \cdot L_f \cdot p \cdot r}{E_n(0,7 \text{ a } 0,8)10^6}$$

En el caso del generador en diseño para calcular la longitud de vuelta promedio hace falta atribuírse valores provisionales para la altura de la bobina (d_f) y el ancho de los ductos (w_{d1} y w_{d2}) que no se conocen. Tomando $w_{d1} = 1/3$ pulg., $w_{d2} = 1/2$ pulg. y $d_f = 3/4$ pulg. se tiene:

$$L_f = 2(4 + 3,7 - 2/3 - 1/2) + 3,14(3/4 + 2/3 + 1/2 + 3/16)$$

$$L_f = 20,93 \text{ pulg.}$$

El área transversal del conductor de campo shunt es:

$$s_f = \frac{2680 \cdot 20,93 \cdot 4 \cdot 0,826}{250 \cdot 0,75 \cdot 10^6} = 0,00099 \text{ pulg}^2.$$

Donde se ha tomado el valor para r correspondiente a 75° C. (0,826) que se admite es la temperatura de trabajo de los enrollamientos del generador, según las normas de la A.I.E.E. Se escoje para este enrollamiento, alambre de cobre de sección transversal circular de 0,00102 pulg^2. que corresponde al calibre # 19. Este alambre irá provisto de un aislante de doble capa de esmalte (Heavy Formvar) que se considera suficiente para la tensión que debe soportar.

La densidad de corriente en este enrollamiento se considera 1532 Amp/pulg^2., es decir la misma que se tomó en el diseño preliminar. La corriente que circula por este enrollamiento es, entonces:

$$i_f = 1532 \cdot 0,00102 = 1,56 \text{ Amp.}$$

Para este valor de i_f, el número de vueltas del campo shunt es:

$$t_f = ATP_f/i_f = 2680/1,56 = 1720 \text{ vueltas.}$$

Dimensiones definitivas del enrollamiento de campo shunt.-

La altura definitiva o longitud radial de la bobina es:

$$h_f = ATP_f/at$$

donde at es el número de amper-vueltas/pulg. que se puedendeducir, interpolando para la velocidad y el factor de espacio correctos, de la Tabla "F". El factor de espacio, para el conductor escogido, es:

$$f_s = \frac{s_f}{d^2} = \frac{10,2 \cdot 10^{-4}}{(3,91 \cdot 10^{-2})^2} = 0,67$$

siendo 0,0391 el diámetro del conductor con aislamiento. Para este factor de espacio la Tabla "F" da: at = 837 amp-vuelt/pulg.

$$h_f = 1720/837 = 2,06 \text{ pulg.}$$

a fin de evitar un valor excesivo del espesor de la bobina de campo shunt (d_f), y considerando que la altura radial del polo (l_p) es 4 pulg., se toma h_f = 3 pulg.

La sección transversal de la bobina de campo shunt es:

$$1720 \cdot 0,0391^2 \text{pulg}^2 = 2,63 \text{ pulg}^2$$

y:

$$d_f = 2,63/3 = 0,875 \text{ pulg.}$$

El número de espiras o vueltas por capa es:

$$3/0,0391 = 76 \text{ vueltas/capa.}$$

Debido a que el espacio necesario para que el alambre pase de una capa a otra es igual una vuelta, el número real de vueltas/capa es 75. Entonces el número de capas debe ser: 1720/75 = 23 capas.

Considerando el valor definitivo de d_f, la longitud de vuelta promedio verdadera es:

$$L_f = 2(4 + 3,7 - 2/3 - 1/2) + \pi (0,88 + 2/3 + 1/2 + 3/16)$$

$$L_f = 21,34 \text{ pulg.}$$

El aislamiento entre la bobina del campo shunt y el cuerpo polar se lo hará con una caja de fibra de un doceavo de pulg. de espesor y cuya forma se aprecia en la fig.13.

Resistencia de la bobina de campo shunt.-

Como se dijo anteriormente,la temperatura de funcionamiento de los enrollamientos es de 75° C. para plena carga según las normas A. I.E.E.Por lo mismo la resistencia debe calcularse para esta temperatura.

$$R_f = \frac{L_f \cdot t_f \cdot p \cdot r}{s_f \cdot 10^6} = \frac{21,34 \cdot 1720 \cdot 4 \cdot 0,826}{0,00102 \cdot 10^6} = 119 \text{ ohms.} \qquad r = 0,826$$

Pérdida en el cobre del enrollamiento shunt.-

Es: $w_f = i_f^2 \cdot R_f = 119 \cdot 1,56^2 = 290$ watt.

Incremento de temperatura en el enrollamiento shunt.-

A fin de comprobar la bondad del diseño del enrollamiento de campo shunt,se debe realizar el cálculo del incremento de temperatura en él mismo.Este cálculo se realiza apartir de una fórmula empírica recomendada por la experiencia y,que está en función de la superficie de ventilación por wattio de pérdida.

La superfivie de ventilación de una bobina cuya forma es como la adoptada se considera igual a: $S_f = 2(d_f + h_f)L_f \cdot p + 1/2\ p \cdot S_d$ (ver pág. 89 del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann);en esta fórmula S_d es la superficie del ducto de ventilación que,según la fig.13 vale:

$$1/2\ S_d = \frac{(w_p + d_f/2)h_f + (w_p - 2w_{d2})h_f + (w_p + d_f/2 + w_p - 2\ w_{d2})w_{d2}}{2}$$

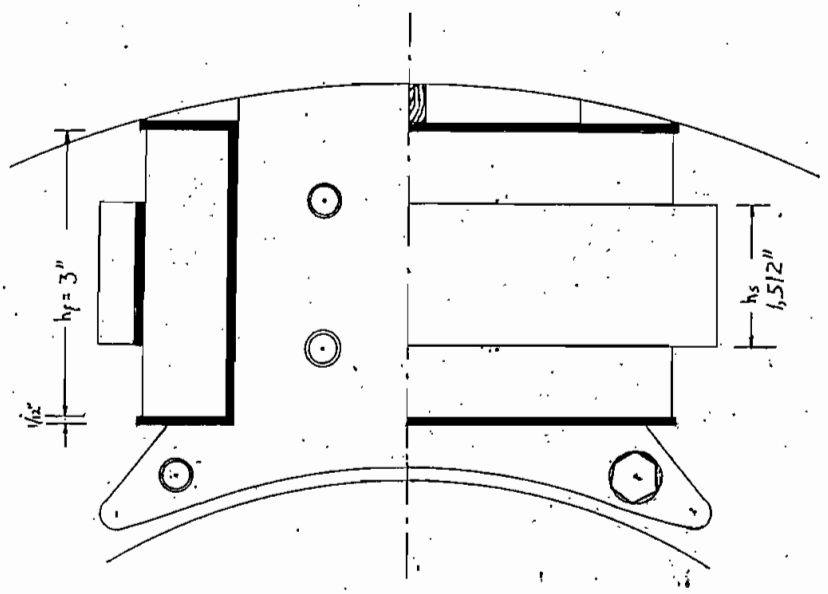
$$1/2\ S_d = \frac{(h_f + w_{d2})(2w_p + d_f/2 - 2w_{d2})}{2}$$

Reemplazando los valores respectivos:

$$1/2\ S_d = \frac{(2,9 + 0,5)(2 \cdot 3,7 + 0,88/2 - 2 \cdot 0,5)}{2} = 11,7 \text{ pulg}^2$$

POLO PRINCIPAL Y ENROLLAMIENTOS

GENRADOR DE C.C.,25 KW,250 V,1725 R.P.M.



VISTA

ESCALA 1/2 : 1

CORTE

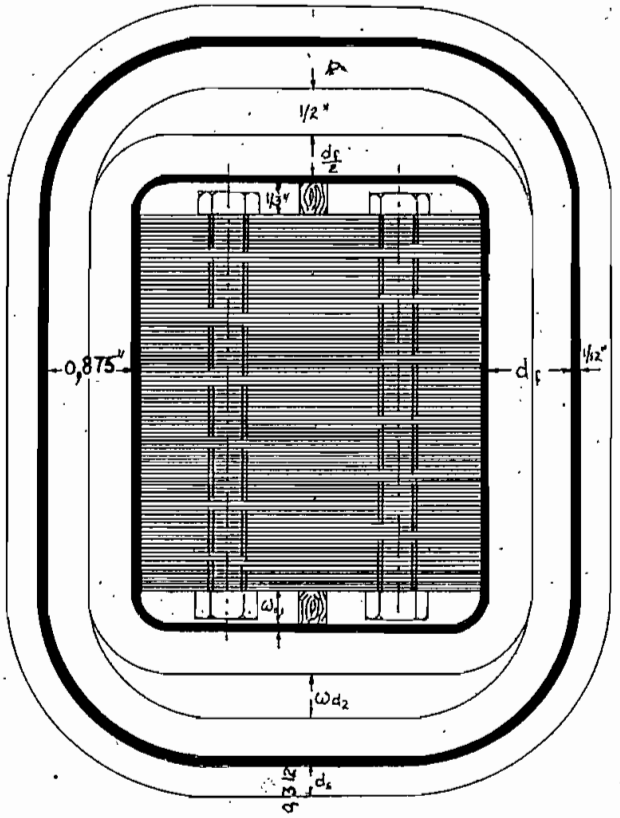


FIG. 13

y: $S_f = 2(0,88+2,9)21,34 \cdot 4 + 4 \cdot 11,7 = 712$ pulg^2.

Esta superficie debe evacuar todo el calor correspondiente a toda la energía perdida por efecto Joule en los polos principales.

El incremento de temperatura se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$T_f = \frac{C_{cf}}{S_f/w_f} \ ^o C.$$

En donde: $C_{cf} = C_c + 35(1 - f_s)d_f$; f_s es, como ya se anotó, el factor de ocupación del conductor, C_c es un coeficiente de ventilación que varía con la velocidad del inducido. Kuhlmann da en la fig. 62, pág. 88 de su obra un nomograma de C_c en función de la velocidad periférica del inducido. En el caso presente, para v = 5420 pies/min. el valor correspondiente de C_c es 72.

$$C_{cf} = 72 + 35(1 - 0,663)0,886 = 82,1$$

Luego:
$$T_f = \frac{C_{cf} \cdot w_f}{S_f} = \frac{82,1 \cdot 290}{712} = 33,4^o \ C.$$

Valor perfectamente aceptable, ya que según los Estandars de la A.I.E.E. para enrollamientos con aislamiento de la Clase A (ver pág. 127, Tabla IX "Desing of Electrical Apparatus") el incremento de temperatura permisible es 40° C.

Peso del cobre del campo shunt.-

El peso del enrollamiento de campo shunt se puede calcular con la siguiente fórmula: $G_f = L_f \cdot t_f \cdot p \cdot S_f \cdot 0,321$ lbs.

Donde 0,321 lbs/pulg^3. es el peso específico del cobre. Para el generador en diseño: $G_f = 21,34 \cdot 1720 \cdot 4 \cdot 0,00102 \cdot 0,321 = 48,1$ lbs.

DISEÑO DEL ENROLLAMIENTO DE CAMPO SERIE.-

Amper-vueltas de campo serie.-

La bobina de campo serie irá devanada sobre la bobina de campo shunt, como se aprecia en la fig. 13, y separada de ésta por fibra aislan-

te de 1/12 de pulg. de espesor que se considera suficiente.La fijeza mécánica se conseguirá por medio de las cuñas necesarias.

El número de amper-vueltas del campo serie,como se dijo anteriormente,es igual al número total de amper-vueltas/polo que da el gráfico de la curva de saturación del generador a circuito abierto menos los amper-vueltas del campo shunt.De la fig. 12 se desprende:

$OF' - ATP_f = 3290 - 2680 = 610$ amper-vueltas/polo.

Número de vueltas del campo serie.-

El número de vueltas del campo serie es: $t_S = ATP_S/I_S$

La corriente del campo serie,I_S,es igual a la corriente (I_n) del circuito exterior cuando el reóstato de campo shunt,que se utiliza para su regulación,está cortocircuitado;y es igual a la corriente total del inducido I_a cuando se utiliza todo el reóstato.Para el cálculo se utiliza la corriente I_n que es la menor,para tener un margen de seguridad.

$$t_S = ATP_S/I_S = 610/100 = 6{,}1 \text{ vueltas.}$$

Se usará $t_S = 6$ vueltas con lo que los ATP_S definitivos son:

$$ATP_S = 100 \cdot 6 = 600 \text{ amper-vueltas.}$$

Area transversal del conductor de campo serie.-

El área transversal del conductor de campo serie es: $s_S = \frac{I_S}{A_S}$

Para la densidad de corriente(A_S) en los conductores del campo serie no siempre se puede escoger un valor tal alto como el incremento de temperatura lo permita,ya que,en la generalidad de los casos,el factor limitante es el rendimiento.Para geheradores con enrollamiento de campo tipo compound,como en el caso presente,recomienda la práctica dar a A_S valores ligeramente superiores que los que da a A_f la Tabla "F".

Si se toma para As 1600 amp/pulg^2.: $s_S = 100/1600 = 0{,}0625$ pulg^2.

Se usará conductor de cobre de sección rectangular con aislamiento de doble capa

de algodón (Double Cotton covered Ribbon) de una sección transversal de 0,0628 pulg^2.,y que tiene las siguientes dimensiones:

	Conductor desnudo	Con aislamiento
ancho =	0,289 pulg.	0,312 pulg.
espesor =	0,229 pulg.	0,252 pulg.

El espesor del aislamiento 0,023 pulg. es perfectamente satisfactorio. La densidad de corriente definitiva es: $A_s = I_s/s_s = 100/0,0628 =$ $= 1590$ Amp/pulg^2.El conductor se devanará sobre su lado más angosto,por lo tanto,el espesor de la bobina de campo serie es: $d_s = 0,312$ pulg. La altura del enrollamiento serie es: $h_s = 6 \cdot 0,252 = 1,512$ pulg.

Longitud de vuelta promedio de la bobina de campo serie.-

De la fig.13 se deduce que la longitud de vuelta promedio de la bobina de campo serie vale:

$$L_s = 2\left[l_1 - 2(w_{d1} + w_{d2}) + w_p\right] + 2\cdot\pi(d_f + w_{d2} + w_{d1} + d_s/2 + 3/32)$$

3/32 es la tolerancia para el aislamiento entre las bobinas shunt y serie.En el caso de la dínamo en estudio se tiene:

$$L_s = 2\left[4 - 2(1/3 + 1/2) + 3,7\right] + 2\cdot 3,14(0,88 + 1/2 + 1/3 + 0,312/2 + 3/32)$$

$$L_s = 24,3 \text{ pulg.}$$

Resistencia del enrollamiento de campo serie.-

Es:
$$R_s = \frac{l_s \cdot t_s \cdot p \cdot r}{s_s \cdot 10^6} = \frac{24,3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 0,826}{0,0628 \cdot 10^6} = 0,0077 \text{ ohms.}$$

La pérdida en el enrollamiento de campo serie es:

$$w_s = I_s^2 \cdot R_s = 100^2 \cdot 0,0077 = 77 \text{ watt.}$$

Peso del cobre del campo serie.-

El peso del cobre del enrollamiento de campo serie es:

$$G_s = L_s \cdot t_s \cdot p \cdot s_s \cdot 0,321 = 24,3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 0,0628 \cdot 0,321 = 11,8 \text{ lbs.}$$

Caída de tensión en el enrollamiento de campo serie.-

Es: $I_s \cdot R_s = 100 \cdot 0{,}00798 = 0{,}798$ volt.

O,en porcentaje de la tensión nominal: $100 \cdot 0{,}798/250 = 0{,}319\%$.

DISEÑO DEL REOSTATO DE CAMPO SHUNT.-

El reóstato de campo shunt sirve para hacer un ajuste correcto entre las intensidades inductoras en serie y en derivación cuando la dínamo se pone en marcha y durante su funcionamiento con carga.

Su cálculo se realiza mediante el siguiente método gráfico: En la fig.14,que es la curva de saturación a circuito abierto del generador en diseño,con la tensión a los bornes expresada en porcentaje de la tensión nominal.En ella se ve que la tensión máxima que se puede inducir en el generador es $E_m = 330$ volt = 132% de la tensión nominal;esto sucedería al estar el reóstato completamente cortocircuitado,es decir cuando la resistencia del circuito inductor shunt es tan sólo la de este enrollamiento.Dibujando a una escala cualquiera (comveniente) el valor resistivo del enrollamiento shunt,se traza por este punto una línea horizontal que es la "Línea de resistencia del Campo Shunt".En la fig.,oa es el valor de la resistencia del enrollamiento shunt (119 ohms) ab es la Línea de resistencia del enrollamiento de campo shunt.La diagonal que une el origen con el punto de la curva A correspondiente a E_m (punto c) intercede la línea ab en el punto f cuya ordenada es el valor de la resistencia del reóstato necesaria para obtener la tensión a los bornes E_m y que,lógicamente,es R_f.Por el punto f se traza la vertical fd Para otros valores de la tensión a los bornes se dibujan las diagonales entre el origen y los puntos correspondientes a esas tensiones.Estas diagonales interceden con la vertical fd en distintos puntos cuyas ordenadas dan los valores resistivos del circuito shunt (R_f más la resistencia del reóstato) para las tensiones respectivas.

La curva B (ver fig14) llamada curva de la Resistencia de Campo se obtiene uniendo los puntos de intersección de las verticales bajadas de puntos de la curva A,correspondientes a diferentes tensiones,con las horizontales correspondientes a los puntos que dan las resistencias necesarias para esas tensiones.Substrayendo el valor de Rf de los valores,en cada punto,resistivos de la curva de Resistencia de Campo se puede dibujar la Curva de resistencia del Reóstato,que para el caso del generador en diseño lo da la fig. 15.

A partir de esta curva se hace la división del reóstato en tramos,de tal forma que el aumento o disminución de cualquiera de ellos produzca una variación de tensión conveniente.Tomando esto en cuenta se puede reemplazar la escala de tensión por una en que conste el numero total de tramos.Debido a la forma de la Curva de resistencia del Reóstato, los tramos no pueden tener el mismo valor resistivo.

Para efectuar la división arriva nombrada,en la práctica,se divide la curva ya enumciada en varios segmentos;en cada uno de los cuales se supone guarden la misma proporción la resistencia y la tensión. El valor resistivo de cada tramo se obtiene dividiendo,en cada segmento, el incremento de resistencia para el número de tramos.En el caso presente se ha dividido la Curva de resistencia del reóstato (ver fig. 15) en 9 segmentos limitados por x;y se ha repartido la variación total de tensión en 50 tramos.

El cálculo de la resistencia de los diferentes tramos lo resume el cuadro de la página siguiente.

Haciendo un gráfico enque representen las ordenadas la resistencia de cada tramo y las absisas el número de tramos se obtiene "La c curva equivalente de resistencia del reóstato que,para el generador en,

CONSTRUCCION DE LA CURVA DEL REOSTATO DE CAMPO

GENERADOR DE C.C., 25 [illegible], 250 V, 1725 RPM

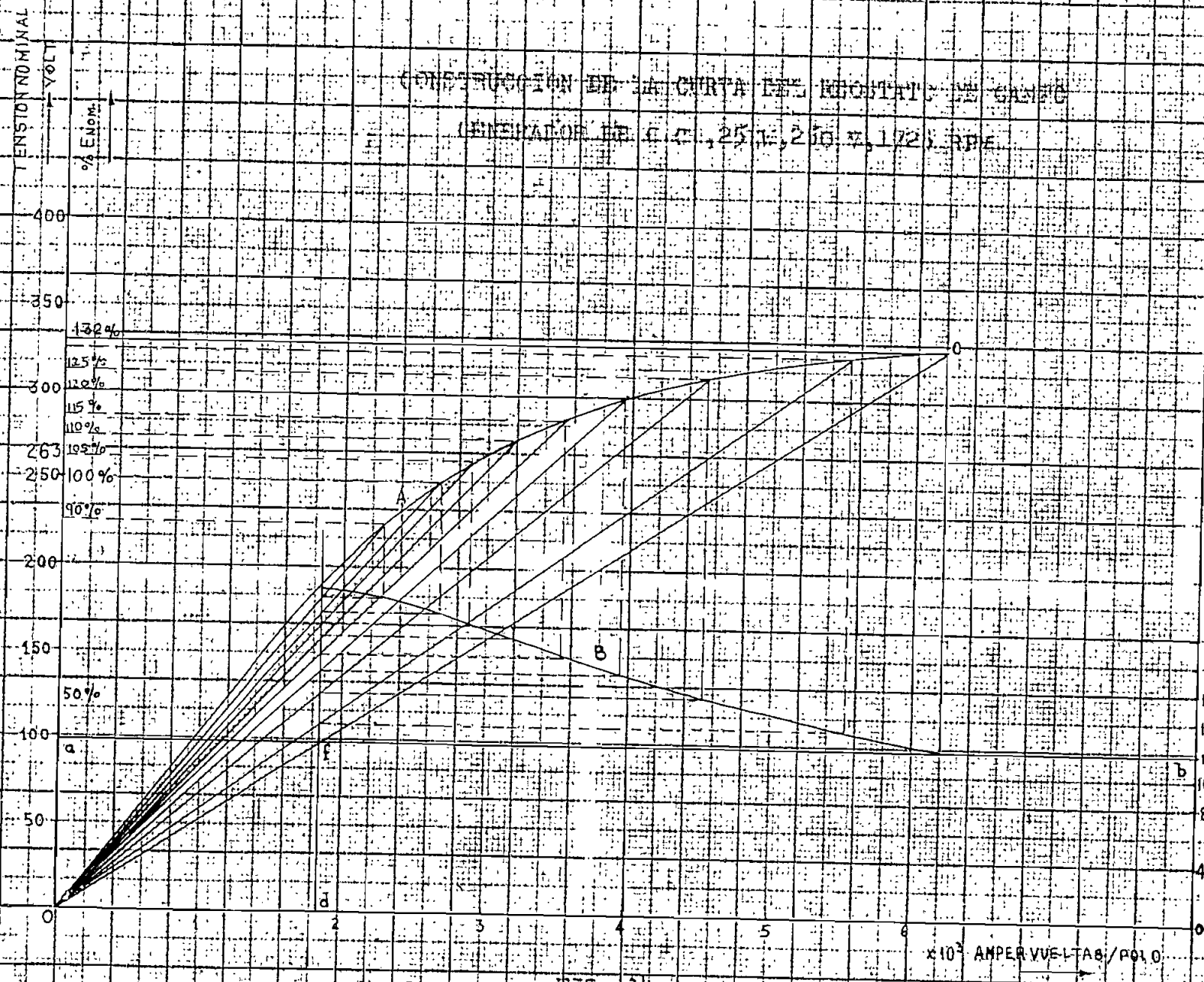


FIG. 14

PAG. 68

CURVA DE RESISTENCIA DEL REOSTATO

GENERADOR DE C.C., 25 KW, 250 V, 1725 R.P.M.

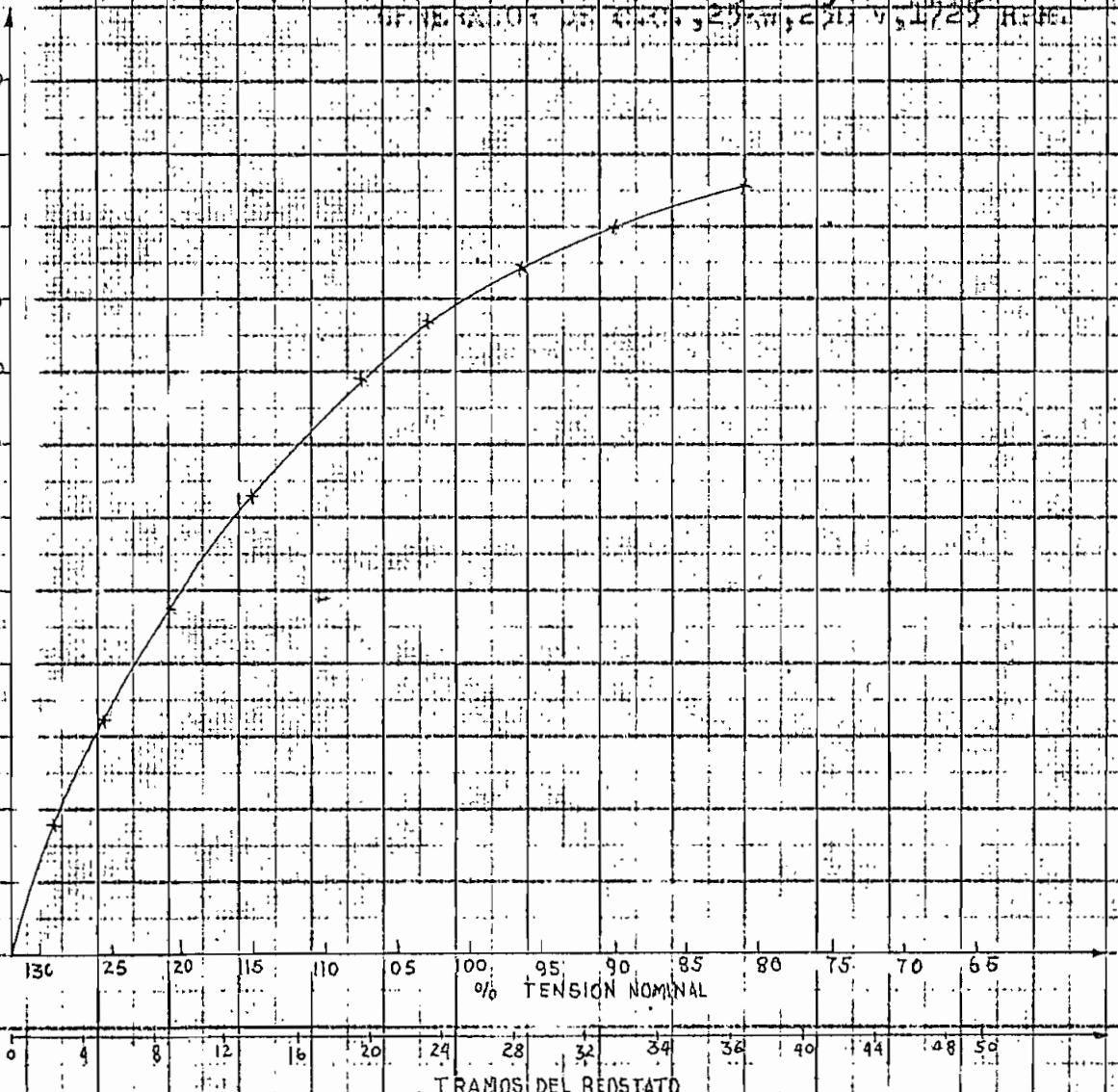


FIG. 15

PAG. 69

lo da la fig. 16.

Tabla "J"

Incremento de resistencia por segmento	Núm. de tramos por segmento	Ohms por tramo
18	2,4	7,5
14	2,8	5
16	3,8	4,22
15	4,6	3,26
16	6,2	2,58
8	3,6	2,22
7	5	1,4
6	5,2	1,153
6	3,4	1,765

Hierro de los polos principales.-

Las láminas del núcleo de los polos principales del generador se construirán de acero al silicio (1% de Si.),de 0,025 pulg. de espesor.Para este material se toma una densidad de 85 Kilolíneas /pulg^2. que está bajo el punto de saturación.La curva de magnetización de este material lo suministra J.H. Kuhlmann en el Appendix 4 de su obra.
La forma y detalles de la lámina de 1 polo principal se muestra en la fig. 17.

Número de láminas por polo.-

Considerando un factor de laminación 0,9 el número de láminas es: $4 \cdot 0,9/0,025 = 154$ láminas.

CURVA EQUIVALENTE DE RESISTENCIA DEL REOSTATO

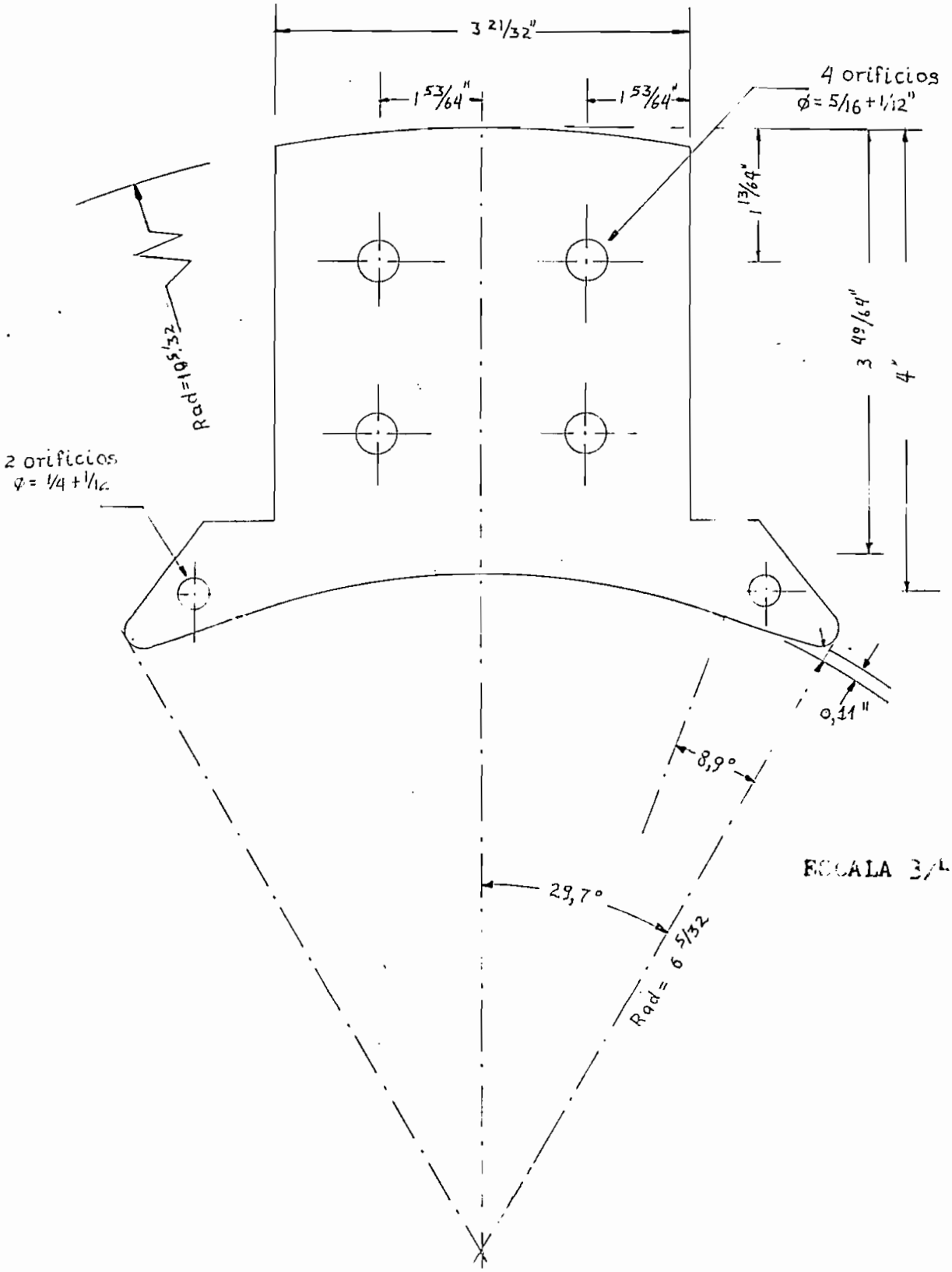
GENERADOR DE C.C., 25 KW, 250 V, 1725 RPM.

FIG. 16

PAG. 71

LAMINA POLAR

GENERADOR DE C.C., 25KW, 250 V, 1725 RPM.



ESCALA 3/4 - 1

FIG. 17

PAG. 72

Peso del hierro del polo principal.-

El volumen real del hierro de cada polo es:

$$4x4x3,7x0,9 = 53,25 \text{ pulg}^3$$

Siendo 0,9 el factor de laminación.

Y el peso: $53,25 \text{ pulg}^3 \times 0,278 \text{ lbs/pulg}^3 = 19,2 \text{ lbs.}$

Cálculo de los pernos de ajuste de los polos principales.-

A fin de evitar la separa ción de las láminas del cuerpo polar,y por lo mismo,la dispersión innecesaria del flujo y el aumento de reluctancia del circuito magnético se utilizan pernos para el ajuste de las mismas.

Adoptando la presión de 6 Kg/cm^2,la cual se considera suficiente,se tiene:

La superficie del cuerpo polar es:

$$w_p \cdot l_p = 3,7 \cdot 4 = 14,8 \text{ pulg}^2 = 95,5 \text{ cm}^2$$

La fuerza total en esta superficie:

$$P = 95,5 \text{ cm}^2 \cdot 6 \text{Kg/cm}^2 = 483 \text{ Kg.}$$

Adoptando,como el caso de los pernos de sujeción del inducido,un factor se seguridad 5/4: $P' = 5/4 \cdot 483 = 604$ Kg.

La sección transversal mínima de los pernos debe ser:

$s_{per.} = P'/k$ k = Cof. admisible de trabajo a la tracción

Para acero 1200 Kg/cm^2.

$s_{per.} = 604/1200 = 0,503 \text{ cm}^2 = 0,198 \text{ pulg}^2$.

Se utilizarán 4 pernos de 5/16 pulg. de diámetro para el cuerpo polar y 2 pernos de 1/4 pulg. para las zapatas polares.Los pernos irán dispuestos como lo indican las figs. 13 y 17 de este trabajo.

La superficie total de los pernos es:

4Ø 5/16.....4·0,0454..... = 0,182 pulg^2

2Ø 1/4.....2·0,0269..... = 0,0538 "

Superficie total de los pernos.....0,236 $pulg^2$.

Los valores de las áreas en la raíz de los dientes se han sacado de la Tabla XIX,pág. 282 de la obra "Construcción de Elementos de Máquinas" de Kimball y Barr.

Las dimensiones de las cabezas y tuercas,a fin de evitar esfuerzos cortantes,son las siguientes:

	Cabeza	Tuerca
Pernos de 5/16		
Dist. entre aristas	0,629 pulg.	0,629 pulg.
Dist. entre caras	9/16 "	9/16 "
Altura	15/64 "	17/64 "
Perno de 1/4		
Dist. entre aristas	0,488 "	0,488 "
Dist. entre caras	7/16 "	7/16 "
Altura	3/16 "	7/32 "

Con el objeto de averiguar si las láminas tienen un espesor suficiente para resistir al esfuerzo de cortadura,se hace el siguiente cálculo de comprobación.

La superficie bajo el filo de todas las tuercas que soporta el esfuerzo cortante es:

$$e(4 \cdot \pi \cdot 0,629 + 2 \cdot \pi \cdot 0,488)\,pulg^2.$$

Admitiendo un esfuerzo a la cortadura de 1000 Kg/cm^2 y tomando en cuenta los factores de conversión de unidades,el espesor es:

$$e = \frac{604\ Kg}{1000 Kg/cm^2 \cdot 3,14(4 \cdot 0,629 + 2 \cdot 0,488)\,pulg \cdot 2,54 \frac{cm}{pulg}}$$

$$e = 0,0217\ cm. = 0,00855\ pulg.$$

Como el espesor de las láminas es 0,025 pulg. resisten perfectamente.

DISEÑO DEL COLECTOR.-

DIAMETRO DEL COLECTOR.-

El diámetro del colector tiene generalmente un valor que fluctúa generalmente entre el 60 al 80% del diámetro del inducido,a fin de evitar altas velocidades periféricas innecesarias.Escogiendo el 65% se tiene: $D_C = 0,65 \cdot D = 0,65 \cdot 12 = 7,8$ pulg. = 196 mm.

Se usará $D_C = 7,5$ pulg. = 190,6 mm.

NUMERO DE DELGAS.-

El número de delgas es igual al número de bobinas: K = 76

PASO DEL COLECTOR.-

Es la longitud de periferie del colector ocupada por cada delga y el aislamiento con la delga vecina.Existe un valor mínimo para este paso,más allá del cual no se obtienen buenas características de conmutación y la construcción se dificulta.Este límite es $\beta_{min} = 0,31$ correspondiendo 0,1 pulg. a la delga y 1/32 pulg. al aislamiento.

Para el generador en diseño el paso del colector es:

$$\beta = \pi \cdot D_C/K = 3,14 \cdot 7,5/76 = 0,31 \text{ pulg.}$$

Aceptando el aislamiento entre delgas de 1/32 pulg. el ancho de estas es: $0,31 - 1/32 = 0,278$ pulg.

Ancho de la zona de conmutación.-

Es la porción de circumferencia del inducido en la cual todas las bobinas de él,pertenecientes a una ranura,son cortocircuitadas por las escobillas.Es decir hay que considerar las bobinas que están en el fondo y en la parte superior de la ranura.Considerando estas últimas se sacan las siguientes conclusiones:

La primera bobina está cortocircuitada por la escobilla desde el instante en que su "delga de salida" entra en la escobilla hasta que su delga de ataque abandona la escobilla,o sea un tramo b+1 delgas;

donde b es el número de delgas/escobilla. Por otro lado, desde el instante en que la delga de salida de la primera bobina empieza a entrar en la escobilla (delga de ataque para la bobina siguiente) la bobina siguiente a la considerada empieza a entregar corriente por ella a la escobilla. Esta corriente es de sentido opuesto a la de cortocircuito de la bobina anterior. Esto disminuye el ancho de la zona en que la primera bobina se cortocircuita, la que debe medirse desde el instante que la delga haya entrado lo suficiente para que la corriente de cortocircuito no sea anulada por la que recibe la escobilla. Algo parecido sucede con la delga de ataque al salir de la escobilla. Como el cálculo exacto de esto es de difícil realización se asume que el ancho de la zona de conmutación para una bobina es: $A = b + 1 - a/p$

Al salir completamente la primera delga de la escobilla, deja de estar cortocircuitada la bobina en estudio, pero la siguiente (que también pertenece a la misma ranura) está cortocircuitada y lo estará hasta que la segunda delga abandone la escobilla; esto aumenta el ancho de la zona de conmutación en una delga. Si la ranura contiene m bobinas el ancho de la zona de conmutación se aumentará, logicamente, en m-1 delgas y será: $b + 1 - a/p + m - 1 = b + m - a/p$

El valor de b depende del ancho de la escobilla b_t (longitud de la escobilla sobre la circumferencia del colector), debido a esto hay que establecer el valor de ésta última previamente.

Ancho de la escobilla.-

El ancho de la escobilla debe escogerse teniendo en cuenta los factores siguientes:

Una escobilla ancha reduce la longitud o sea el precio del colector.

Una escobilla demasiada ancha conduce a una zona de conmutación y a un polo auxiliar igualmente anchos,lo que debe evitarse.Esto quiere decir que la escobilla debe estar entre ciertos valores,que son de 1 a 3,5 veces el paso entre delgas.En el caso del generador en diseño, se escoge 2 veces el paso entre delgas:

$$b_t = 2 \cdot \beta = 2 \cdot 0,31 = 0,62 \text{ pulg.}$$

Se usará $b_t = 0,65$ pulg.

El número de delgas por ancho de la escobilla es:

$$b = b_t/\beta = 0,65/0,31 = 2,1 \text{ delgas.}$$

El ancho de la zona de conmutación es:

$$A = b + m - a/p = 2,1 + 2 - 4/4 = 3,1 \text{ delgas.}$$

ya que el número de bobinas por ranura es: $m = K/S = 76/38 = 2$

Esto en el caso de que las bobinas cuyoslados estén al fondo y al tope de la ranura se conmuten al mismo tiempo.En los enrollamientos que no son de paso completo,es decir aquellos en que por no ser el paso teórico de la bobina un número entero se tiene que aceptar un paso real menor,el enrollamiento del inducido tiene un cierto cableamiento que produce un defasaje en la conmutación de las bobinas de un lado de la ranura en relación a las del otro.

En el caso del generador en diseño sucede esto,ya que : $Y_s = S/p = 38/4 = 9,5$ .El defasaje (φ) es: $9,5 - 9 = 0,5$ ranuras o en bobinas: 76 bobinas/38 ranuras x 0,5 ranuras = 1 bobina. Es decir = 1 delga.Con esto,el ancho de la zona de conmutación en la periferie del inducido es (expresado en pulg.):

$$w_c = (b + m - a/p + \varphi)\, \beta \cdot D/D_c = (3,1 + 1)0,31 \cdot 12/7,5 = 2,03 \text{ pulg.}$$

La experiencia indica que el ancho de la zona de conmutación no debe ser mayor que el 65% de la zona neutra (la porción de la circumferen-

cia del inducido comprendida entre los bordes contiguos de 2 polos adyacentes),a fin de evitar que las bobinas que se conmuten caigan bajo el influjo de los polos principales.El ancho de la zona neutra es igual al paso polar menos el arco polar,o sea :

$$\tau(1 - 0,66) = 9,43 \cdot 0,34 = 3,21 \text{ pulg.}$$

El porcentaje de la zona de conmutación a la zona neutra es:

$$100 \cdot 2,03/3,21 = 63,3\%$$

Clase de escobillas.-

Debido a que con el tiempo las escobillas desgastan la superficie del colector y para evitar que la mica llegue a sobresalir sobre las delgas se harán las capas de mica 1/64 pulg. rebajadas en relación a las delgas.

Esto nos faculta a escojer escobillas de un grado de suavidad relativamente alto y,por lo mismo,de buenas características de autolubricación.

La Tabla VI de la pág.113 del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann da las carácterísticas de las escobillas de mayor uso que construye la industria.En el caso presente se escojen escobillas de grafito de las siguientes características:Dureza escleroscópica 17; Densidad de corriente (A_b) = 65 Amp/pulg.;Coef. de fricción = 0,12 a 0,16 Velocidad periférica máxima = 6000 pies/min.

Superficie de contacto de las escobillas.-

La superficie de contacto de las escobillas (positivas y negativas) lo da la fórmula: $s_b = 2I_a/A_b = 2 \cdot 102/45 = 4,54$ pulg^2. Se ha tomado $A_b = 45$ Amp/pulg^2 por considerarse muy alta la fijada por la Tabla.

Espesor total de las escobillas de un portaescobillas.-

Es igual al espesor de cada escobilla por el número de es-

billas por portaescobillas y,además,es igual al cociente de la superficie total de contacto para el producto del número de portaescobillas y el ancho de cada escobilla.

$$n_b \cdot w_b = \frac{s_b}{n_a \cdot b_t}$$

b_t = Ancho de una escobilla.
n_a = Núm. de portaescobillas.
n_b = Núm. de escobillas.
w_b = Espesor de la escobilla.

El número de portaescobillas es,generalmente,igual al número de polos es decir: $n_a = 4$.Luego:

$$n_b \cdot w_b = \frac{4,54}{4 \cdot 0,65} = 1,75 \text{ pulg.}$$

Número de escobillas por portaescobilla.-

La longitud $n_b \cdot w_b$ se puede dividir en un número tal de escobillas que queda al arbitrio del diseñador.Para el caso presente se escoje 2 escobillas/portaescobilla;de acuerdo a esto,el espesor de cada escobilla es: $w_b = 1,75/2 = 0,875$ pulg.

Se usará $w_b = 0,9$ pulg.,lo cual se traduce en una disminución de A_b.

Longitud del colector.-

La longitud del colector debe ser la mínima que,tanto la ocupación de las escobillas como la disipación del calor lo permitan.

Desde el punto de vista de la ocupación de las escobillas la longitud del colector se puede calcular mediante:

$$l_c = n_b(w_b + 1/8) + C_2$$

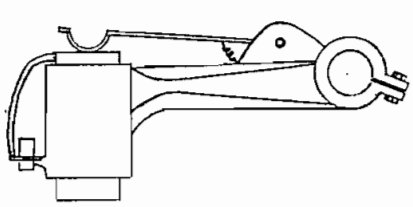
Siendo 1/8 pulg la tolerancia entre escobillas y C_2 la tolerancia que se deja para alternar las escobillas,a fin de evitar un mayor desgaste debajo de las positivas.

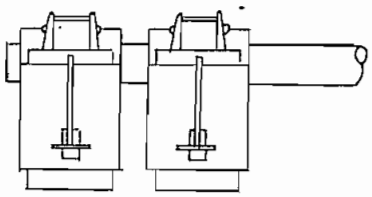
En el caso presente: $l_c = 2(0,9 + 0,125) + 1 = 3,1$ pulg.

En el diseño presente se adopta esta longitud para el cuerpo de la del-

ESCOBILLAS,PORTAESCOBILLAS Y YUGO DE PORTAESCOBILLAS

GENERADOR DE C.C.,25 KW,250 V,1725RPM.





ESCALA 1/2 : 1

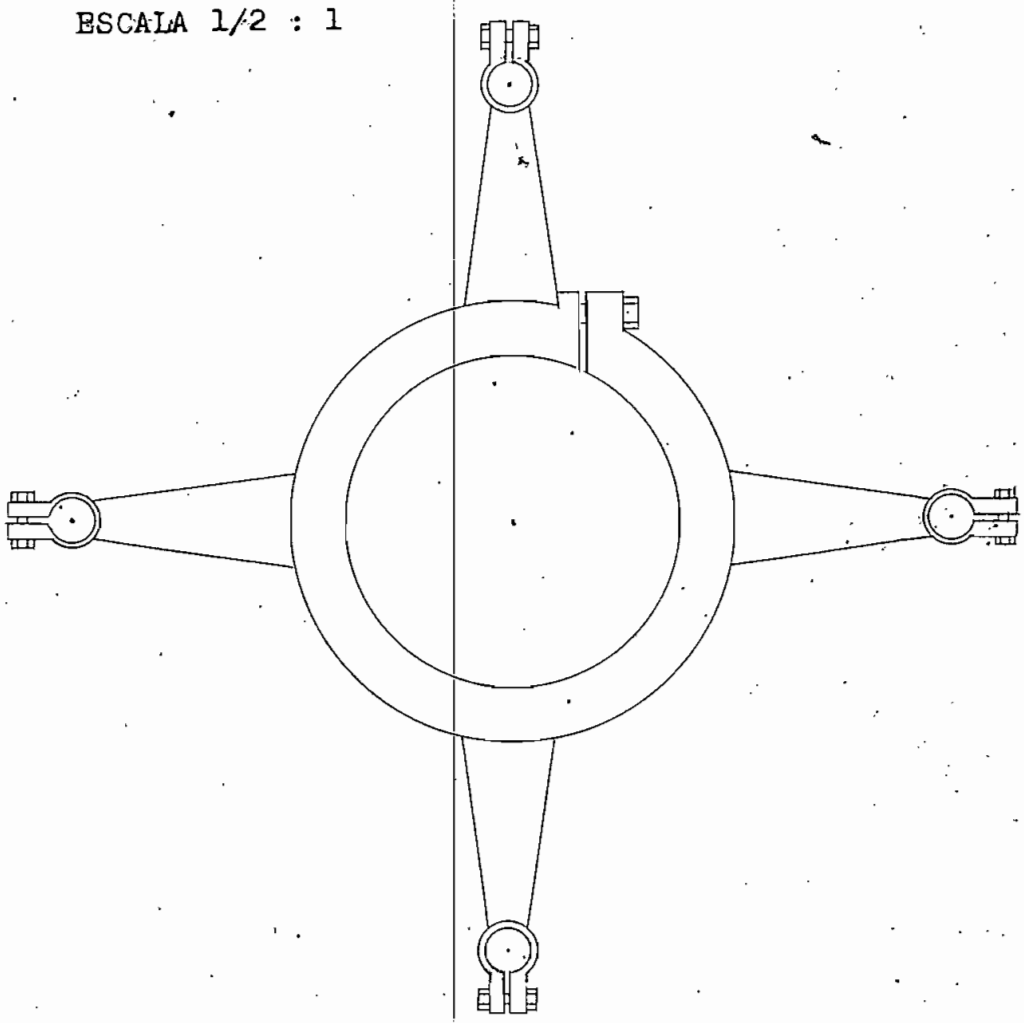


FIG. 18

ga, adjudicándose 0,4 pulg. para el cuello de la misma y 0,24 pulg. para la muesca.

Con el fin de comprobar la longitud del colector desde el punto de vista térmico, se hace el cálculo del incremento de temperatura en el mismo. El método de cálculo se basa, de manera similar al del incremento de temperatura en las bobinas de campo shunt, en un coeficiente C_{cc} obtenido por experiencias en máquinas ya construídas y de la superficie de ventilación por wattio de pérdida. Según la pág. 130 del "Desing of Electrical Apparatus" de Kuhlmann, la superficie de refrigeración del colector se debe considerar igual a:

$$S_c = \pi \cdot D_c \cdot l_c (1 + 0{,}00051\ v_c)$$

y el incremento de temperatura:

$$T_c = \frac{C_{cc}}{S_c / w_c}$$

El coeficiente C_{cc} varía entre 15 y 20.

En el caso presente, la velocidad periférica del colector es:

$$v_c = \pi \cdot D_c \cdot n/12 = 3{,}14 \cdot 7{,}5 \cdot 1725/12 = 3387{,}5 \text{ pies/min.}$$

y la superficie de refrigeración:

$$S_c = 3{,}14 \cdot 7{,}5 \cdot 4 (1 + 0{,}00051 \cdot 3387{,}5) = 257 \text{ pulg}^2.$$

Las pérdidas que producen el calentamiento del colector son: las pérdidas por efecto Joule y por fricción en las escobillas, es decir se considera insignificantes las pérdidas por resistencia en las delgas.

Pérdida por efecto Joule en las escobillas.-

Se debe a la resistencia de contacto de las escobillas, a la resistencia de ellas mismas y a la de los conductores que llevan la corriente hasta los bornes. Esta pérdida depende de la presión de las escobillas sobre el colector y de las características de construcción y montaje de éste, de las escobillas y, también, de la calidad de conmu-

tación obtenida.Ello hace que sea muy difícil predeterminar exactamente el valor de estas pérdidas.Los Estandars A.I.E.E. recomiendan asumir 2 volt. para las caída s de tensión en todas las escobillas positivas y negativas,sean de carbón o de grafito.Aceptando este valor,la pérdida por este concepto es: $W_{br} = 2I_a = 2 \cdot 102 = 204$ watt.

O en prcentaje de la tensión nominal: $W_{br}\% = 100 \cdot 204/25000 = 0,816\%$

Pérdidas por rozamiento en las escobillas.-

Las pérdidas por fricción en las escobillas dependen de la velocidad periférica del colector y de la fuerza de rozamiento entre el colector y las escobillas,ésta,a su vez,depende de la presión de las escobillas sobre el colector y del coeficiente de rozamiento entre escobillas y colector.

De acuerdo a esto,las pérdidas por rozamiento en las escobillas valen: $W_{bf} = P \cdot s_b \cdot c_f \cdot v_c \cdot 0,0226$ watt.

Donde: P = Presión de las escobillas sobre el colector.

s_b = Superficie total de contacto de las escobillas.

c_f = Coef. de rozamiento entre escobillas y colector.

v_c = Velc. periférica del colector. (pulg/seg.)

En el caso del generador en diseño,las escobillas tienen un coeficiente de rozamiento de 0,14 y la presión de ellas sobre el colector se adopta 1,5 lbs/pulg^2,presión normal para máquinas de la potencia del generador en diseño.

La velocidad del colector en pulg/seg. es:

$$v_c = \frac{3387,5 \text{ pies/min.} \cdot 12 \text{ pulg/pié}}{60 \text{ seg/min.}} = 678 \text{ pulg/seg.}$$

y el valor de las pérdidas: $W_{bf} = 1,5 \cdot 4,54 \cdot 0,14 \cdot 678 \cdot 0,026 = 14,65$ wat

Debido a que el desgaste del colector y de las escobillas hacen subir

el coeficiente de fricción;el Instituto Americano de Ingeñieros Electricistas,despues de un gran número de experiencias en máquinas de este tipo,recomienda adoptar una pérdidade 8 watt/pulg^2 de superficie de contacto de las escobillas.Según esto:

$$W_{bf} = 4{,}54 \text{ pulg}^2 \cdot 8 \text{ watt/pulg}^2 = 36{,}3 \text{ watt.}$$

Se aceptará este valor debido a su origen práctico.

Con estas pérdidas el incremento de temperatura es:

$$T_c = \frac{20}{257/240} = 18{,}7^{\circ}C.$$

La A.I.E.E. fija como límite del incremento de temperatura en el colector 55°C.

Cálculo de los pernos de ajuste del colector.-

Admitiendo una presión de 6 Kg/cm^2,la fuerza que debe ejercerce sobre la superficie del colector es:

$$\frac{6 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \pi(7{,}5^2 - 2^2)\text{pulg}^2 \cdot 2{,}54^2 \text{ cm}^2/\text{pulg}^2}{4} = 630 \text{ Kg.}$$

Considerando un factor de seguridad 5/4,como en los casos anteriores:

$$P' = 630 \cdot 5/4 = 788 \text{ Kg.}$$

La sección mínima de los permos es:

$$s_{per} = P'/K = 788/1000 = 0{,}788 \text{ cm}^2 = 0{,}124 \text{ pulg}^2.$$

Se pondrán 4 pernos de 5/16 pulg de diámetro,esto es,una sección de:

$$4 \cdot 0{,}0454 = 0{,}181 \text{ pulg}^2$$

Las dimensiones de la cabeza y la tuerca son las siguientes:

	Cabeza	Tuerca
Dist. entre aristas	0,629 pulg.	0,629 pulg.
Dist. entre caras	9/16 pulg.	9/16 pulg.
Altura	15/64 pulg.	17/64 pulg.

Tomadas de la Tabla XX,pág. 285,Construcción de Elementos de Má-

quinas,Kimball y Barr.

CALCULO DEL EJE.-

El eje del generador debe diseñarse para soportar las fatigas que en él produzcan tanto el momento de torsión,que él debe transmitir,como el momento de flexión al que le somete el peso del inducido, el del colector,de las piezas accesorias y su propio peso.

Un factor de gran importancia en el diseño de ejes de maquinaria eléctrica es el valor máximo de la flecha,ya que por ser el entrehierro muy pequeño,un valor grande de aquella traería inconvenientes graves tales como la aparición de fuerzas magnéticas y de fenómenos de resonancia entre la velocidad propia de la máquina y las oscilaciones del centro de gravedad real del rotor alrededor del eje geométrico del generador.

CARGAS.-

Peso del inducido.-

Como se vió anteriormente,la superfivie del inducido es: 86,7 $Pulg^2$;su peso será: $s_{ind} \cdot l_n \cdot \gamma$.Donde l_n es la longitud neta del hierro del inducido;γ el peso específico.(0,278 lbs/pulg. para el material usado.)

$$86,7 \cdot 3,18 \cdot 0,278 = 76,6 \text{ lbs} = 35 \text{ Kg.}$$

Peso de las placas de presión.-

La superficie de una de las placas de presión es:

$$(9,46^2 - 2^2)3,14/4 = 67 \text{ pulg}^2$$

Como espesor promedio de la placa se usará 21/64 pulg.Con ello el peso de las 2 placas es:

$$67 \cdot 0,278 \cdot 2 \cdot 21/64 = 12,4 \text{ lbs} = 6 \text{ Kg.}$$

Peso de los aros de sostén.-

Las dimensiones de los aros de sostén son muy reducidas,por lo que su peso también lo será.Debido a ello se toma el peso de 1 Kg. que se considera suficiente.

Peso del cobre del inducido.-

Su valor se calculó anteriormente y es 38,7 lbs. = 18 Kg. En la fig. que da el corte del generador se aprecia que todas estas cargas puedenconsiderarse ubicadas en el centro del inducido,debido a su simetría respecto a él.Su resultante es:

$$P_1 = 35 + 6 + 1 + 18 = 60 \text{ Kg.}$$

Peso del colector.-

El peso del colector se considera,en vista de los distintos materiales que le componen,como constituído por un cilindro de cobre de 8,5 pulg. de diámetro exterior y 4,5 pulg. de longitud.Sobre este supuesto,el peso del colector es:

$$P_2 = 4{,}5 \cdot 0{,}321(8{,}5^2 - 2^2)3{,}14/4 = 77{,}4 \text{ lbs} = 31 \text{ Kg.}$$

Siendo 0,321 el peso específico del cobre en lbs/pulg^3.

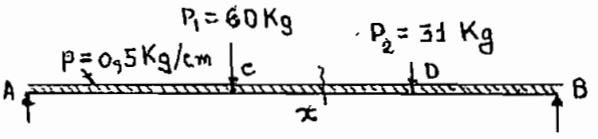
Peso del eje.-

El peso del eje se considera como carga repartida a lo largo de la luz del eje (distancia entre centros de cojinetes).El peso del eje por cm de longitud es:

$$P = 2^2 \cdot 1 \cdot 0{,}278 \cdot 3{,}14/4 = 0{,}874 \text{ lbs} = 0{,}5 \text{ Kg/cm.}$$

Para el cálculo del momento de flexión máximo,el eje se puede considerar como la viga siguiente;la que se supone apoyada libremente,que es el caso más desfavorable para este cálculo.

FIG 19



Escala 1:80

Las longitudes de lostramos se toman del corte axial del generador y son: Tramo AB.....22 pulg = 56 cm.

" AC.....8,88 " = 22,6 cm.

" AD.....16,6 " = 42,3 cm.

Reacciones en los apoyos (cojinetes).-

La carga total es: $60 + 31 + 0,5 \cdot 56 = 119$ Kg.

Sacando momentos con relación al punto A se calcula R_B;

$$R_B = \frac{60 \cdot 22,6 + 31 \cdot 42,3 + 0,5 \cdot 56 \cdot 28}{56} = 62 \text{ Kg.}$$

$$R_A = 119 - 62 = 57 \text{ Kg.}$$

Momento flexor máximo.-

El momento flexor máximo se encuentra en el sitio en que el esfuerzo cortante es 0.En el caso presente esto ocurre bajo la fuerza P_1, es decir el brazo del momento es x = 22,6 cm.

El momento en este sitio es:

$$M_{AC} = 57x - 0,25x^2$$

$$M_{bmáx} = 57 \cdot 22,6 - 0,25 \cdot 22,6^2 = 1163 \text{ Kg.cm.}$$

Momento de torsión máximo.-

Según Arnold-Lecour (La máquina Dinamoeléctrica de C.C.) los ejes de máquinas eléctricas se deben calcular en base de un momento de torsión máximo,que generalmente se toma igual al doble del momento de torsión normal,a fin de que ellos resistan esfuerzos suplementarios debidos a sobrecargas hasta que los órganos de interrupción actúen.

El momento de torsión normal es:

$$M_{dnor} = \frac{102 \cdot 30 \cdot Kw \cdot 10^2}{\pi \cdot n} = \frac{102 \cdot 30 \cdot 25 \cdot 10^2}{1725 \cdot 3,14} = 1405 \text{ Kgcm.}$$

y $M_{dmáx} = 2 \cdot 1405 = 2810$ Kgcm.

Momento máximo ideal de flexión.-

Debido a que el momento de torsión también produce un esfuerzo de flexión, el diámetro del eje debe calcularse a partir del llamado Momento máximo ideal de flexión o Momento de esfuerzos combinados que vale:

$$M_{imáx} = 0{,}35 \cdot M_{bmáx} + 0{,}65 \sqrt{M_{bmáx}^2 + M_{dmáx}^2}$$

En el caso presente:

$$M_{imáx} = 0{,}35 \cdot 1163 + 0{,}65 \sqrt{1163^2 + 2810^2} = 2382 \text{ Kg.cm.}$$

A partir de este valor el diámetro se puede calcular mediante:

$$d = \sqrt[3]{\frac{30}{\pi} \cdot \frac{M_{imáx}}{\sigma_{adm.}}}$$

$\sigma_{adm.}$, es el coeficiente admisible de trabajo a la flexión, que para esfuerzos combinados vale 420 Kg/cm^2 para acero comercial y teniendo en cuenta el debilitamiento del material por la chaveta (según pág. 192, Construcción de Elementos de Máquinas, Kimball y Barr).

$$d = \sqrt[3]{\frac{30}{\pi} \cdot \frac{2382}{420}} = 3{,}8 \text{ cm} = 1{,}5 \text{ pulg.}$$

Flecha máxima.-

El cálculo de la flecha máxima se hace a partir de la ecuación de la línea elástica.

La ecuación de momentos en el tramo considerado es:

$$M_{AC} = M(x) = 57\ x - 0{,}25\ x^2$$

Luego:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI} \left(57\ x - 0{,}25\ x^2\right)$$

Integrando sucesivamente:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} \left(57 \cdot x^2/2 - 0{,}25 \cdot x^3/3 + C_1\right)$$

$$y = \frac{1}{EI}\left(\frac{57}{2\cdot 3}x^3 - \frac{0,25}{3\cdot 4}x^4 + C_1\cdot x + C_2\right)$$

Para calcular las constantes C_1 y C_2 hacemos las siguientes consideraciones: En la última ecuación

Si x = 0 (apoyo A) ; y = 0 ; $C_2 = 0$

Si x = 56 cm (apoyo B) ; y = 0

$$0 = \frac{57}{6}\,56^3 - 0,25\cdot\frac{56^4}{12} + 56\cdot C_1 \quad ; \quad C_1 = -20800$$

Con lo que la ecuación de la línea elástica queda:

$$y = \frac{1}{EI}\left(\frac{57}{6}x^3 - \frac{0,25}{12}x^4 - 20800\,x\right)$$

El eje, para el generador en estudio, es macizo en toda la luz. Por lo mismo, el momento de inercia (I) vale: $I = \pi\cdot d^4/64 = \pi\cdot 3,8^4/64 = 12,5\ cm^4$

El módulo de elasticidad (E) se toma, para acero, $2,2\cdot 10^6\ Kg/cm^2$.

Flecha máxima.-

La flecha máxima ocurre bajo el momento máximo, luego ésta es:

$$f_{máx} = \frac{1}{12,5\cdot 2,2\cdot 10^6}\left(\frac{57}{6}\,22,6^3 - \frac{0,25}{12}\,22,6^4 - 20800\cdot 22,6\right)$$

$$f_{máx} = 0,015\ cm = 0,0059\ pulg.$$

Con el fin de disminuír el valor de la flecha máxima, se da al diámetro del eje el valor 1,8 pulg. = 4,57 cm.

El momento de inercia es: $I = \pi\cdot 4,57^4/64 = 21,4\ cm^2$

y la flecha máxima:

$$f_{máx} = 0,015\cdot\frac{12,5}{21,4} = 0,00875\ cm = 0,00345\ pulg.$$

δ, en porcentaje del entrehierro:

$$\% = \frac{34,5\cdot 10^{-4}}{15\cdot 10^{-2}} = 2,3\%$$

Valor admisible, ya que, según pág. 277, Tomo IV, Escuela del Técnico Elec-

tricista,el valor admisible es: $f_{máx} = 10\%$ ó .

Para comprobar si este valor de la flecha produciría los efectos de resonancia entre la velocidad y la oscilación del eje,se calcula la velocidad crítica;ésta,según la pág.284,Tomo IV,Escuela del Técnico Electricista,vale: $n_c = 300/\sqrt{f_{max}}$ R.P.M.

En el caso presente:
$$n_c = \frac{300}{\sqrt{87,5 \cdot 10^{-4}}} = 3210 \text{ RPM.}$$

Velocidada a la cual no se llegará en ningún caso.

Para evitar el movimiento relativo entre el ejey el inducido se utilizará una chaveta plana encajada.Las dimensiones de la chaveta y el chavetero dependen del diámetro del eje,según Hutte,Tomo I,pág 10, éstas son: Para ejes de 44 a 50 mm.

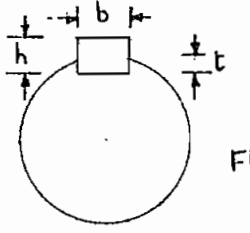


FIG 20

b = 14 mm. = 0,55 pulg.
h = 9 mm. = 0,36 pulg.
t = 5 mm. = 0,20 pulg.

Cálculo de los gorrones del eje.-

Al diseñar el eje se consideró a éste como viga simplemente apoyada,que es el caso más desfavorable para el momento de flexión máximo; para el cálculo de los gorrones,en cambio,se considera al eje como viga empotrada,condición en que se presenta el caso más desfavorable para éstos.Para simplificar el cálculo,se consideran las fuerzas concentradas como una sola,es decir,se saca su resultante.Esta vale:

$P_1 + P_2 = 60 + 31 = 91$ Kg. ; y está aplicada a una distancia de la carga P_1 de:

$$\frac{91}{42 - 22} = \frac{31}{x} \quad ; \quad x = 6,7 \text{ cm.}$$

O sea,a una distancia del punto A de: $22,6 + 6,7 = 29,3$ cm.

Bajo estos supuestos,la viga equivalente es:

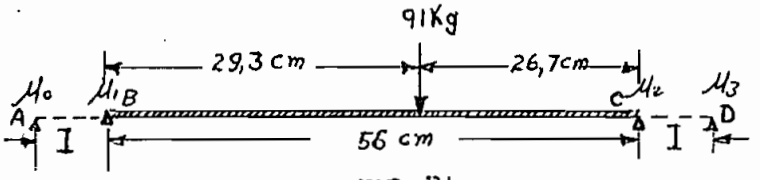


FIG 21

Momentos en los apoyos.-

Se los calcula aplicando el Teorema de los Tres Momentos;para ello se consideran dos tramos ficticios adicionales (ver fig),con momentos y luces $0.\ \mu_0 = \mu_3 = 0\ ;\ l = 0$

Tramos AB y BC

$$0 + 2\mu_1 \cdot 56 + \mu_2 \cdot 56 = -0 - 0 - \frac{0,5 \cdot 56^3}{4} - \frac{91 \cdot 26,7(56^2 - 26,7^2)}{56}$$

$$112\mu_1 + 56\mu_2 = -22000 - 105300$$

Tramos BC y CD

$$56\mu_1 + 2\mu_2 \cdot 56 + 0 = -\frac{0,5 \cdot 56^3}{4} - \frac{91 \cdot 29,3(56^2 - 29,3^2)}{56} - 0 - 0$$

$$28\mu_1 + 56\mu_2 = -11000 - 54150$$

De las ecuaciones obtenidas por el teorema de los Tres Momentos se obtiene,por el método de suma y resta los valores para los momentos en los apoyos,y son: $\mu_1 = -740$ Kg.cm. ; $\mu_2 = -793$ Kg.cm.

Diámetros de los gorrones.-

Con el objeto de estandarizar los cojinetes,se harán ambos gorrones del mismo diámetro utilizandose para el cálculo de él el momento mayor.

El momento de flexión ideal es,para el caso de los gorrones:

$$M_{ig} = 0,35 \cdot 793 + 0,65 \sqrt{793^2 + 2810^2} = 2180 \text{ Kg.cm.}$$

y el diámetro:

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{30 \cdot 2180}{\pi \cdot 420}} = 3,68 \text{ cm} = 1,45 \text{ pulg.}$$

Cojinetes.-

Los cojinetes para el generador en diseño se han escojido de rodamiento de bolas,en atención a la menor energía de pérdida y desgaste de éstos en relación a los de resbalamiento.

Debido a la complejidad de los cojinetes de bolas se considera que su diseño se sale de los límites de este trabajo,procediéndose en él tan sólo a escojer el rodamiento conveniente entre los fabricados por la SKF.Con fines de estandarización se usarán rodamientos iguales y el escojimiento se hace a partir de la reacción mayor en los apoyos.En este escojimiento se utilizan las Tablas del folleto titulado "Rodamiento de bolas,rodamiento de rodillos" de la SKF.

La clase de cojinete se escoje de acuerdo a la "capacidad dinámica del rodamiento",la cual se puede definir como la carga constante admisible para una duñación del cojinete de un millón de revoluciones. El valor de este coeficiente se puede deducir de:

$$\frac{C}{P} = L^{1/3}$$

o de las Tablas preparadas por SKF.En esta fórmula C es la capacidad de carga dinámica; P es la fuerza actuante en el rodamiento y L la duración del rodamiento expresada en millones de revoluciones.

La duración para la cual se debe escojer un rodamiento no puede ser determinada sino mediante la experiencia porque depende del tipo de máquina y de la clase de trabajo que se le asigne.La pág.20 del folleto de la SKF ya nombrado da una tabla de la duración en horas de los rodamientos de acuerdo a las consideraciones antes anotadas.De allí se obtiene que para máquinas con 8 horas de servicio diario totalmente utilizadas,la duración es de 20 a 30000 horas.Se escoje 25000 horas.

La Tabla 3,pág.18 de este Manual de Rodamientos,da los valores de C/P para distintas duraciones y velocidades angulares.De ella se obtiene interpolando para la velocidad exacta:

Para L_h = 25000 horas de duración y n = 1725 RPM.: C/P = 13,8

P es la carga que se ejerce sobre el cojinete o sea la reacción en el apoyo.En el caso presente: $P = R_B = 62$ Kg.

$$C = 13,8 \cdot 62 = 855$$

De acuerdo a esta capacidad de base se puede escojer el rodamiento de las tablas que dan las características de ellos (pág.75 y siguientes, Rodamientos de bolas y de rodillos,de SKF).

En el caso presente se tiene d_g = 1,45 pulg = 36,8 mm. y C = 855;se escoje el rodamiento Núm. 6008 de la clase "Rígidos,de una hilera de bolas" que tiene las siguientes dimensiones y características(ver pág.79,Rodamientos de bolas,rodamientos de rodillos,SKF).

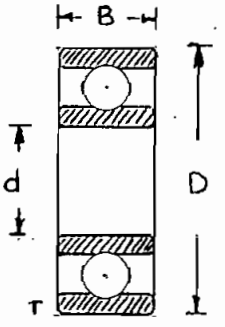


Fig. 21A

d = 40 mm. = 1,58 pulg.

D = 68 mm. = 2,68 pulg.

B = 15 mm. = 0,59 pulg.

r = 1,5 mm. = 0,06 pulg.

C = 1320

$n_{máx\ perm}$ = 10000 RPM.

DISEÑO DE LOS POLOS AUXILIARES.-

LONGITUD DEL ENTREHIERRO DEL POLO AUXILIAR.-

La longitud del entrehierro del polo auxiliar no debe ser tan pequeña que de origen a grandes pulsaciones del flujo proveniente de él y debido a las ranuras del inducido,ni tan grande que el flujo del polo principal afecte el campo creado por el polo de conmutación.

Debido a esto,el entrehierro del polo auxiliar se acostumbra

hacer mayor que el del polo principal. $\delta_i = (1 \text{ a } 2)\,\delta$.

En el caso presente: $\delta = 0{,}15$ pulg.; $\delta_i = (1 \text{ a } 2)0{,}15 = 0{,}15$ a $0{,}3$ pulg.

Se escoje $\delta_i = 0{,}20$ pulg.

Con ello, la longitud radial del polo auxiliar es:

$$l_{pi} = l_p + \delta - \delta_i = 4 + 0{,}15 - 0{,}20 = 3{,}95 \text{ pulg.}$$

ANCHO DE LA ZAPATA POLAR.-

Debido a que las bobinas cortocircuitadas por la escobilla tienen que estar bajo la influencia del polo auxiliar durante todo el ancho de la zona de conmutación, el ancho del polo auxiliar (w_i) debe ser igual al de aquella. Aceptando que la dispersión del flujo en los bordes del polo auxiliar incremente el ancho de éste en (1,5 a 2) δ_i como lo indica la práctica, se tiene:

$$w_i = w_c - (1{,}5 \text{ a } 2)\,\delta_i$$
$$= 2{,}03 - (1{,}5 \text{ a } 2)0{,}2 = 1{,}63 \text{ a } 1{,}73 \text{ pulg.}$$

El ancho del polo auxiliar debe ser escojido tomando en cuenta que su flujo de pérdida no sea excesivo, para ello es aconsejable que el ancho no sea mayor que la mitad del ancho de la zona neutra. En el caso precente:

$$w_i \leq \frac{(1 - 0{,}66)\tau}{2} \leq \frac{0{,}34}{2} \cdot 9{,}43 \leq 1{,}6 \text{ pulg.}$$

Además, el ancho del polo auxiliar debe escojerse de acuerdo al paso de los dientes del inducido para evitar las pulsaciones del flujo del polo auxiliar en las ranuras, para ello una regla práctica dice:

$w_i \geq 1{,}5 \cdot t_1$; en el caso presente: $w_i \geq 1{,}5 \cdot 0{,}992 \geq 1{,}49$ pulg.

De acuerdo a estas 3 consideraciones se adopta $w_i = 1{,}6$ pulg.

Como la forma de diseño adoptada para el polo auxiliar es rectangular (ver fig.) se tiene que la zapata como el cuerpo polar tienen el mismo ancho.

LONGITUD AXIAL DEL POLO AUXILIAR.-

La longitud del polo auxiliar en la dirección del eje del generador se escoje desde el punto de vista económico. Para una longitud corta es menor la longitud del enrollamiento inductor y son pequeñas las pérdidas en el cobre, el peso de éste y el flujo de pérdida. El factor limitante por el otro extremo es el valor de la inducción que no debe sobrepasar del punto de saturación en ninguna condición de carga. En consideración a estos criterios, se asume generalmente:

$$l_i = (0,6 \text{ a } 0,8) l_1$$

En el caso presente: $l_i = (0,6 \text{ a } 0,8)3,75 = 2,25 \text{ a } 3$ pulg.

Se escoje $l_i = 2,5$ pulg.

DISEÑO DEL ENROLLAMIENTO DEL POLO AUXILIAR.-

Cálculo de la tensión de reactancia.-

Se llama así a la suma de las tensiones de autoinducción y de inducción mútua que la inversión de la corriente en la bobina que se esta conmutando y la corriente que pasa por las demás bobinas de la misma ranura que la que se conmuta originan en ella.

La tensión de reactancia es la causa principal de la formación de arcos entre las escobillas y las delgas. Su valor lo da la ecuación fundamental:

$$e_r = (L + M)\frac{di}{dt} = L'\frac{di}{dt}$$

Fórmula en la que: L = Coef. de autoinducción.

M = Coef. de inducción mutua.

e_r = Tensión engendrada en una bobina.

El valor de L' lo da la ecuación de A. Brunt (ver pág.104, Desing of Electrifal Apparatus de Kuhlmann) para el caso que tanto el tope como el fondo de la ranura contengan 2 lados de bobina conmutándose al mismo tiem-

po, y es:

$$L' = \frac{t_a^2}{10^8}\left[4{,}25\cdot l\frac{d_s}{w_s} + 9{,}35(l-l_i)\log\frac{2t_l - w_s}{w_s} + 2{,}03\cdot l_i\frac{w_i - w_s}{\delta_i} + 8{,}12\cdot l_s\right]$$

en la que: t_a = Núm. de vueltas/bobina del inducido.

l = Long. del inducido.

d_s = Profundidad de la ranura del inducido.

w_s = Ancho de la ranura.

l_i = Long. del polo auxiliar.

t_l = Paso entre dientes en la superficie del inducido.

w_i = Ancho del polo auxiliar.

δ_i = Long. del entrehierro del polo auxiliar.

l_s = Long. de la mitad de la conexión terminal de la bobina del inducido.

La razón del cambio de corriente en la bobina cortocircuitada (di/dt) se asume como constante en todo el período de cortocircuito y vale:

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\cdot i_a}{t}$$

Ya que en el tiempo de duración del período, el valor de la corriente varía de $-i_a$ a i_a, o viceversa.

El ancho de la zona de conmutación dividido para la velocidad de la escobilla relativa al colector da el tiempo de duración del cortocircuito. Para una bobina, el ancho de la zona de conmutación es A delgas (ver pág.76) y la velocidad $K\cdot n_s$ delgas/seg., siendo n_s el número de revoluciones por segundo del colector. Luego:

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\cdot i_a}{\frac{A}{K\cdot n_s}} = \frac{2\cdot i_a\cdot K\cdot n_s}{A}$$

Cuando hay más de 2 lados de bobina por ranura el ancho de la zona de

commutación es A + m - 1; y la variación de corriente en el tiempo de cortocircuito se realiza m veces. Luego:

$$\frac{di}{dt} = \frac{m}{A+m-1} K \cdot n_s \cdot 2 \cdot i_a$$

En el caso de que sólo una parte de la ranura se conmuta L' se divide para 2; y la influencia de la parte que no se conmuta sobre la que si lo hace se toma en cuenta por la introducción de un factor :

$$2 - \frac{\varphi}{A+m-1}$$

Donde φ es el desfasamiento en la conmutación entre las bobinas del tope y las del fondo de la ranura, expresado en delgas.

Considerando esto, el valor de L' es:

$$L' = \frac{t_a^2}{2 \cdot 10^8} \left\{ \left(2 - \frac{\varphi}{A+m-1}\right) \left[4,25 \cdot l \frac{d_s}{w_s} + 9,35 (l - l_i) \log \frac{2t_1 - w_s}{w_s} + 2,03 \cdot l_i \frac{w_i - w_s}{\delta_i} \right] + 8,12 \cdot l_s \right\} \text{ Henryos.}$$

$$L' = \frac{t_a^2}{2 \cdot 10^8} M$$

Introduciendo estos valores en la tensión de reactancia, ella queda:

$$e_r = \frac{K \cdot n_s \cdot i_a \cdot t_a^2}{10^8} \frac{m}{A+m+1} M$$

Como el número de delgas (K) es igual al de bobinas y t_a es el número de vueltas/bobina; $K \cdot t_a$ es el número total de vueltas en el inducido, o sea el de conductores dividido para 2. $K \cdot t_a = N/2$

i_a es la corriente que pasa por cada circuito del inducido (en paralelo) o sea I_a/a. Por lo mismo:

$$K \cdot t_a \cdot i_a = \frac{N \cdot I_a}{2a}$$

Como el valor de los amper-vueltas/polo del inducido es:

$$ATP_a = \frac{N \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot p}$$;se tiene que: $K \cdot t_a \cdot i_a = ATP_a \cdot p$

Con lo cual la fórmula de la tensión de reactancia queda finalmante:

$$e_r = \frac{ATP_a \cdot p \cdot n_s \cdot t_a}{10^8} \frac{m}{A+m-1} M$$

Para el generador en diseño se tienen los siguientes datos:

ATP_a = 2910 ampervuelt/polo t_a = 6 vueltas/bobina.

m = 2 delgas/ranura. l = 4 pulg.

w_s = 0,38 pulg. w_i = 1,6 pulg.

t_1 = 0,992 pulg. b = 2,1 delgas/escobilla.

l_i = 3 pulg. d_s = 1,27 pulg.

δ_i = 0,20 pulg. L_a = 16,41 pulg.

n_s = 1725 RPM./60 = 28,75 rev./seg.

A = b + 1 - a/p = 2,1 + 1 - 4/4 = 2,1 delgas.

$l_s = L_a - l$ = 16,41 - 4 = 12,41 pulg.

Calculando con estos valores el coeficiente M´,se tiene:

$$4,25 \cdot l \cdot \frac{d_s}{w_s} = 4,25 \cdot 4 \cdot \frac{1,27}{0,38} = 56,9$$

$$9,35(l-l_i)\log\frac{2t_1-w_s}{w_s} = 9,35(4-3)\log\frac{2 \cdot 0,992-0,38}{0,38} = 6,78$$

$$2,03 \cdot l_i \cdot \frac{w_i - w_s}{\delta_i} = 2,03 \cdot 3 \cdot \frac{1,6 - 0,38}{0,20} = 30,9$$

$$8,12 \cdot l_s = 8,12 \cdot 12,41 = 100,7$$

$$2 - \frac{\phi}{A+m-1} = 2 - \frac{1}{2,1+2-1} = 1,677$$

$$M = 1,677(56,9 + 6,78 + 30,9) + 100,7 = 259,4 \text{ Henryos.}$$

Con esto,el valor de la tensión de reactancia es:

$$e_r = \frac{2910 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 28,75}{10^8} \cdot \frac{2}{3,1} \cdot 259,4 = 3,36 \text{ volt.}$$

Densidad del flujo en el entrehierro del polo auxiliar.-

Para inducir una tensión en las bobinas cortocircuitadas,igual y opuesta al valor promedio de la tensión de reactancia,la densidad de flujo en el entrehierro del polo auxiliar debe ser proporcional a ésta última.Es decir que el flujo que produce el polo auxiliar debe ser tal que su variación respecto al tiempo engendre una tensión igual pero opuesta a e_r.

La fórmula general de la tensión inducida es:

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8}$$

En el caso del polo auxiliar,la variación del flujo ($\Delta \phi$) es igual a la magnitud total del flujo del polo auxiliar: $\Delta \phi = \phi_i$.

Por otro lado se tiene:

$$v(\text{pulg/seg}) = \frac{v(\text{pies/min})12}{60} = \frac{w_i}{t} \quad \text{;de donde:}$$

$$t = \frac{w_i \cdot 60}{v \cdot 12} \qquad \text{Estando expresada v en pies/min.}$$

Luego: $$E = \frac{\phi_i}{\frac{w_i \cdot 60}{v \cdot 12}} \cdot 10^{-8} = \frac{\phi_i \cdot v \cdot 12}{w_i \cdot 60 \cdot 10^8} \text{ ; o sea: } \phi_i = \frac{E \cdot w_i \cdot 60 \cdot 10^8}{12 \cdot v}$$

Como e_r es la tensión inducida en una bobina,la tensión de inducción en cada vuelta de la bobina será e_r/t_a;y la ejercida en cada onductor: $E = e_r/2t_a$,ya que una bobina tiene 2 conductores.Reemplazando estos valores en la expresión de ϕ_i se tiene:

$$\phi_i = \frac{e_r \cdot w_i \cdot 60 \cdot 10^8}{2t_a \cdot v \cdot 12}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo B_{gi} es:

$$B_{gi} = \frac{e_r \cdot 60 \cdot 10^8}{2t_a \cdot l_i \cdot v \cdot 12}$$

Reemplazando los valores pertinentes al generador en diseño:

$$B_{gi} = \frac{3{,}36 \cdot 60 \cdot 10^8}{2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 5420 \cdot 12} = 10340 \text{ Líneas/pulg}^2.$$

Amper-vueltas del polo auxiliar.-

Los amper-vueltas necesarios para enviar el flujo del polo auxiliar a traves de su circuito magnético se pueden dividir, como en el caso de los polos principales, en:

$$ATP_i = ATP_a + AT_{gi} + AT_{ti} + AT_{pi} + AT_{yai} + AT_{yfi}$$

Donde: ATP_i = Amper-vueltas totales por polo del polo auxiliar.

ATP_a = Amper-vueltas del inducido que actúan bajo el polo auxiliar

AT_{gi} = Amper-vueltas para el entrehierro del polo auxiliar.

AT_{ti} = Amper-vueltas para los dientes del inducido.

AT_{pi} = Amper-vueltas para el cuerpo polar del polo auxiliar.

AT_{yai} = Amper-vueltas para el yugo del inducido.

AT_{yfi} = Amper-vueltas para el yugo de campo.

Lógicamente, para obtener una compensación apropiada de la tensión de reactancia, bajo todas las cargas, la densidad de flujo en el entrehierro del polo auxiliar debe variar directamente con la corriente de carga. Esto puede obtenerse cuando las partes de hierro del circuito magnético no llegan a saturarse. Debido a ello, los amper-vueltas necesarios para las partes de hierro del circuito magnético, para máquinas normales, se ha encontrado deben tener un valor de 0,5 a 1 veces los amper-vueltas

necesarios para el entrehierro.Entonces:

$$ATP_i = ATP_a + (1,5 \text{ a } 2)AT_{gi}$$

Amper-vueltas por polo para el entrehierro del polo auxiliar.-

Los amper-vueltas para el entrehierro del polo auxiliar valen:

$$AT_{gi} = \frac{B_{gi} \cdot \delta_i \cdot k}{3,2}$$

Donde k es el llamado factor de Carter que vale,como se vió al calcular el enrollamiento del polo principal:

$$k = \frac{t_1}{w_{t1} + y\delta_i}$$

El factor y,que depende de w_s/δ_i y cuyos valores lo da elnomograma de la Fig. 53,pág.67 del Desing of Electrical Apparatus de Kuhlmann;vale :

para $w_d/\delta_i = 0,38/0,20 = 1,9$; $y = 1,35$

Luego:

$$k = \frac{0,992}{0,612 + 1,35 \cdot 0,2} = 1,124$$

Y los amper-vueltas para el entrehierro:

$$AT_{gi} = \frac{10340 \cdot 0,2 \cdot 1,124}{3,2} = 727 \text{ Amper-vueltas}$$

Por consiguiente el número total de amper-vueltas del polo auxiliar vale:

$$ATP_i = 2910 + 1,5 \cdot 727 = 4000 \text{ Amper-vueltas.}$$

Número de vueltas por polo.-

Es igual a: ATP_i/I_a ,ya que la corriente que circulará por este enrollamiento es la del inducido.Entonces:

$$t_i = 4000/102 = 39,2 \text{ vueltas.}$$

Se usará $t_i = 39$ vueltas.

Area transveral del conductor.-

Aceptándo una densidad de corriente de 1200 Amp/pulg^2(ver Tabla F,pág.48),el área del conductor es:

$$s_i = I_a/A_i = 102/1200 = 0,085 \text{ pulg}^2$$

Se usará conductor de cobre de sección rectangular con recubrimiento doble de cinta de algodón (Double Cotton covered Ribbon) de las siguientes características:

	Cable desnudo	Cable aislado
Sección	0,0908 pulg^2	
Espesor	0,258 pulg.	0,284 pulg.
Ancho	0,365 pulg.	0,389 pulg.
Resistencia/1000 pies a 75°C.	0,109 Ohms.	
Peso/1000 pies (aislado)	356 lbs.	

La bobina irá en la disposición que se indica en la fig. de la pág. siguiente que da la vista y un corte transversal del polo auxiliar;esto es en 3 capas de 12 espiras (como el espacio requerido para pasar de una capa a otra es de 1 espira,11 espiras útiles) y una capa exterior de 6 espiras.Con ello,la altura de la bobina del polo auxiliar es:

$$h_i = 0,284 \cdot 12 = 3,41 \text{ pulg.}$$

Es decir el conductor se devanará sobre su lado más angosto.

El espesor de la bobina,tomando en cuenta que entre capas se pondrá cartón fuller de 0,05 pulg. de espesor.

$$d_i = 0,389 \cdot 4 + 0,15 = 1,706 \text{ pulg.}$$

El aislamiento entre la bobina y el núcleo del polo se hará con fibra de 3/64 pulg. de espesor.

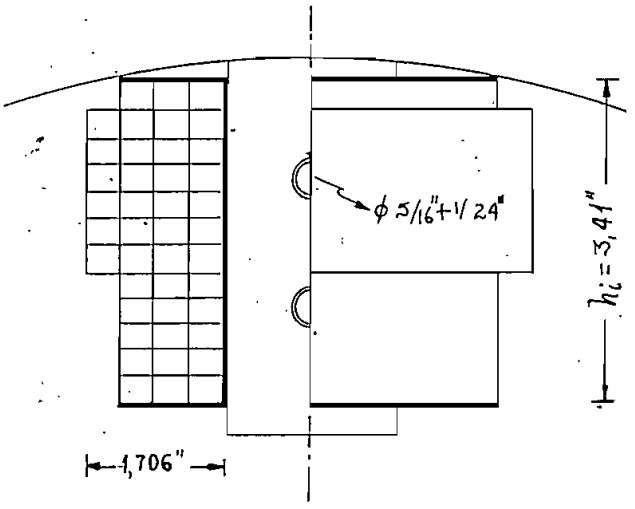
Longitud de vuelta promedio de la bobina del polo auxiliar.-

La longitud de vuelta promedio de la bobina del polo auxiliar es (ver corte transversal del polo auxiliar):

POLO AUXILIAR Y ENROLLAMIENTO

GENERADOR DE C.C.,25 KW,250 V,1725 R.P.M.

ESCALA 1/2:1



VISTA

CORTE

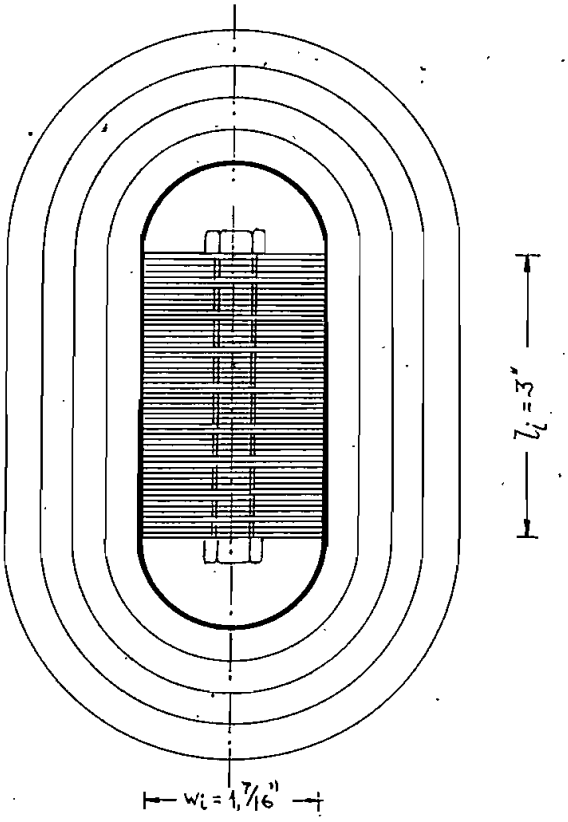


FIG. 22

PAG. 101

$$L_i = 2 \cdot B_i + \pi (2,6 + 1,7/2 + 1/8) = 15,4 \text{ pulg.}$$

Resistencia del enrollamiento a 75°C..-

$$\text{Es:} \quad R = \frac{L_i \cdot t_i \cdot p \cdot r}{s_i \cdot 12 \cdot 10^3} = \frac{15,4 \cdot 39 \cdot 4 \cdot 0,109}{0,0801 \cdot 12 \cdot 10^3} = 0,0272 \text{ Ohms.}$$

La caída de tensión en este enrollamiento es:

$$I_a \cdot R_i = 102 \cdot 0,0272 = 2,78 \text{ volt.}$$

o,enporcentaje de la tensión nominal:

$$100 \cdot 2,78/250 = 1,12\%$$

La pérdida por resistencia en este enrollamiento es:

$$W_i = I_a^2 \cdot R_i = 102^2 \cdot 0,0278 = 284 \text{ watt.}$$

Peso del enrollamiento.-

El peso del enrollamiento es:

$$G_i = L_i \cdot t_i \cdot p \cdot s_i \cdot 0,356/12 = 15,4 \cdot 39 \cdot 4 \cdot 0,356/12 = 71,3 \text{ lbs.}$$

Pernos de ajuste de los polos auxiliares.-

El cálculo de los pernos de ajus-te de las láminas del polo auxiliar se omite por jusgarse que su resultado no tendrá valores prácticos.Se cree suficiente utilizar 2 pernos de 5/16 pulg. de diámetro. Las dimensiones de la cabeza y tuerca son las mismas que para los pernos de igual diámetro utilizados en el ajuste de los polos principales.

CALCULO DE LA EFICIENCIA.-

La eficiencia es la potencia disponible a los bornes del generador expresada en porcentaje de la potencia que la máquina motriz entrga al generador,es decir,de la potencia útil máp las pérdidas.

Las pérdidas del generador son:

1.- Pérdidas en el cobre del inducido y de los enrollamientos de campo.

2.- Pérdidas de hierro en los dientes del inducido y de los yugos

NOTA ACLARATORIA

Los dos gráficos de las páginas siguientes representan vistas de conjunto del generador en diseño.

El gráfico de la pág.102 B da la vista axial y el corte en este sentido por el eje frontal horizontal de simetría del generador.

El gráfico de la pág,102 C da la vista frontal del generador después de haberle quitado su tapa delantera (por ser solidarios con ella,salen también el un cojinete,el yugo de escobillas,los portaescobillas y las escobillas) y un corte por el eje lateral vertical de simetría del generador.

A continuación de los gráficos,se adjunta la lista de materiales de que se construirán los elementos principales del generador en diseño.Para el significado del número de las piezas refiérase a los planos del generador de las págs. 102 B y 102 C.

El material de las distintas partes de los cojinetes no se especifica por cuanto éstos no se diseñaron sino, tan sólo,se escogieron de entre los fabricados por la SKF.

LISTA DE MATERIALES

Pieza N°	Nombre de la pieza	Material
1	Núcleo del polo principal.	Láminas de acero al silicio (1% de Si) espesor 0,025 pulg.
2	Entrehierro.	Aire.
3	Enrollamiento de campo shunt.	Alambre de cobre, calibre 19. Aislamiento: Doble de esmalte (Heavy Formvar).
4	Ducto de ventilación.	Aire.
5	Enrollamiento de campo serie.	Conductor rectangular de cobre de 0,062 $pulg^2$ de sección. Aislamiento: Doble de cinta de algodón (Double Cotton covered Ribbon) Dimensiones: Cable desnudo: Ancho 0,289", espesor 0,229". Cable aislado: Ancho 0,312", espesor 0,252".
6	Caja aislante	Fibra de 1/12" de espesor.
7	Enrollamiento del inducido.	Alambre de cobre, calibre 10. Aislamiento: Doble de esmalte.
8	Núcleo del inducido.	Láminas de acero al Silicio (3% de Si), espesor 0,014".
9	Pernos y tuercas de ajuste del inducido.	Acero.

Pieza Nº	Nombre de la pieza	Material
10	Placas de presión del inducido.	Acero fundido.
11	Aros de sostén de las bobinas.	Acero fundido.
12	Delgas del colector.	Pletina de cobre electrolítico.
13	Núcleo del colector.	Acero fundido.
14	Escobillas.	Grafito.
15	Portaescobillas.	Acero fundido.
16	Eje del portaescobillas.	Cobre electrolítico.
17	Collar de portaescobillas.	Acero fundido.
18	Guía de collar de portaescobillas.	Hierro fundido.
19	Conductor entre escobillas.	Alambre de cobre, calibre 8. Aislamiento Termo plástico.
20	Tuercas y pernos de ajuste del colector.	Acero.
21	Aislamiento entre delgas.	Mica.
22	Tapa del cojinete.	Acero fundido.
23	Portabolas del cojinete.	Material especial.
24	Rulimanes del cojinete.	Material especial.
25	Carcasa del cojinete.	Acero fundido.
26	Tapa del generador.	Hierro fundido.

Pieza Nº	Nombre de la pieza	Material
27	Eje del generador.	Acero.
28	Yugo de campo.	Acero fundido.
29	Tornillos de sujeción.	Acero.
30	Base del generador.	Acero fundido.
31	Caja de bornes.	Acero fundido.
32	Placa de separación.	Acero.
33	Chaveta.	Acero.
34	Separador.	Madera.
35	Cuña de ajuste.	Fibra.
36	Bandajes de sujeción.	Cuerdas de acero.
38	Bornes de salida.	Cobre electrolítico.
39	Enrollamiento del polo auxiliar.	Conductor rectangular de cobre.Sección 0,0908 pulg^2.Aislamiento:Doble de cinta de algodón (Double Cotton covered Ribbon).Dimensiones:Cable desnudo:Ancho 0,365",Espesor 0,258".Cable aislado:Ancho 0,389".Espesor 0,284".
40	Núcleo del polo auxiliar.	Láminas de acero al silicio (1% de Si). Espesor 0,025 pulg.
41	Dientes del inducido.	Ver núcleo del inducido.

del inducido y del campo.

3.- Pérdidas en las escobillas.

4.- Pérdida en el reóstato de campo.

5.- Perdidas mecánicas por rozamiento en los cojinetes,en las escobillas y con el aire.

PERDIDAS EN EL COBRE.-

Son las siguientes:

Pérdida en el cobre del inducido.-

Es la debida a la resistencia del enrollamiento del inducido y vale,para plena carga:

$$W_a = I_a^2 \cdot R_a = 102^2 \cdot 0,0947 = 970 \text{ watt.}$$

Todas las pérdidas por resistencia siguientes se calcularon anteriormente,por lo cual sólo se les transcribe:

Pérdida en el cobre de los polos auxiliares; 284 watt.

Pérdida en el cobre del enrollamiento serie; 77 watt.

Pérdida en el cobre del enrollamiento shunt; 290 watt.

Pérdida en las escobillas;..... 204 watt.

Pérdida en el reóstato de campo.-

En todo el circuito del campo shunt se consume la tensión aplicada a sus extremos,la cual es igual a la tensión entre bornes del generador.Por lo mismo,se tiene:

$$W_f + W_r = i_f \cdot E_n \text{ ; o sea: } W_r = i_f \cdot E_n - W_f$$

En donde W_f son las pérdidas en el cobre de campo shunt.Reemplazando valores:

$$W_r = 1,56 \cdot 250 - 290 = 100 \text{ watt.}$$

PERDIDAS EN EL HIERRO.-

Son las pérdidas debidas a histérásis y a las corrientes parásitas o de Eddy,las cuales deben contabilizarse en el inducido principalmente.

Además,hay que tomar en cuenta la pérdida originada por la pulsación del flujo en el entrehierro,provocada por las ranuras del inducido;la la pérdida debida a deformaciones de las láminas por el cortado o por el colado en la fundición ,la pérdida debida al mal aislamiento entre las láminas provocada por limallas,etc.,y las pérdidas en las placas de presión del inducido debidas al flujo de dispersión.

Todas estas pérdidas adicionales son imposibles de predeterminar y por ello se utiliza un factor 2,5 que afecta al monto de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.Más aún,éstas últimas tampoco se pueden avaluar sino en base de resultados experimentales obtenidos en máquinas similares.

En el presente estudio se utilizaron las Curvas,resultado de muchas experiencias de los Laboratorios de Ingeñiería Eléctrica de la Universidad de Minnesota,que están compiladas en el Appendix del libro "Desing of Electrical Apparatus"de Kuhlmann.Dichas curvas dan el valor de la pérdida por libra en función de la densidad de flujo para los distintos materiales usados en núcleos de máquinas eléctricas y para la frecuencia de 60 cs/seg.,habiendo factores de conversión para otras frecuencias.

Pérdidas en el hierro del inducido.-

Debido a los diferentes valores de la inducción en los dientes y en el yugo del inducido,el cálculo se tiene que hacer separadamente.

Pérdidas de hierro en los dientes del inducido.-

El material de los dientes del inducido es,como se explicó anteriormente,láminas de acero al silicio,calibre 29.La curva de pérdidas para este material lo da el Appendix 5,pág.488 del libro de Kuhlmann antes citado.

Debido a que la densidad de flujo en los dientes no es constante, se tiene que utilizar en este cálculo la densidad promedio usada en el cálculo de los ampervueltas del polo principal. Este valor es B'_{t3} = = 113,8 líneas/pulg^2. El valor de las pérdidas por libra, sacado de la curva correspondiente es: 2 watt/libra a 60 cs/seg. El valor del factor de corrección para la frecuencia correcta (57,5 cs/seg.) es 0,95, por tanto la pérdida correcta por libra es: $2 \cdot 0,95 = 1,9$ watt/lb.

El peso de los dientes del inducido es:

$$G_{ct} = w_{ta} \cdot l_n \cdot d_s \cdot S \cdot 0,278$$

Siendo w_{ta} el ancho promedio del diente, igual a:

$$w_{ta} = \frac{w_{t1} + w_{t2}}{2} = \frac{0,612 + 0,4}{2} = 0,506 \text{ pulg.}$$

$$G_{ct} = 0,506 \cdot 3,18 \cdot 1,27 \cdot 38 \cdot 0,278 = 21,6 \text{ lbs.}$$

Y el valor de la pérdida:

$$W_{ct} = 1,9 \cdot 21,6 = 41 \text{ watt.}$$

<u>Pérdidas de hierro en el núcleo del inducido</u>.-

La densidad de flujo en el yugo del inducido se considera como uniforme e igual a B_{ya} = 65 Kilolíneas/pulg^2.

Como el yugo del inducido se hace del mismo material que los dientes se utiliza la misma curva del Appendix 5.

Para 65 Kilolíneas/pulg^2 y 60 cs/seg. la pérdida por libra es: $0,78 \frac{\text{watt}}{\text{lb.}}$

El factor de conversión a la frecuencia correcta es el mismo que en el caso anterior. Luego: $0,78 \cdot 0,95 = 0,74$ watt/lb.

El peso del yugo del inducido es:

$$G_{cy} = \pi \left[(D - 2 \cdot d_s)^2 - D_i^2 \right] \cdot l_n \cdot 0,278/4$$

$$G_{cy} = 3,14 \left[(12 - 2 \cdot 1,27)^2 - 1,8^2 \right] 3,18 \cdot 0,278/4 = 60 \text{ lbs.}$$

Las pérdidas totales en el yugo del inducido son:

$$W_{cy} = 0,74 \cdot 60 \text{ lbs} = 44,3 \text{ watt.}$$

Y el monto de todas las pérdidas en el hierro del inducido:

$$W_c = 2,5(W_{ct} + W_{cy}) = 2,5(49,3 + 41) = 214 \text{ watt.}$$

Pérdidas por rozamiento en las escobillas.-

Su valor ya se calculó anteriormente y es: $W_{bf} = 36,3$ watt.

Pérdida por rozamiento en los cojinetes y con el aire.-

La pérdida por rozamiento en los cojinetes depende de la presión y de la velocidad periférica del eje, además, está supeditada a la construcción. Según la pág. 47, Tomo IV, Escuela del Técnico Electricista, se puede calcular las pérdidas en los cojinetes de rodamiento, con bastante aproximación, mediante la siguiente fórmula:

$$W_{coj} = 150 \cdot d_g^3 \cdot n \cdot 10^{-6} \text{ watt.}$$

En esta formula, d_g va en cm. (4 cm.).

$$W_{coj} = 150 \cdot 4^3 \cdot 1725 \cdot 10^{-6} = 16,6 \text{ watt.}$$

Las pérdidas por rozamiento con el aire dependen de la forma del inducido y de la velocidad periférica, debido a ello no hay forma de predeterminar su valor y, lo único que puede hacerse, es admitir un valor razonable. En este trabajo se asumen como pérdidas por rozamiento en los cojinetes y con el aire 60 watt.

La Tabla de la siguiente página da los valores de las pérdidas para 1/4, 2/4, 3/4 y plena carga del generador en estudio, datos con los cuales se ha trazado la curva de eficiencia del generador.

Tabla "K"

Pérdidas en el	Grado de la Carga			
	1/4	2/4	3/4	4/4
Cobre del inducido	61	243	546	970
Cobre del polo auxiliar	18	71	160	284
Cobre del campo serie	5	20	444	77
Cobre del campo shunt	290	290	290	290
Contacto de escobillas	13	51	115	204
Hierro del inducido	214	214	214	214
Rozamiento en las escobillas	37	37	37	37
Roz. con los cojinetes y con el aire	60	60	60	60
Total	698	986	1466	2136
Potencia útil	6250	12500	18750	25000
Potencia útil pérdidas	6948	13486	20216	27136
Eficiencia	90%	92,6%	92,7%	92,2%

INCREMENTOS DE TEMPERATURA.-

Como se indicó anteriormente se realizan a partir de la fórmula experimental:

$$T = \frac{C_c}{s/W} \ ^oC.$$

C_c = Coef. de aumento de la temp.

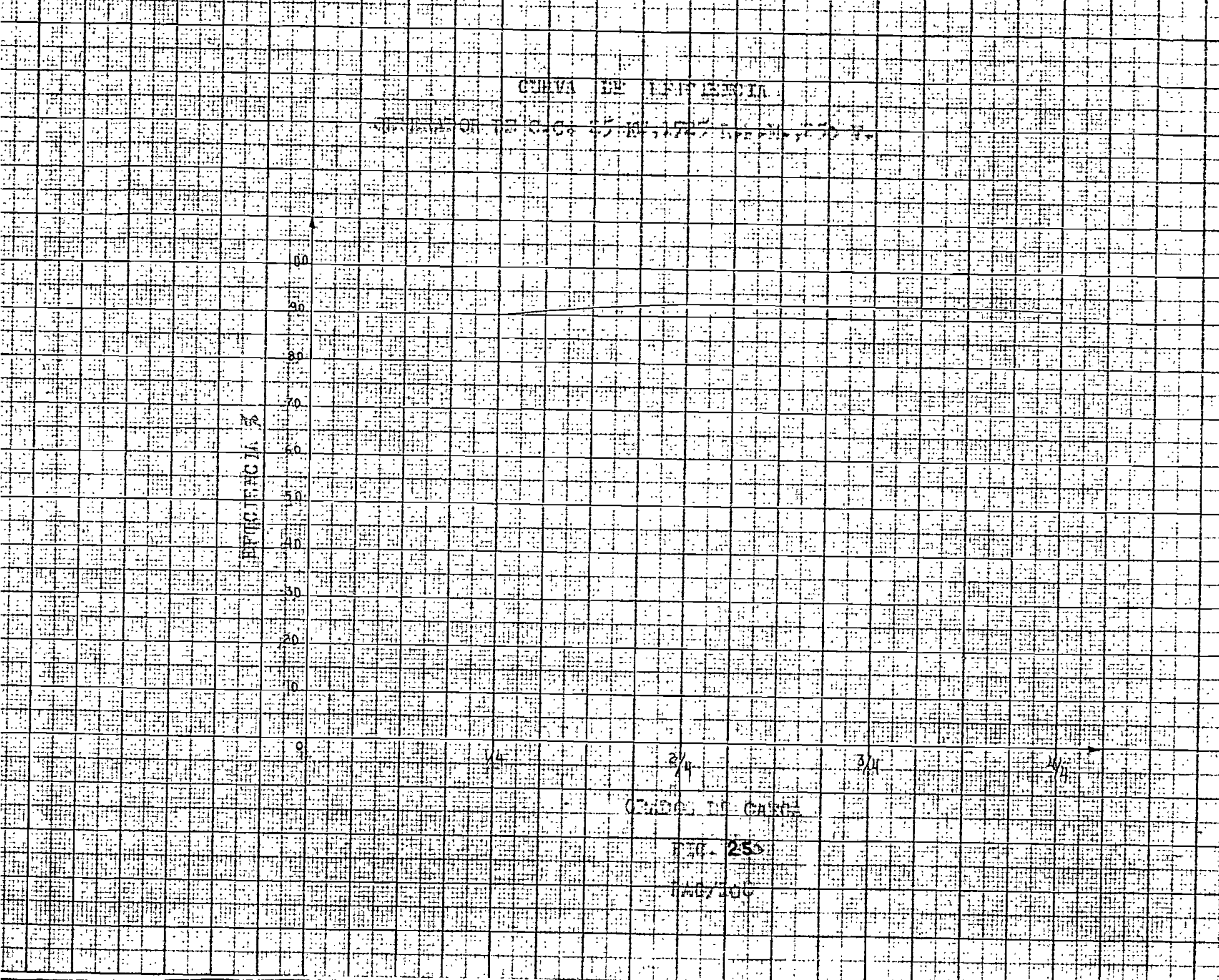
s = Superficie de ventilación.

W = Pérdidas.

INCREMENTO DE TEMPERATURA EN EL INDUCIDO.-

La superficie de ventilación del inducido se considera, para inducidos del tipo del generador en diseño, que lo da la siguiente fórmula:

$$S_a = \left[\pi \cdot D(1 + 4l_e) + \pi \cdot D_i \cdot l + \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(2 + n_d)\right] (1 + 0{,}0005 \cdot v)$$


100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1/4
2/4
3/4
4/4

Donde l_e es la proyección de la longitud de la mitad de la conexión terminal de las bobinas del inducido sobre el eje del generador y $(1 + 0,00051 \cdot v)$ es un factor de incremento de la radiación del calor del inducido debido a la velocidad. Las demás letras tienen el mismo significado que el que se les adjudica en todo el trabajo.

Reemplazando los valores pertinentes al generador en diseño:

$$S_a = \left[\pi \cdot 12(4 + 4 \cdot 3,86) + \pi \cdot 1,8 \cdot 4 + \frac{\pi}{4}(12^2 - 1,8^2)(2 + 1)\right](1 + 0,00051 \cdot 5420)$$

$$S_a = 4090 \text{ pulg}^2.$$

Las pérdidas que se producen en el inducido son las pérdidas por hierro y por cobre de él, la pérdida por rozamiento con los cojinetes y con el aire. Para plena carga:

$$W = W_a + W_c + W_{coj} = 214 + 970 + 60 = 1064 \text{ watt.}$$

El valor de C_{ca} se toma igual a 50 (como lo recomienda la pág. 129 del libro "Desing of Electrical Apparatus"). Con ello, el incremento de temperatura es:

$$T = \frac{50 \cdot 1064}{4090} = 13^{\circ}C.$$

Valor completamente aceptable, ya que según las especificaciones de la A.I.E.E. el incremento permisible para inducidos clase A es $40^{\circ}C$.

Los incrementos de temperatura en el colector y el enrollamiento shunt de los polos principales se calcularon anteriormente y son:

Incremento de temperatura en el colector ..... $18,7^{\circ}C$.

Incremento de temperatura en el enrollamiento shunt $33,4^{\circ}C$.

Incrementos que, como se explicó al hacer su cálculo, también están dentro de los límites impuestos por las especificaciones.

BIBLIOGRAFIA

J.H. Kuhlmann. "Desing of Electrical Apparatus" (Diseño de Máquinas Eléctricas).Tercera Edición,tercera Reimpresión,Año 1950.Edit. John Wiley and Sons,Inc.

Lehmann. "Método gráfico para trazar Campos Electromagnéticos",pág.64 de la obra "Bases científicas de la Electrotecnia" de G.Oberdörfer.Edit.Labor SA. Primera Edición Española,año 1956.

B.G. Lamme. "Physical limitations in D.C. Machines" (Limitaciones físicas en las Máquinas de C.C.).Transactions A.I.E.E. (Publicaciones de la A.I.E.E.) Volumen 34,pág.1752.

H.Trekmann. "Teoría,cálculo y construcción de las Máquinas de C.C.",Tomo IV de "La colección del Técnico Electricista".3ª Edición,año 1956,Edit. Labor SA/

Arnold-LeCour. "La Máquina Dinamoeléctrica de C,C.".Tomos I y II Traducción de la 3ª Edición Alemana,Edit.Labor SA

Hütte. "Manual del Ingeniero".Tomos I y II.Reimpresión año 1938.Editorial Gustavo Gili SA.

Kimball y Barr. "Construcción de Elementos de Máquinas".Reimpresión año 1947.Editorial UTEHA.

SKF. "rodamiento de bolas,rodamiento de rodillos". Catálogo Núm. 2003.SKF.

G.Pazmiño.Ing. Copiados de clase.Años 1957-58 y 1958-59.