

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"REDISEÑO DE LOS DEVANADOS DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA
CON POLOS DE CONMUTACION UTILIZANDO UN PROGRAMA DE COMPUTACION"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION : POTENCIA

PRESENTADA POR :

JOSE G. MOREIRA SAVERIO

GUAYAGUIL-ECUADOR

1986

AGRADECIMIENTO

Al Ing. GUSTAVO BERMUDEZ FLORES,
Director de Tesis, por su ayuda
y colaboración para la realiza-
ción de este trabajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MI HERMANA

A MI ABUELA :
GENARA


A MI ESPOSA



.....
Ing. Cristóbal Mera G.
DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



.....
Ing. Gustavo Bermúdez F.
DIRECTOR DE TESIS



.....
Ing. Alberto Hanze B.
MIEMBRO PRINCIPAL
DEL TRIBUNAL



.....
Ing. Jorge Briboga V.
MIEMBRO PRINCIPAL
DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).


.....
JOSE G. MOREIRA SAVERIO

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto rediseñar una máquina de corriente continua a partir de un circuito magnético existente.

Para acelerar el proceso de cálculo se acudirá a la ayuda de un programa de computación desarrollado en FORTRAN IV.

Con el propósito de verificar los resultados obtenidos en el programa, se procederá al rebobinado de un motor y luego a sus pruebas de laboratorio respectivas, a fin de comprobar las características para las que fue rediseñado.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE ABREVIATURAS	XVI
INTRODUCCION	21
 CAPITULO I	
PRINCIPIOS GENERALES DE REDISEÑO	23
1.1 Fuerza electromotriz generada	23
1.2 Fórmula de la potencia de salida	25
1.3 Número de polos, paso polar, frecuencia	26
1.4 Longitud del entrehierro	29
 CAPITULO II	
REDISEÑO DEL DEVANADO DE ARMADURA	30
2.1 Tipos de devanados de armadura	30
2.1.1 Devanado imbricado	30
2.1.2 Devanado ondulado	34
2.1.3 Devanados pata de rana	36
2.2 Selección de los devanados de armadura	38
2.3 Sección del conductor de armadura	39
2.4 Longitud de la espira media	42
2.5 Flujo por polo	43
2.6 Número total de conductores	44
2.7 Resistencia del devanado de armadura	44

	<u>Pág.</u>
2.8 Peso del devanado de armadura	45
CAPITULO III	
EL CIRCUITO MAGNETICO	46
3.1 Partes constitutivas	46
3.2 Ampere-vueltas para el entrehierro	46
3.3 Ampere-vueltas de los dientes de armadura	50
3.4 Ampere-vueltas para el yugo de armadura	54
3.5 Ampere-vueltas para el polo	55
3.6 Ampere-vueltas para el yugo de campo	58
3.7 Ampere-vueltas totales	59
3.8 Ampere-vueltas de armadura por polo	59
CAPITULO IV	
REDISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO	60
4.1 Devanado de campo derivado	60
4.1.1 Longitud de la espira media	61
4.1.2 Sección del conductor del devanado de armadura	62
4.1.3. Número de espiras por polo	63
4.1.4 Resistencia del devanado de campo derivado	65
4.1.5 Peso del devanado de campo derivado	65
4.2 Devanado de campo serie	65
4.2.1 Longitud de la espira media	66
4.2.2 Sección del conductor del devanado serie	67
4.2.3 Número de espiras por polo	68
4.2.4 Resistencia del devanado serie	68
4.2.5 Peso del devanado serie	69
4.3 Resistencia de desviación	69

CAPITULO V

REDISEÑO DEL DEVANADO DE CONMUTACION	73
5.1 Tiempo de conmutación	73
5.2 Ancho de la zona de conmutación	74
5.3 Voltaje de reactancia	75
5.4 Ampere-vueltas del polo de conmutación	77
5.5 Número de espiras por polo	79
5.6 Sección del conductor	79
5.7 Longitud de la espira media de la bobina de conmutación	79
5.8 Resistencia del devanado del campo de conmu- tación	80
5.9 Peso del devanado del campo de conmutación	80

CAPITULO VI

PERDIDAS, EFICIENCIA Y ELEVACION DE TEMPERATURA	81
6.1 Pérdidas rotacionales	81
6.1.1 Pérdidas en el núcleo de la armadura	83
6.1.2 Pérdidas por fricción en las escobillas	86
6.1.3 Pérdidas por fricción y ventilación	87
6.2 Pérdidas en el cobre	87
6.2.1 Pérdidas en el cobre de armadura	87
6.2.2 Pérdidas en el cobre del campo serie	89
6.2.3 Pérdidas en el cobre del campo de conmu- tación	89
6.2.4 Pérdidas de contacto en las escobillas	90
6.2.5 Pérdidas en el cobre del campo derivado	90

	<u>Pág.</u>
6.3 Pérdidas por cargas espurias	91
6.4 Eficiencia	91
6.5 Elevación de temperatura	92
6.5.1 Elevación de temperatura de la armadura .	92
6.5.2 Elevación de temperatura del devanado de campo	94
6.5.3 Elevación de temperatura del devanado de conmutación	97
6.5.4 Elevación de temperatura del conmutador .	97
 CAPITULO VII	
PROGRAMA DE COMPUTACION	98
7.1 Programa principal GUILL	99
7.2 Subrutina DENFLU	100
7.3 Subrutina CAIDA	100
7.4 Subrutina EXCITA	100
7.5 Subrutina TRASLA	100
7.6 Subrutina ONDULA	100
7.7 Subrutina PTRANA	101
7.8 Subrutina AMCOND	101
7.9 Subrutina BUSQUE	102
7.10 Subrutina POCO	102
7.11 Subrutina AVCDIE	103
7.12 Subrutina AVCMAR	103
7.13 Subrutina AVCMP	103
7.14 Subrutina DENCOF	104
7.15 Subrutina YE	104

7.16 Subrutina DIEN3	104
7.17 Subrutina FRIVE	105
7.18 Subrutina CFRIO	105
7.19 Subrutina INTLAG	106
CAPITULO VIII	
PRUEBAS EXPERIMENTALES	106
8.1 Característica en vacío	106
8.1.1 Diagrama de conexiones	107
8.1.2 Procedimiento	107
8.1.3 Tabla de datos	108
8.2 Pruebas de funcionamiento con carga	111
8.2.1 Diagrama de conexiones	111
8.2.2 Procedimiento	111
8.2.3 Tabla de datos	112
8.3 Medición de resistencias	117
8.3.1 Resistencia del devanado de armadura	117
8.3.2 Resistencia del devanado de campo derivado	118
8.3.3 Resistencias de los devanados serie e interpolo	119
8.4 Pérdidas en el cobre	121
8.5 Pérdidas rotacionales	123
8.5.1 Diagrama de conexiones	123
8.5.2 Procedimiento	123
8.5.3 Tablas de datos	125
8.5.4 Separación de las pérdidas rotacionales	130

8.6 Cálculo de la eficiencia a partir de las pérdidas	138
8.7 Elevación de temperatura	139
8.7.1 Elevación de temperatura del devanado de campo	140
8.7.2 Elevación de temperatura del devanado de conmutación	145
8.7.3 Elevación de temperatura del devanado de armadura	145
8.8 Comparación entre las características teóricas y experimentales de diseño	150
8.8.1 Resistencias	150
8.8.2 Pérdidas	151
8.8.3 Elevación de temperatura	151
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	153
APENDICES	155
BIBLIOGRAFIA	239

INTRODUCCION

Si bien, el rebobinado de maquinaria eléctrica en nuestro medio, es una área manejada por maestros de la rama de electricidad industrial, sus conocimientos por lo general se limitan a copiar las características del bobinado original para resolver el problema.

Hay ocasiones en que se desea cambiar las características de operación de una máquina o corregir errores en un bobinado realizado como sección del conductor, número de vueltas, paso de bobina, paso de colector, etc.

La imposibilidad de obtener el diagrama del bobinado original, por la magnitud del daño ocasionado en la máquina, hace que el material magnético se desperdicie, debido al hecho que el personal que se dedica a la reparación de máquinas eléctricas no está capacitado para resolver esta clase de problemas, debido al desconocimiento de las bases teóricas en que se fundamenta la maquinaria eléctrica.

En la presente tesis, se intenta solucionar estas dificultades para el caso particular de máquinas de corriente continua con polos de conmutación, para lo cual se requiere, conocer las dimensiones de las diferentes partes que componen el circuito magnético, así como también ciertos datos que se puedan tomar de máquinas cuyas característi-

cas sean similares a las que se espera obtener en las máquinas a rediseñarse.

La tesis empieza realizando una breve revisión de los conceptos básicos y hace una descripción de los parámetros que sirven de objetivo en el rediseño. Describe los devanados de inducidos más utilizados en el rebobinado de máquinas de corriente continua y su forma de calcularlos.

Posteriormente se describen los criterios y fórmulas utilizados para calcular los ampere-vueltas del circuito magnético y los parámetros que intervienen en el rediseño de los devanados de excitación y conmutación.

Luego, se describen las pérdidas que se presentan en las máquinas de corriente continua, su manera de calcularlas, así como también la eficiencia y elevación de temperatura.

Se desarrolla un programa de computación en lenguaje FORTRAN IV y con los resultados obtenidos se rebobina un motor de corriente continua, el que es sometido a pruebas experimentales.

Finalmente, se comparan los resultados teóricos con los experimentales, se analizan los resultados logrados y se realizan las conclusiones respectivas.

CAPITULO I

PRINCIPIOS GENERALES DE REDISEÑO

Se pueden presentar casos en los que al tomar datos del devanado original de una máquina de corriente continua, se incurran en errores en la determinación de la sección del conductor, número de vueltas, paso de colector, etc.

Adicionalmente puede existir la necesidad de cambiar ciertas características como potencia, voltaje, velocidad en una máquina existente.

Pero existe el caso crítico, que se presenta cuando es imposible tomar datos del devanado primitivo y no existe la placa de la máquina, quedando como única alternativa el rediseño total de sus devanados.

Este trabajo está orientado a resolver los casos antes mencionados.

1.1 FUERZA ELECTROMOTRIZ GENERADA

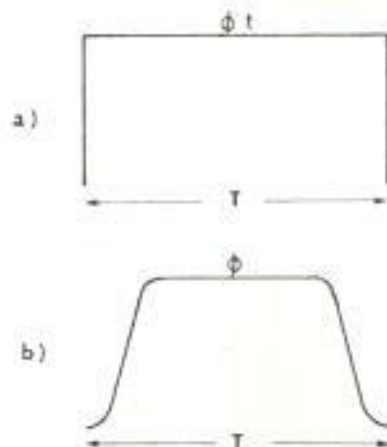
El voltaje inducido en una armadura de corriente continua se expresa usualmente como sigue :

$$E = \frac{\phi \cdot p \cdot N \cdot n}{a \times 60 \times 10^8} \quad (1.1)$$

- ϕ = Flujo por polo (líneas)
 p = Número de polos
 N = Número total de conductores
 n = Velocidad (R.P.M.)
 a = Número de circuitos en paralelo.

Para propósitos de diseño es conveniente usar un flujo hipotético total (ϕ_t) para la máquina, en lugar del flujo por polo, para lo cual se asume que la densidad de flujo en el entrehierro tiene un valor máximo sobre el paso polar, esto es, la forma del campo se supone rectangular como muestra la Fig.1.a. La relación del área de la verdadera forma del campo (Fig.1.b), al área del campo hipotético rectangular (Fig. 1.a) se denomina factor de forma del campo (fd) así :

$$fd = \frac{\phi \cdot P}{\phi_t} \quad (1.2)$$



FIGS. N° 1.1 a y b : FORMA DE ONDA DE LA DENSIDAD DE FLUJO EN EL ENTREHIERRO

El valor del factor de forma es aproximadamente igual a la relación del arco polar al paso polar y los valores usuales varían de 0.6 a 0.75.

2.2 FORMULA DE LA POTENCIA DE SALIDA

El devanado que se calcula primero es el del inducido, luego el devanado de campo que proporciona el flujo magnético necesario. El diseñador normalmente da los siguientes datos :

- potencia de salida
- voltaje terminal
- velocidad

La elevación de temperatura, grado de conmutación, eficiencia, tipo de conexión de sus devanados, pueden ser impuestos por la aplicación que va a tener la máquina.

La potencia de salida de una máquina de corriente continua puede ser expresada de la manera siguiente:

$$K_{wa} = \frac{n \cdot D^2 \cdot l \cdot f \cdot d \cdot Q \cdot B_g \cdot \pi^2}{60 \times 10^{11}} \quad (1.3)$$

K_{wa} = Potencia de salida (kw)

D = Diámetro exterior del inducido (cm)

l = Longitud del núcleo del inducido (cm)

Q = Amp-cond/cm de circunferencia del inducido.

B_g = Densidad de flujo en entrehierro del polo principal (líneas/cm²)

Los valores preliminares de B_g y Q pueden ser determinados a partir de las Fig. 1.2 y 1.3 respectivamente.

El valor de Q está limitado por la eficiencia, costos de construcción y calentamiento del inducido.

B_g , dependerá de la densidad de flujo en los dientes. Para algunas aplicaciones de motores es importante el par que pueda desarrollar el motor en lugar de la potencia de salida.

El torque desarrollado puede expresarse como :

$$TD = D^2 \cdot l \cdot Q \cdot B_g \cdot fd \cdot 16.1 \times 10^{-10} \text{ Kg} \cdot \text{m} \quad (1.4)$$

1.3 NUMERO DE POLOS, PASO POLAR, FRECUENCIA.

El número de polos y el paso polar forman parte de las características de diseño originales de la máquina a rediseñarse por lo que permanecen invariables, ya que forman parte del circuito magnético lo que es considerado como un punto de partida para el propósito de la presente tesis.

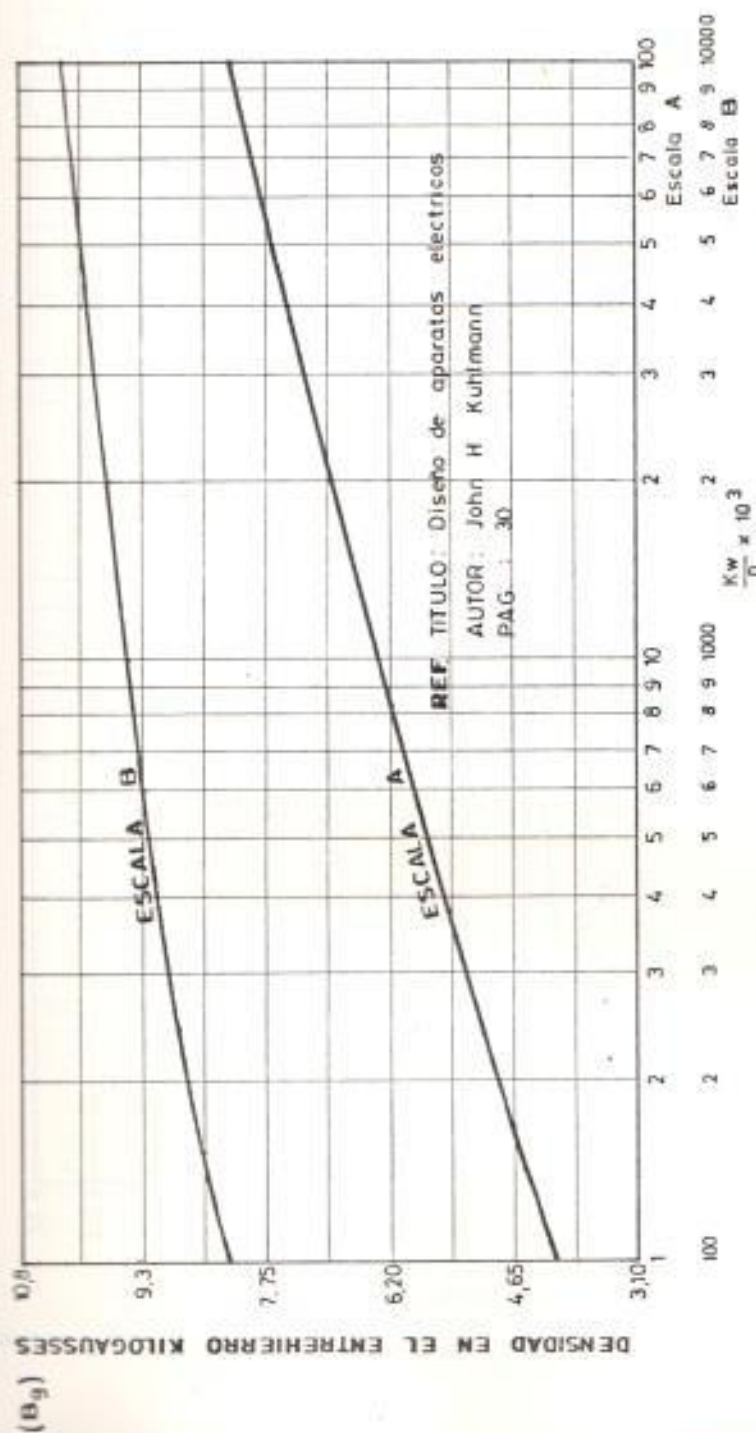
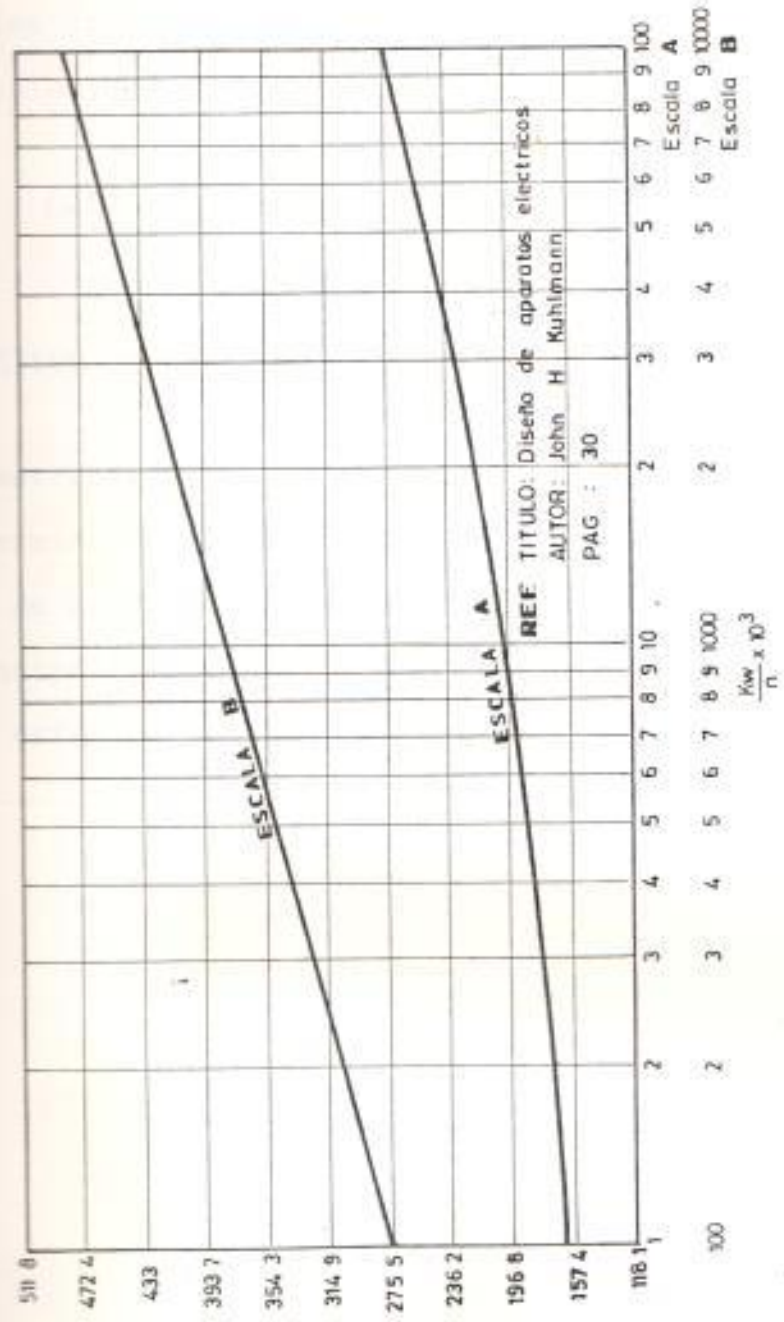


Fig N°1.2 DENSIDADES DEL ENTREHIERRO PARA MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA

AMPERES CONDUCTORES POR CM DE LA CIRCUNFERENCIA DE LA ARMADURA (C).
DE LA ARMADURA (C).



REF TITULO: Diseño de aparatos electricos
AUTOR: John H Kuhlmann
PAG : 30

Fig No 1.3 AMPERE CONDUCTORES POR CM DE CIRCUNFERENCIA DE ARMADURA PARA MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA CON POLOS DE CONMUTACION

La frecuencia de las corrientes en los conductores del inducido y la variación alterna del flujo en el núcleo varían directamente con el número de polos y la velocidad así :

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad \text{ciclos/seg} \quad (1.5)$$

7.4 LONGITUD DEL ENTREHIERRO

El entrehierro es otro parámetro conocido que puede determinarse por medición, siendo igual a la diferencia de diámetro entre las caras polares de los polos principales opuestos diametralmente menos el diámetro exterior del inducido, dividido para dos.

CAPITULO II

REDISEÑO DEL DEVANADO DE ARMADURA

2.1 TIPOS DE DEVANADOS DE ARMADURA

Los tipos de devanados de armadura más utilizados en máquinas de corriente continua son : imbricado, ondulado y patas de rana.

2.1.1 DEVANADO IMBRICADO

El devanado más sencillo es el imbricado simple. También existe el imbricado múltiple que es poco usado teniendo aplicación escasamente en dinamos de muy bajo voltaje.

a) GRADO DE MULTIPLICIDAD :

El grado de multiplicidad (m), indica el número relativo de circuitos en paralelo con respecto al número de circuitos de un devanado simple.

b) NUMERO DE CIRCUITOS EN PARALELO :

Si p es el número de polos, el número de circuitos en paralelo para devanados imbricados es :

$$a = m \times p \quad (2.1)$$

c) PASO DE COLECTOR :

El paso de colector (y_c) para devanado imbricado (ver Fig. 2.1) es :

$$y_c = \frac{a}{2} m \quad (2.2)$$

d) PASO DE BOBINA

El paso de bobina (y_s) siempre es igual o casi igual al número de ranuras por polo, (ver Fig. 2.1) así :

$$y_s = \frac{S}{p} \quad (2.3)$$

donde :

S = número de ranuras

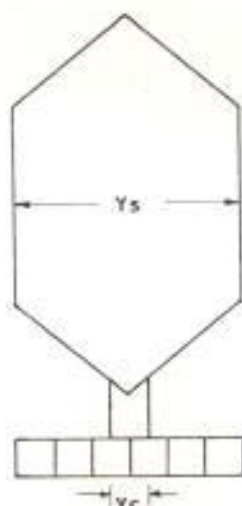


FIG. N° 2.1 : PASO DE BOBINA, PASO DE COLECTOR EN DEVANADO IMBRICADO

Si el paso de bobina es exactamente 180° , el devanado es de paso completo; si el

avance de la bobina es menor que el paso completo se dice que el devanado es de paso acortado, esto tiene el efecto de :

- reducir ligeramente el voltaje generado
- reducir el torque desarrollado en un motor.
- aumenta la zona de conmutación
- disminuye la longitud de la espira media
- disminuye el peso del cobre

e) NUMERO DE ELEMENTOS DE BOBINA :

Las armaduras modernas tienen más delgas que ranuras, esto hace que el número de elementos de una bobina sea mayor que uno. Así tenemos :

$$NELE = \frac{K}{S} \quad (2.4)$$

NELE = número de elementos

K = número de delgas

f) CONEXIONES EQUIPOTENCIALES :

Las tensiones generadas en las diversas ramas en paralelo en inducidos con devanados imbricados, sólo por excepción son idénticas debido a la desigualdad del entrehie-

rro o diferencias constructivas, esto hace que se produzcan corrientes circulantes a través de las escobillas, lo cual produce chisporroteo en el colector. Este problema sólo se presenta en devanados imbricados debido a que los conductores de cada rama están situados a dos polos adyacentes sólomente, haciendo que las tensiones generadas en cada rama estén determinadas por las distribuciones de flujo dadas.

En devanados ondulados, esto no ocurre debido a que los conductores de cada rama están situados frente a todos los polos simultáneamente de modo que las variaciones de distribución del flujo afectan análogamente a ambas ramas.

El problema se lo corrige con conexiones equipotenciales que son conductores de cobre de muy baja resistencia que interconectan puntos del devanado de armadura separados entre sí 360 grados eléctricos.

Cuando se instalan conexiones equipotencialiales, el número de elementos de bobina debe ser múltiplo del número de pares de polo,

a fin de obtener puntos exactos a 360° eléctricos.

El paso de conexiones equipotenciales se lo puede calcular de la manera siguiente:

$$\text{EQUIPO} = \frac{K * \text{IGUALA}}{p/2} \quad (2.5)$$

EQUIPO = paso de conexiones equipotenciales.

IGUALA = porcentaje de igualación (p.u.)

2.1.2 DEVANADO ONDULADO

Al igual que en el devanado imbricado, el ondulado más sencillo es el ondulado simple existiendo el ondulado múltiple.

a) NUMERO DE CIRCUITOS EN PARALELO :

$$a = 2 \times m$$

m = grado de multiplicidad

b) PASO DE COLECTOR :

Los extremos de cada elemento de bobina de un devanado ondulado están conectados a delgas del colector separadas aproximadamente 360° E (ver Fig. 2.2).

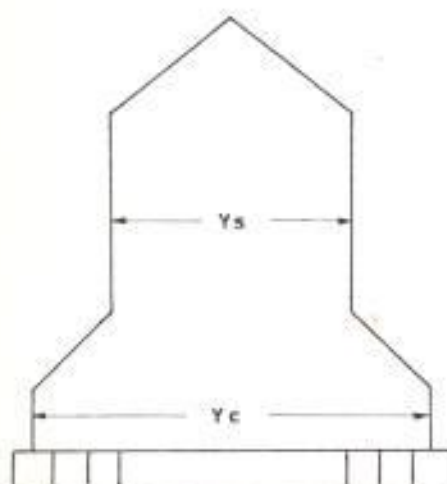


FIG. N° 2.2 : PASO DE BOBINA, PASO DE COLECTOR EN DEVANADO ONDULADO.

Un devanado ondulado es posible si el paso de colector es un número entero, luego :

$$y_c = \frac{k \pm m}{p/2} \quad (2.6)$$

c) PASO DE BOBINA

Se calcula de la misma manera que para devanado imbricado (ver Fig. 2.2).

$$y_s = \frac{S}{p} \quad (2.7)$$

d) BOBINAS MUERTAS

Deben emplearse elementos muertos en todos los devanados de armadura cuyas relaciones de delgas/ranuras no sean enteras, regla que se aplica generalmente a los devanados ondulados simples de 4 y 6 polos. Este elemento muerto queda aislado sin conectar-

se a delga alguna y sólo sirve para mantener el balance mecánico de la armadura.

2.1.3 DEVANADOS PATAS DE RANA

Este devanado es una combinación de los devanados imbricado y ondulado, usado principalmente en máquinas de mediana y gran potencia.

Tiene la ventaja de que con este devanado quedan eliminadas las conexiones equipotenciales, las cuales se requieren normalmente en devanados imbricados.

Las secciones ondulada e imbricada están aisladas entre sí pero encintadas juntas para formar una sola unidad (ver Fig. 2.3).

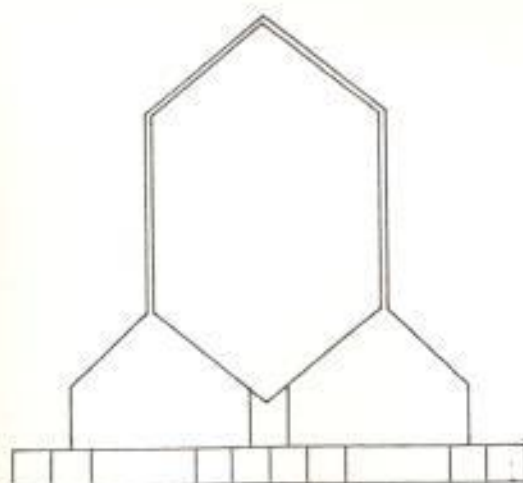


FIG. N° 2.3 : BOBINA PATAS DE RANA

La sección imbricada de todo devanado en patas de rana es un devanado simple y la ondulada siempre es un devanado múltiple. Si la sección imbricada es progresiva, la ondulada es regresiva.

Las reglas que gobiernan los cálculos del paso de ranura y colector de los devanados imbricado y ondulado también se aplican aquí.

a) NUMERO DE CIRCUITOS EN PARALELO

Se calcula de la manera siguiente :

$$a = 2 \times p \quad (2.8)$$

b) PASO DE BOBINA

Si la relación ranuras/polos es un número entero, entonces el paso de bobina para la parte imbricada y ondulada es el mismo, si dicha relación es un número mixto, el paso de bobina para la sección imbricada será acortada en media ranura y la sección ondulada será alargada en media ranura al valor calculado.

2.2 SELECCION DE LOS DEVANADOS DE ARMADURA

La selección de los devanados del inducido, desde el punto de vista del rediseño, va a depender del número de ranuras y delgas existentes en el núcleo del inducido.

En núcleo en el cual el número de delgas es un múltiplo entero de la cantidad de ranuras y si relación número de ranuras/pares de polos es un entero es posible la realización de un devanado imbricado sobre dicho núcleo.

Si la relación número de delgas/número de ranuras no es un múltiplo exacto y la relación número de delgas *grado multiplicidad deseado dividido para el número de pares de polos es un entero, entonces es posible la realización de un devanado ondulado con elementos muertos.

Si el núcleo del inducido es de mediana o gran capacidad y las condiciones para rediseñar un devanado imbricado se cumplen, es recomendable la realización del devanado en patas de rana, con lo que se elimina el uso de conexiones equipotenciales, las que para grandes potencias contribuyen a aumentar las pérdidas por cobre en el inducido.

2.3 SECCION DEL CONDUCTOR DE ARMADURA

La sección del conductor de armadura depende de la corriente que circula por el circuito respectivo y de la densidad de corriente.

$$S_a = \frac{i_a}{A_a} \quad (\text{mm}^2)$$

i_a = Corriente de armadura por circuito (amps)

A_a = Densidad de corriente (amps/mm²)

La corriente por circuito en el devanado de armadura para máquinas con campos en derivación es :

$$I_a = \frac{I + I_f}{a} \quad (2.9)$$

I = Corriente en los terminales (amps)

I_a = Corriente de armadura (amps)

a = Número de circuitos en paralelo

I_f = Corriente de campo derivado (amps)

La corriente de campo es estimada previamente con la ayuda de la Fig. 2.4. La densidad de corriente en el cobre de armadura (A) está limitada por la temperatura máxima admisible en el devanado y por la eficiencia de la máquina. Para una buena ventilación la elección de "A" dependerá de la eficiencia, debiendo escogerse tan alto como lo permita la eficien

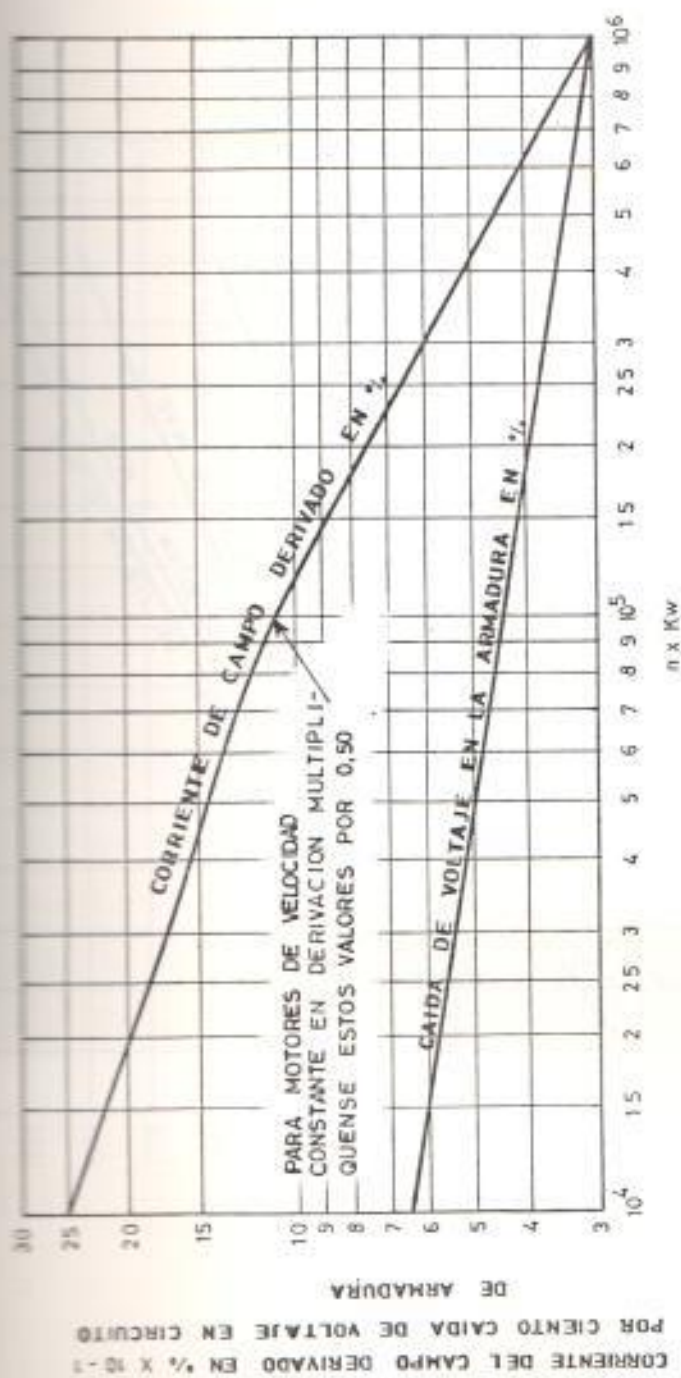


Fig No 2-4 CORRIENTE APROXIMADA DEL CAMPO DERIVADO Y CAIDA DE VOLTAJE EN EL CIRCUITO DE LA ARMADURA EN PORCENTAJE DE VOLTAJE Y CORRIENTES TERMINALES.

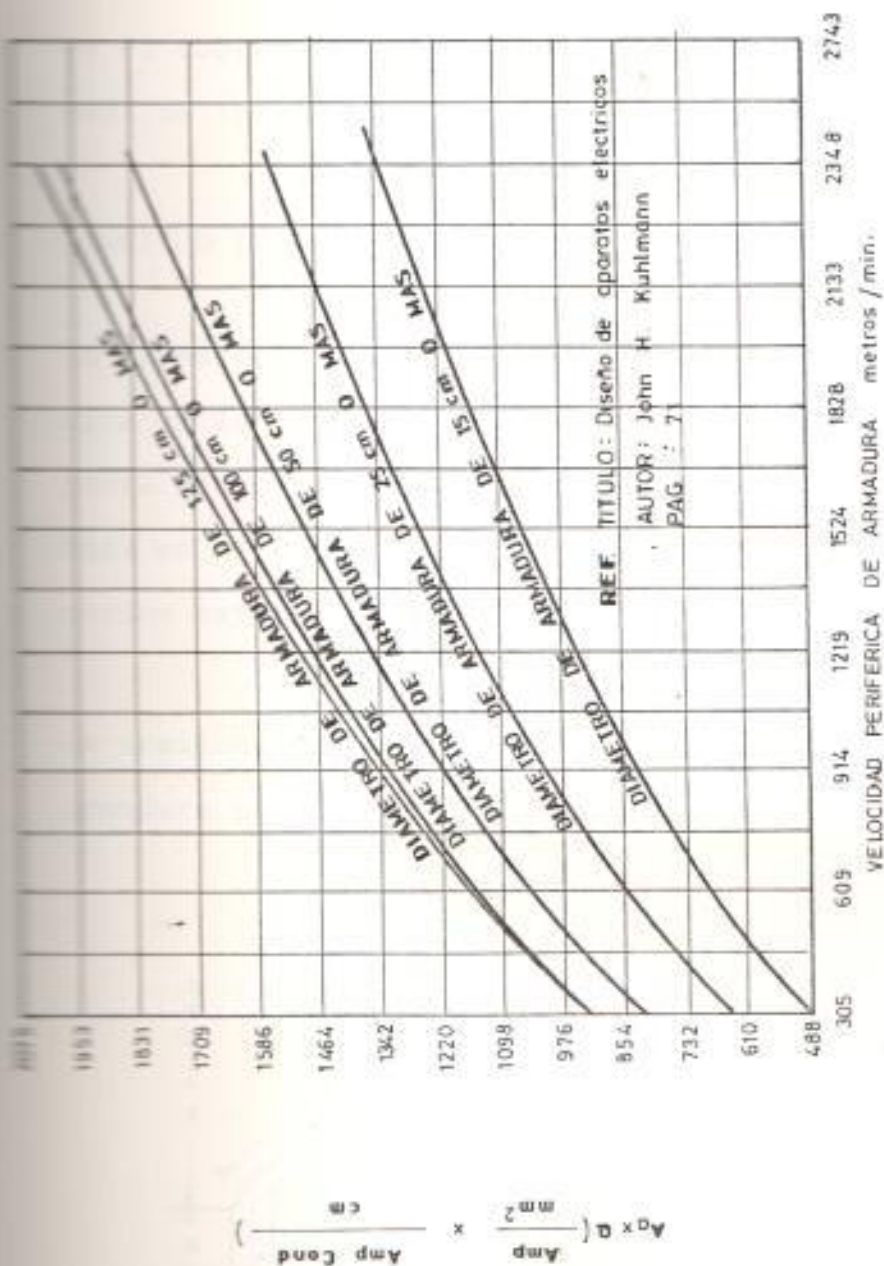


Fig No.2.5 CURVAS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN LOS CONDUCTORES DE ARMADURA

cia y elevación de temperatura, ya que esto lleva a un ahorro de cobre en la armadura.

Los valores preliminares de la densidad de corriente en el cobre de armadura (A) se han estimado con la ayuda de la Fig. 2.5.

2.4 LONGITUD DE LA ESPIRA MEDIA

La forma del cabezal de la bobina de armaduras se indica en la Fig. 2.6. La longitud de la espira media podrá dividirse en dos partes: La parte activa embebida en el hierro de la armadura y el cabezal o conexión externa.

La semilongitud de la espira media de una bobina de armadura puede calcularse como sigue :



FIG. N° 2.6 CABEZAL DE BOBINA DE ARMADURA

$$L_a = l + 2b + 2c + g \quad \text{ó}$$

$$L_a = l + 2b + \frac{\pi(D-d_s)}{p \cos \alpha} + d_s \quad (2.10)$$

donde:

L_a = Semilongitud de la espira media (cm)

l = Longitud del núcleo de la armadura (cm)

b = Extensión de la bobina de armadura (cm)

D = Diámetro exterior de la armadura (cm)

d_s = Profundidad de la ranura (cm)

α = Angulo entre parte recta del cabezal y el eje de la bobina.

p = Número de polos

d = Espesor del cabezal más claros

g = Doble en los extremos de las bobinas se toma = d_s

La extensión horizontal de la bobina de armadura más allá del hierro se calcula de la manera siguiente :

$$L_e = f + g + b \quad \text{ó}$$

$$L_e = \frac{\pi(D - d_s)}{2p} \tan \alpha + d_s + b \quad (2.11)$$

2.5. FLUJO POR POLO

El flujo magnético que atraviesa el polo principal de una máquina de corriente continua se calcula de la manera siguiente :

$$\phi = \frac{\pi \cdot f \cdot D \cdot l \cdot B_g}{p} \quad (2.12)$$

B_g = densidad de flujo en el entrehierro del polo principal (Gauss).

2.5. NUMERO TOTAL DE CONDUCTORES

El número total de conductores en la periferia del inducido puede calcularse de la manera siguiente:

$$\frac{E \cdot 60 \times 10^8}{\phi \cdot p \cdot n} \quad (2.13)$$

E = Voltaje inducido en la armadura (voltios).

p = Número de circuitos en paralelo

n = Velocidad (R.P.M.)

2.5.1 NUMERO DE CONDUCTORES POR RANURA

Se calcula por la relación siguiente :

$$N_s = \frac{N}{S} \quad (2.14)$$

S = Número de ranuras en el núcleo de la armadura.

2.6. RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA

Se calcula mediante la siguiente expresión :

$$R_a = \frac{L_a \cdot N \cdot r}{a^2 \cdot S_a} \quad (\text{ohmios}) \quad (2.15)$$

R_a = Resistencia del devanado de armadura

r = Resistividad del cobre $\Omega/\text{cm}/\text{mm}^2 = 1.76 \times 10^{-8}$ (25°C)
 $= 2.11 \times 10^{-8}$ (75°C)

Puesto que la resistencia varía directamente con la temperatura se ha considerado en esta tesis una temperatura de 75°C para el cálculo de resistencias, debido a que muchas normas recomiendan esta temperatura como un valor normalizado.

2.3.6 PESO DEL DEVANADO DE ARMADURA

El peso total de todo el devanado de armadura puede calcularse como sigue :

$$G_a = L_a \times N \times S_a \times 8.9 \times 10^{-5} \quad \text{Kg} \quad (2.16)$$

G_a = Peso del cobre de armadura (kg)

S_a = Area de la sección del conductor de armadura (mm^2)

CAPITULO III

EL CIRCUITO MAGNETICO

3.1 PARTES CONSTITUTIVAS

El circuito magnético para una máquina de corriente continua se ilustra en la Fig. 3.1a, en la cual se muestra que el circuito magnético por cada par de polos abarca el yugo del estator, polo, entrehierro, dientes de armadura y el yugo de la armadura. Puesto que el material que forma las distintas partes del circuito magnético no es el mismo, hará que la densidad del flujo no sea la misma, por esta razón los ampere-vueltas por polo serán calculados separadamente para cada parte del circuito magnético.

3.2 AMPERE-VUELTAS PARA EL ENTREHIERRO

Los ampere-vueltas por polo para el entrehierro en una armadura ranurada puede calcularse de la manera siguiente :

$$AT_g = \frac{B_g \delta K_a}{1.26} \quad (\text{A.V.}) \quad (3.1)$$

B_g = Densidad de flujo máxima en el entrehierro (Gauss)

δ = Longitud del entrehierro en el centro del polo (cm).

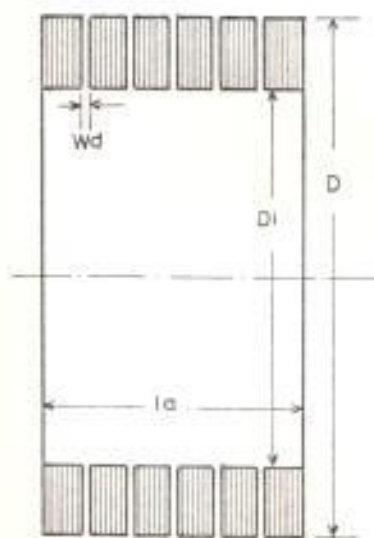
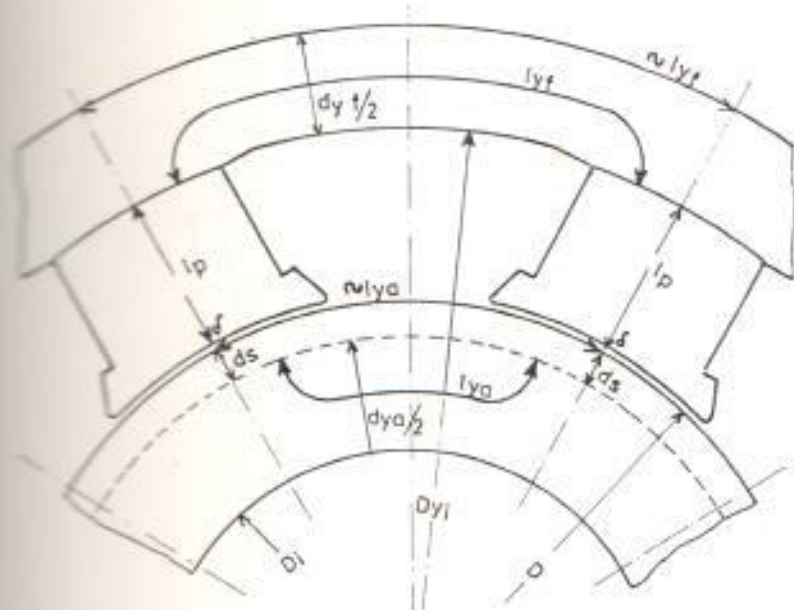


Fig. 10.3.1. PARAMETROS UTILIZADOS EN EL REDISEÑO DE UNA MAQUINA DE C.C.

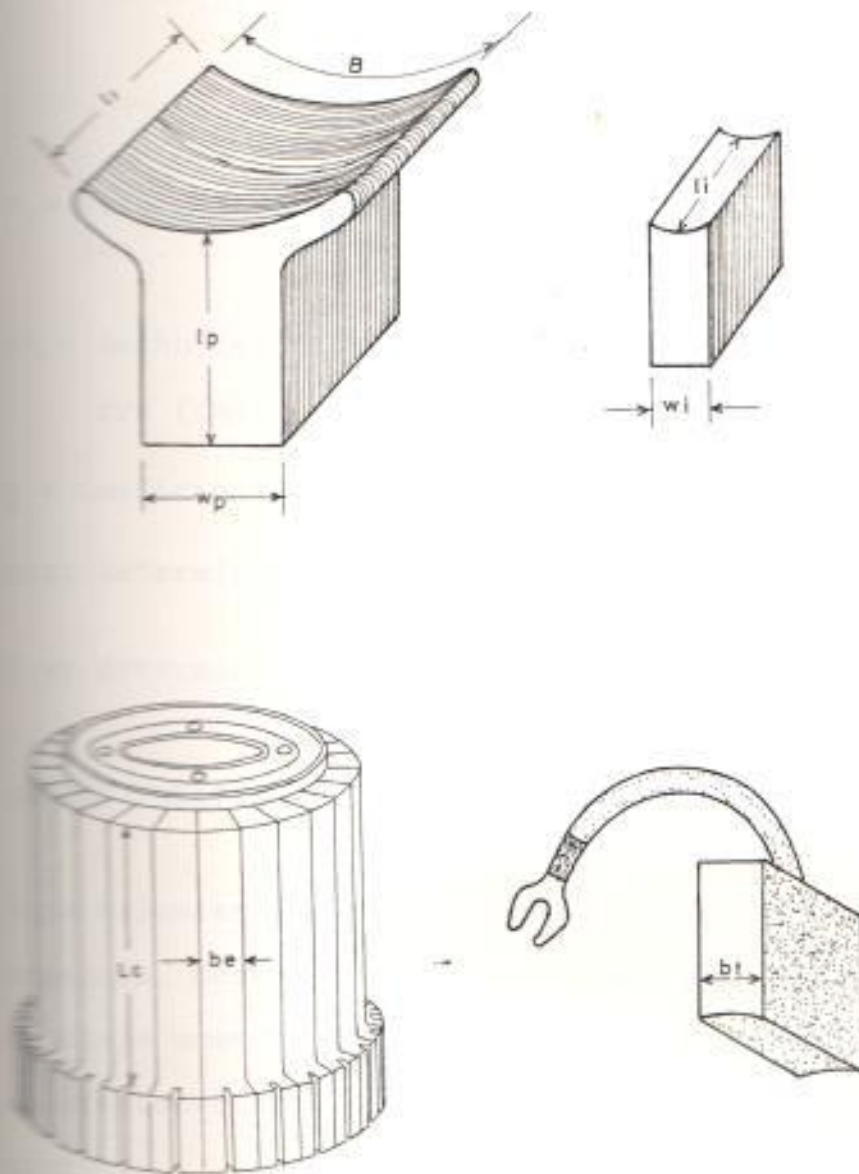


Fig. N° 33 c PARAMETROS UTILIZADOS EN EL RE-DISEÑO DE UNA MAQUINA DE C. C.

K_d = Factor que toma en cuenta el aumento de reluctancia del entrehierro debido a las ranuras, cuyo valor es :

$$K_d = \frac{t_1}{wt_1 + y \delta} \quad (3.2)$$

t_1 = Paso del diente en la superficie de la armadura (cm).

wt_1 = Ancho del diente en la superficie del entrehierro (cm).

y = Coeficiente de entrehierro

para determinar "y" se utiliza la Fig. 3.2.

δ se determina como se indicó en la sección 1.4.

EL AMPERE-VUELTAS DE LOS DIENTES DE ARMADURA

Para calcular los ampere-vueltas para los dientes de armadura, deberá tomarse en cuenta que la densidad de flujo aumenta y la permanencia del hierro en el diente decrece al pasar del extremo al fondo del diente.

El procedimiento para calcularlos por ser a criterio del autor de este trabajo el que mejor se adapta al método de interpolación utilizado en el programa de computación consiste en tomar pares ordenados de densidad en el diente a 1/3 del ancho mínimo vs los av/cm

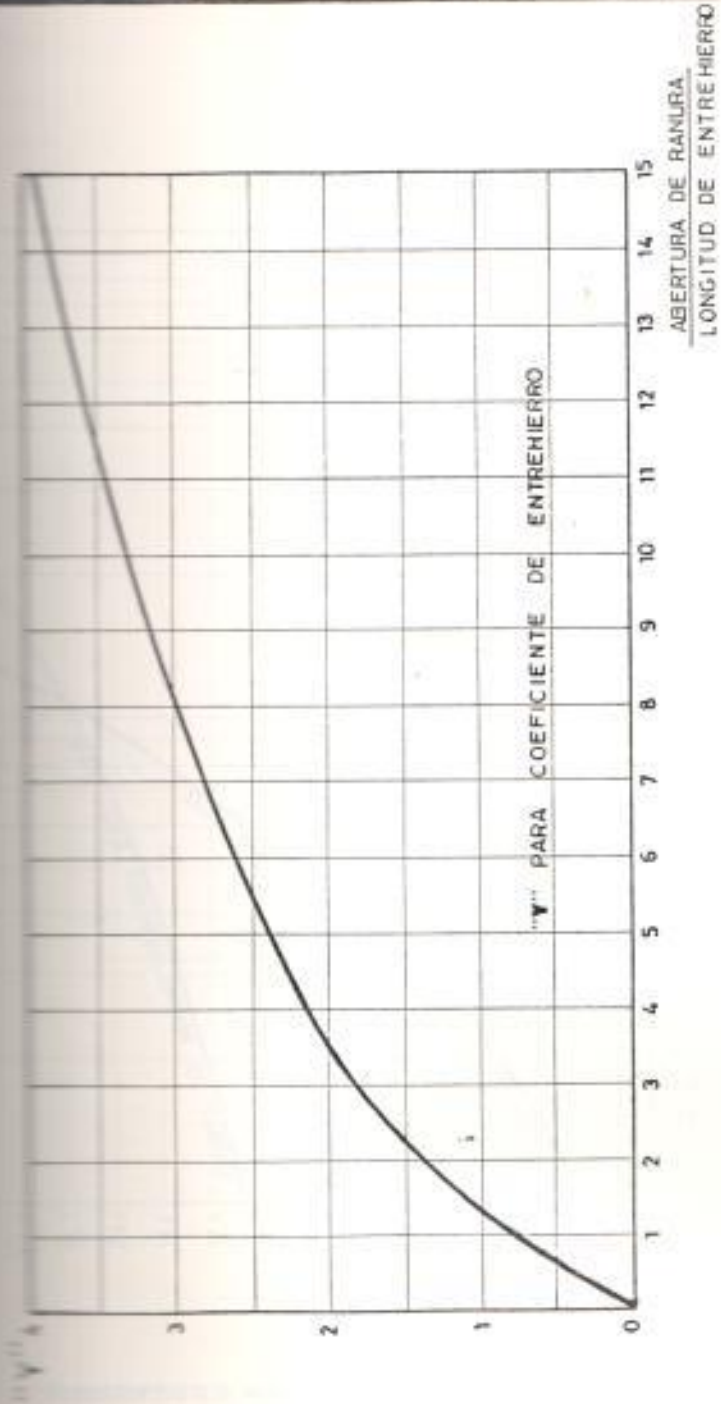
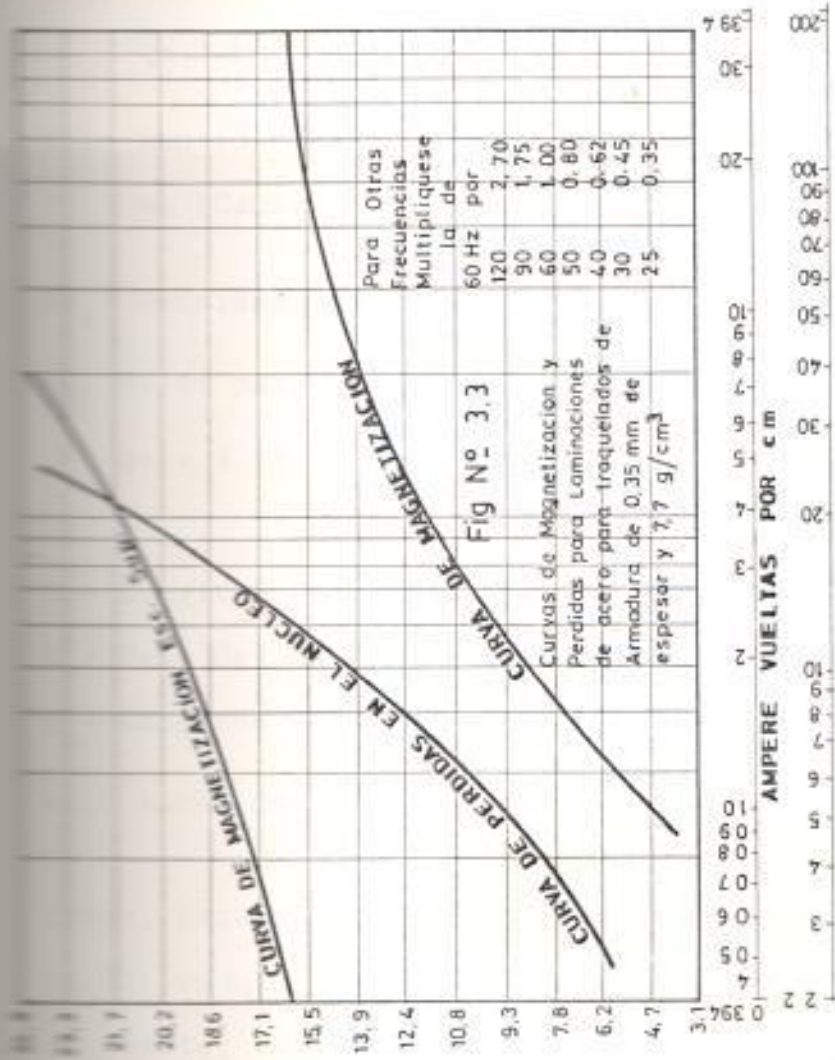


FIG N° 3.2 CURVA PARA CALCULAR COEFICIENTE DE ENTREHIERRO

REF. TITULO: Diseño de aparatos electricos
AUTOR: John H. Kuhlmann
PAG: 84



WATIOS DE PERDIDAS

REF TITULO: Diseño de aparatos electricos
AUTOR: John H. Kuhlmann
PAG: 542

de la Fig. 3.3, los cuales se grafican, luego se calcula la densidad de flujo aparente para cada par ordenado como sigue :

$$Bt'_3 = Bt_3 + K_t \cdot a_{t_t} \quad (3.3)$$

Bt'_3 = Densidad de flujo aparente a 1/3 del ancho mínimo (Gauss).

Bt_3 = Densidad de flujo real a 1/3 del ancho mínimo

Av_{t_t} = Av/cm para la densidad en el diente

$$K_t = 8.13 \left(\frac{\ell_{t_3}}{\ell_n \cdot wt_3} - 1 \right) \quad (3.4)$$

ℓ = Longitud del núcleo de armadura (cm).

t_3 = Paso del diente a 1/3 del ancho mínimo (cm)

ℓ_n = Longitud neta del núcleo de armadura (cm).

wt_3 = Ancho del diente a 1/3 del ancho mínimo (cm).

Luego, para el valor Bt'_3 deseado a partir de la curva Bt'_3 vs a_{t_t} (ver Fig. 3.4) se obtienen los Av/cm en el diente, luego :

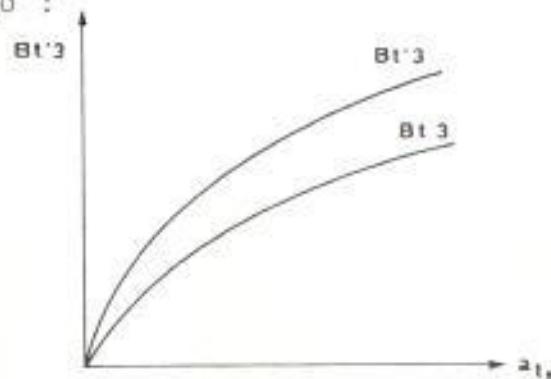


FIG. N° 3.4: DENSIDAD DE FLUJO APARENTE EN EL DIENTE A 1/3 DEL ANCHO MÍNIMO

$$At_t = a_{t_t} \cdot l_t \quad (3.5)$$

a_{t_t} = Ampere-vueltas por polo en el diente

l_t = Longitud de la trayectoria del flujo en los dientes.

3.3.4 AMPERE-VUELTAS PARA EL YUGO DE ARMADURA

La densidad de flujo en el yugo de armadura puede ser calculada por la fórmula siguiente :

$$B_{ya} = \frac{\phi}{(1 - nd \cdot wd) \cdot d_{ya} \cdot K_1} \quad (3.6)$$

B_{ya} = Densidad de flujo en el yugo de armadura (Gauss)

ϕ = Flujo por polo (líneas)

nd = Número de ductos de ventilación

wd = Ancho de ductos de ventilación (cm)

K_1 = Factor de laminación, 0.88 a 0.93

$$d_{ya} = (D - 2ds) - D_i \quad (3.7)$$

donde:

d_{ya} = Doble profundidad radial del yugo de armadura (cm).

D = Diámetro exterior de la armadura (cm)

D_i = Diámetro interior de la armadura (cm)

Los Av/cm para el valor de B_{ya} se encuentra por medio de la Fig. 3.3. Los Av por polo requeridos para enviar el flujo a través del hierro de la armadura

abajo de las ranuras es :

$$A_{Iya} = a_{tya} \cdot l_{ya} \quad (3.8)$$

a_{tya} = Av/cm para la densidad en el yugo de armadura (cm).

l_{ya} = Longitud de la trayectoria del flujo en el yugo de la armadura (cm) :

$$l_{ya} = \frac{[D - (2d_s + \frac{1}{2} d_{ya})] \pi}{2p} \quad (3.9)$$

d_s = Profundidad de la ranura (cm)

p = Número de polos

EL AMPERE-VUELTAS PARA EL POLO

El flujo en los polos no es constante, sino que varía, siendo mayor cerca del yugo, decreciendo hacia la espata polar.

El flujo total es igual al flujo por polo (ϕ) que atraviesa el entrehierro y entra en la armadura más un flujo que no cruza el entrehierro, pero que pasa entre los polos y se llama flujo disperso (ϕ_1).

La relación del flujo total al flujo por polo se llama factor de dispersión y se lo calcula mediante la siguiente expresión :

$$k = \frac{\phi + \phi_1}{\phi} \quad (3.10)$$

λ = Factor de dispersión

a_{λ} = Flujo de dispersión (líneas)

Para propósitos de cálculo se utilizará los siguientes valores de :

MAQUINA	λ
Máquina de 4 y 6 polos	1.2
Máquinas con $50 \leq D \leq 125$ cm	1.2
Máquinas con $D > 125$ cm	1.18

Para calcular la densidad de flujo en el polo, se podrá suponer que el flujo es uniforme e igual a $\lambda\phi$:

$$B_p = \frac{\lambda\phi}{l_p w_p} \quad (3.11)$$

B_p = Densidad de flujo en el polo (Gauss)

l_p = Longitud axial de la zapata polar (cm)

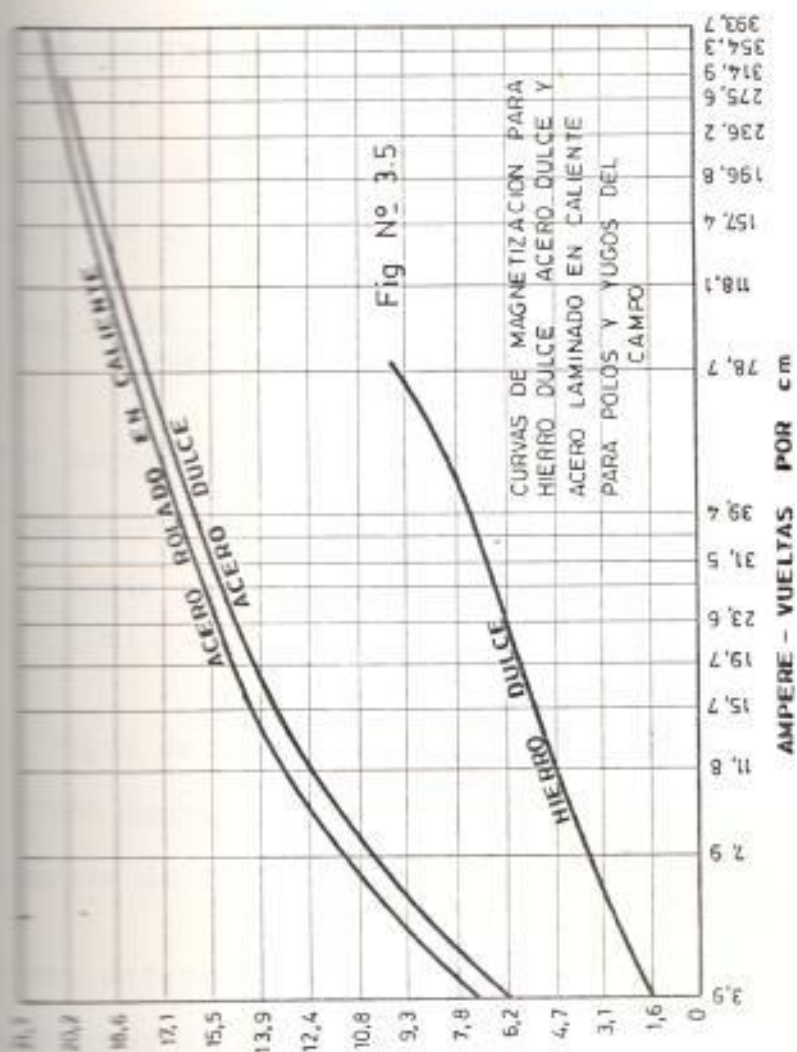
w_p = Ancho del cuerpo del polo (cm).

B_p no debe exceder de 15500 Gauss para polos laminados y de 12400 Gauss, para polos de acero fundido.

A partir de la curva de la Fig. 3.5 se hallará los a_{λ} /cm para el valor de B_p calculado, luego :

$$AT_p = a_{tp} \cdot l_p \quad (3.12)$$

AT_p = Av/polo, para el polo de campo



REF. TITULO: Diseño de aparatos eléctricos

AUTOR: John H. Kuhlmann

PAG: 542

λ_p = Av/cm para la densidad en el polo

l_p = Longitud radial del polo (cm)

3.5. IMPERE-VUELTAS PARA EL YUGO DE CAMPO

La densidad de flujo en el yugo del campo puede calcularse de la siguiente manera :

$$B_{yf} = \frac{\lambda \phi}{l_y dy_f} \quad (3.13)$$

B_{yf} = Densidad de flujo, en el yugo del campo (Gauss)

l_y = Longitud axial del yugo del campo (cm)

dy_f = Doble profundidad radial del yugo del campo (cm).

Para yugos de acero fundido, B_{yf} no deberá exceder de 10000 Gauss y para yugos de acero rolado no debe ser mayor de 12400 Gauss.

Una vez determinado B_{yf} , por medio de la Fig. 3.5, encontramos los Av/cm para el yugo del campo, luego:

$$A_{Tyf} = a_{tyf} \cdot l_{yf} \quad (3.14)$$

donde:

A_{Tyf} = Av/polo para el yugo del campo

a_{tyf} = Av/cm para la densidad en el yugo del campo

l_{yf} = Longitud de la trayectoria del flujo en el yugo del campo (cm).

$$lyf = \frac{(D_{yi} + \frac{1}{2} dyf)\pi}{2p} \quad (3.15)$$

D_{yi} = Diámetro interno del yugo del campo (cm).

3.17 AMPERE-VUELTAS TOTALES

Las ampere-vueltas totales por polo en vacío y al voltaje normal serán :

$$ATP = AT_g + AT_t + AT_{ya} + AT_p + AT_{yf} \quad (3.16)$$

3.18 AMPERE-VUELTAS DE ARMADURA POR POLO

Las ampere-vueltas por polo para la armadura se calculan por medio de la fórmula siguiente :

$$ATP_a = \frac{I_a N}{2p_a} \quad (3.17)$$

ATP_a = Ampere-vueltas de armadura por polo

I_a = Corriente de armadura (amp)

a = Número de circuitos en paralelo

p = Número de polos

Para operación estable bajo condiciones de carga variable los Av/polo para el devanado de campo deberá ser aproximadamente el 80% de los ampere-vueltas por polo de armadura. Cambiando la longitud del entrehierro, los ampere-vueltas para el devanado de campo podrán ajustarse para cumplir lo anterior.

CAPITULO IV

REDISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO

4.1 DEVANADO DE CAMPO DERIVADO

El devanado de campo derivado proporciona la fuerza magnetomotriz (F.M.M.) que produce el flujo por polo (principal), en una máquina de corriente continua. La F.M.M. es prácticamente constante para todo rango de operación, y actuando con el devanado serie, cuya F.M.M. depende de la corriente de carga, el número total de ampere-vueltas en una máquina compuesta debe ser capaz de vencer la reluctancia de las varias partes del circuito magnético cuando la densidad de flujo requerida sea establecida en la armadura.

Puesto que la bobina derivación es conectada a una fuente de F.E.M. constante, sus ampere-vueltas son directamente proporcionales al área de la sección transversal del conductor y para propósitos prácticos independiente del número de vueltas.

En máquinas compuestas se acostumbra a considerar una caída de voltaje en un reostato para el campo derivado de un 20% a 30% del voltaje terminal. Luego el tamaño del conductor para el campo derivado será calculado considerando dicha caída de tensión.

4.1.1 LONGITUD DE LA ESPIRA MEDIA

La longitud de la espira media del campo derivado podrá calcularse de acuerdo a la siguiente fórmula (ver Fig. 4.1).

$$L_f = 2\ell_1 + 2(wp - 2wd) + \pi \left[d_f + (2wd + 0.24) \right] \quad (4.1)$$

L_f = Longitud de la espira media de la bobina de campo (cm).

ℓ_1 = Longitud axial de la zapata polar (cm)

wp = Ancho del cuerpo del polo (cm)

wd = Ancho del ducto de ventilación (cm)

d_f = Espesor de la bobina de campo (cm)

h_f = Altura de la bobina de campo

El valor de d_f debe estimarse por comparación con bobinas de campo de máquinas con características similares a la que se va a rediseñar.

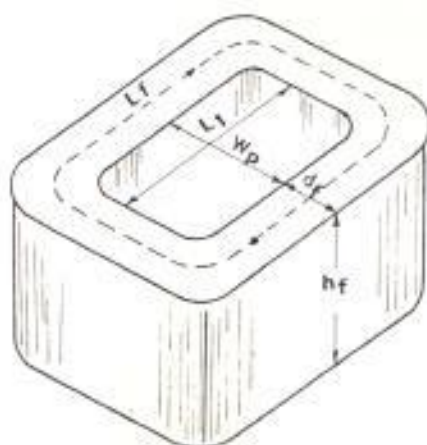


FIG. N° 4.1 : DIMENSIONES DE LA BOBINA DE CAMPO

4.3.2 SECCION DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DERIVADO.

Para el caso de generadores, el campo derivado se diseña para un voltaje de 20 a 30% menor que el voltaje en los terminales de la máquina. La regulación del voltaje podrá lograrse entonces por medio de un reostato de campo.

$$S_f = \frac{ATP_f \cdot L_f \cdot p \cdot 2.11}{E_t (0.7 \text{ a } 0.8) \times 10^7} \quad (4.2)$$

S_f = Area de la sección del conductor del campo derivado (mm^2).

ATP_f = Ampere-vueltas por polo del campo derivado.

L_f = Longitud de la espira media de la bobina de campo derivado (cm).

p = Número de polos

E_t = Voltaje terminal.

Cuando la sección calculada para un conductor cae entre dos tamaños normales, podrá hacerse la mitad de la bobina con el tamaño mayor y la otra mitad con el menor. Luego, la sección del conductor será :

$$S_f = \frac{S_{f_1} t_{f_1} \times S_{f_2} t_{f_2}}{t_{f_1} + t_{f_2}} \quad (4.3)$$

t_f = Número de espiras por polo de campo derivado.

4.2.3 NUMERO DE ESPIRAS POR POLO

Para determinar el número de espiras por polo, primero determinamos la corriente en el devanado de campo derivado :

$$i_f = S_f \cdot A_f \quad (4.4)$$

i_f = Corriente en el devanado de campo derivado (amp)

A_f = Densidad de corriente en el campo derivado (amp/mm²)

A_f se determina con la ayuda de la Fig. 4.2.

$$t_f = \frac{ATP_f}{i_f} \quad (4.5)$$

t_f = Número de espiras por polo de campo derivado.

ATP_f = Ampere-vueltas por polo del campo derivado.

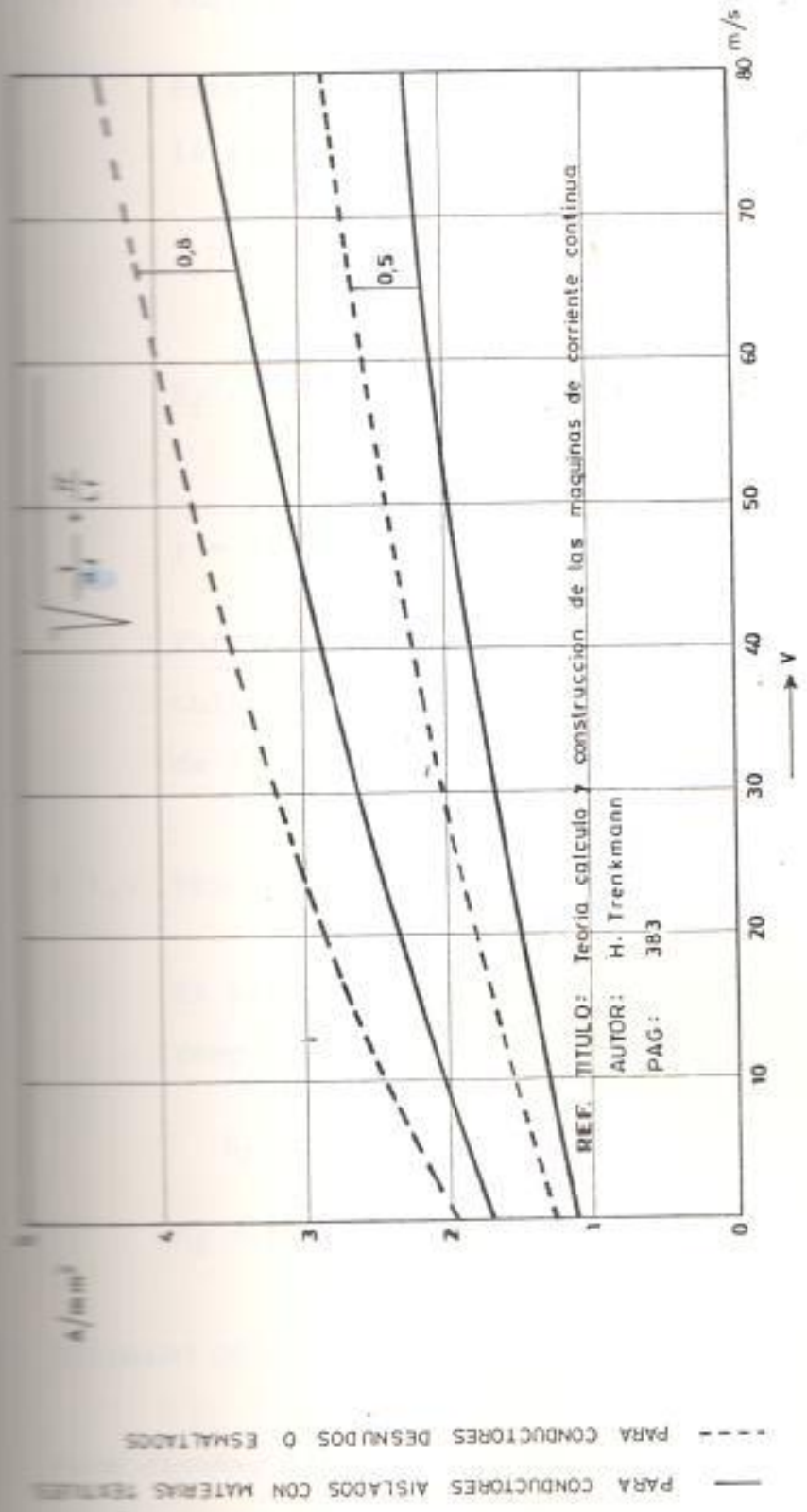


Fig No.4.2 DENSIDADES DE CORRIENTE ADMISIBLES EN LOS POLOS PRINCIPALES Y AUXILIARES

4.1.4 RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO.

Esta se puede calcular por medio de la fórmula siguiente :

$$R_f = \frac{L_f \cdot t_f \cdot \rho_r}{S_f \times 10^9} \quad (4.6)$$

R_f = Resistencia del devanado de campo derivado (ohmios)

ρ_r = 2.11 (75°C); 1.77 (25°C)

Para propósitos de esta tesis, todos los cálculos se han considerado a una temperatura de 75°C.

4.1.5 PESO DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO.

El peso del cobre desnudo para la bobina de campo derivado es :

$$G_f = L_f \cdot t_f \cdot \rho_c \cdot S_f \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (4.7)$$

G_f = Peso del cobre del campo derivado (kg)

4.2 DEVANADO DE CAMPO SERIE.

Para diseñar este devanado se parte de la densidad de corriente del devanado de campo serie, la cual a su vez se obtiene como un porcentaje de la densi

dad de corriente del campo derivado, conocida la corriente de armadura se determina la sección del conductor.

Puesto que este trabajo considera sólo el caso de máquinas con interpolos, no se toma en cuenta el efecto de desmagnetización longitudinal, considerando sólo el efecto de magnetización transversal, basado en esta consideración los ampere-vueltas para el campo serie son considerados como un porcentaje de los ampere-vueltas de armadura. Debido a que el efecto del campo magnético transversal no puede ser predeterminado, es usual aumentar los ampere-vueltas por polo para el campo serie, en un 20% al valor calculado.

Conocido el número de ampere-vueltas y la corriente de armadura se puede determinar el número de vueltas.

4.2.1 LONGITUD DE LA ESPIRA MEDIA.

Los devanados de campo serie se colocan frecuentemente encima de los campos derivados, por lo que la longitud de la espira media será mayor que la del campo derivado, y se la puede calcular por la fórmula siguiente :

$$L_s = 2\ell_1 + 2(wps - wds) + \pi [dfs + 2(2wds + 0.24)] + 5 \quad (4.8)$$

L_s = Longitud de la espira media de la bobina del campo serie (cm).

ℓ_1 = Longitud axial de la zapata polar (cm).

$$wps = wp + 2df$$

dfs = Espesor de la bobina de campo serie (cm)

wds = Ancho de ductos de ventilación de la bobina serie.

Se ha considerado 5 cm para las puntas de la bobina que se interconectan con las demás bobinas del campo serie.

4.2.2 SECCION DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO SERIE.

La sección del conductor del devanado de campo serie puede ser determinada mediante la siguiente expresión :

$$S_s = \frac{I_s}{A_s} \quad (4.9)$$

S_s = Sección del conductor del devanado de campo serie (amp/mm²)

I_s = Corriente del devanado serie (amps).

A_s = Densidad de corriente en el devanado de campo serie (amp/mm²).

I_s es igual a la corriente de armadura para máquinas compuesto-largo e igual a la corriente de línea para máquinas compuesto-corto.

La densidad de corriente es determinada como se indicó en la sección 3.2, en la cual el porcentaje varía del 110% al 115% :

$$A_s = (1.1 \text{ a } 1.15) A_f$$

4.2.3 NUMERO DE ESPIRAS POR POLO

El número de espiras por polo para el devanado de campo serie es :

$$t_s = \frac{ATP_s}{I_s} \quad (4.10)$$

ATP_s = Ampere-vueltas para el devanado de campo serie.

Los ATP_s se determinan como se indicó en la sección 3.2.

$$ATP_s = (0.15 \text{ a } 0.25) ATP_a$$

4.2.4 RESISTENCIA DEL DEVANADO SERIE

Esta se la puede calcular por la siguiente fórmula :

$$R_s = \frac{L_s t_s p \cdot r}{S_s \times 10^4} \quad (4.11)$$

R_s = Resistencia del devanado de campo serie (ohmios).

t_s = Número de espiras por polo del devanado de campo serie.

S_s = Sección del conductor del devanado de campo serie (mm^2).

4.2.5 PESO DEL DEVANADO SERIE

El peso del cobre desnudo para el devanado de campo serie es :

$$G_s = L_s \cdot t_s \cdot p \cdot S_s \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (4.12)$$

G_s = Peso del cobre del devanado de campo serie (kg).

La constante 8.9×10^{-5} es el peso específico del cobre por unidad de volumen.

4.2.6 RESISTENCIA DE DESVIACION.

Cuando la generación está alejada de la carga a la cual se va a dar servicio se utilizan generadores hipercompuestos, en los cuales al aumentar la carga aumenta el voltaje generado debido al aumento de flujo

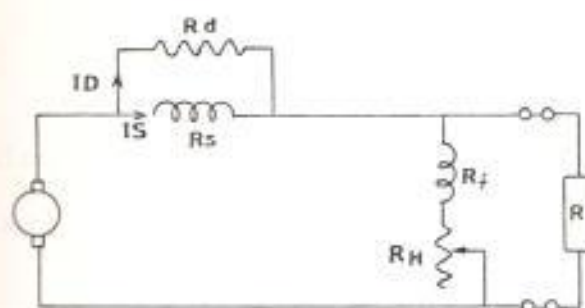


FIG. N° 4.3 : RESISTENCIA DE DESVIACION EN GENERADOR COMPUESTO

en el devanado serie. En este tipo de generadores pueden presentarse casos en que el voltaje en la recepción sea mayor que el de la carga conectada.

Con el fin de solucionar este problema existen las llamadas resistencias de desviación que son en la práctica de valor fijo, tienen alta resistividad, son de temperatura constante, devanadas con manganeso o constantan.

La resistencia de desviación como indica la Fig. 4.3 se coloca en paralelo con el devanado serie, dependiendo de su valor se puede lograr que el generador hipercompuesto se comporte como compuesto plano o como subcompuesto.

Para determinarla se utiliza el siguiente procedimiento :

- 1) Operar el generador como un generador derivación (no conecte el campo serie) a velocidad y carga

nominal:

- 2) Tomar datos de corrientes de campo, línea y voltaje terminal.
- 3) Con la carga nominal elevar el voltaje hasta el nivel deseado incrementando la corriente de campo. Este incremento de la corriente de campo por el número de vueltas del devanado derivación serán los ampere-vueltas del campo serie necesarios para obtener el voltaje deseado a la salida del generador, luego

$$(\delta I_f) N_f = I_s N_s \quad (4.13)$$

La resistencia de desviación será :

$$R_d = \frac{I_s R_s}{I_d} \quad (4.14)$$

- δI_f = Incremento de la corriente de campo derivado a plena carga, necesaria para producir el voltaje terminal deseado (amps).
- N_f = Número de vueltas por polo del campo derivado.
- N_s = Número de vueltas por polo del campo serie.
- R_s = Resistencia del campo serie (ohmios).
- I_s = Corriente requerida en el campo serie para producir el voltaje deseado en los terminales (amps).

I_d = Corriente requerida en la resistencia debilitadora para producir I_s .

R_d = Resistencia de desviación (ohmios).

CAPITULO V

REDISEÑO DEL DEVANADO DE CONMUTACION

EL TIEMPO DE CONMUTACION

Cuando una bobina pasa por la zona de conmutación és se es cortocircuitada por una escobilla y durante el corto lapso de tiempo entre el cierre y apertura de este cortocircuito la corriente en la bobina debe cambiar desde un valor estable I_a a un valor estable $-I_a$ (ver Fig. 5.1)

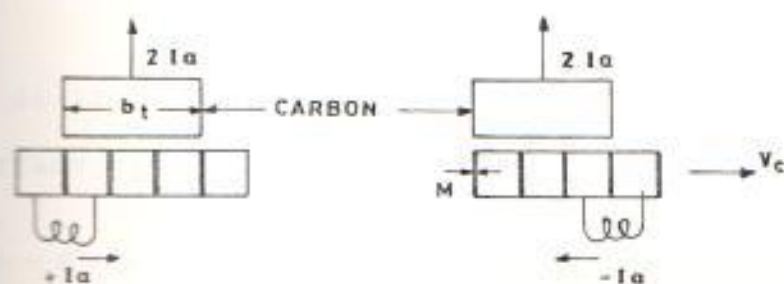


Fig. 5.1 - FASES EN EL PROCESO DE CONMUTACION EN UNA BOBINA

donde :

b_t = espesor de la escobilla (cm).

M = espesor de la mica (cm)

v_c = velocidad periférica del conmutador (cm/seg)

El tiempo de conmutación es :

$$t_c = \frac{b_t - M}{v_c} = \frac{b_t}{v_c} ; \quad b_t > M \quad (5.1)$$

t_c = tiempo de conmutación (seg).

Lo anterior significa que el tiempo tomado por cualquier punto bajo la superficie del carbón es aproximadamente el tiempo que dura el cortocircuito.

ANCHO DE LA ZONA DE CONMUTACION:

El ancho de la zona de conmutación varía con el paso de bobina, así para paso completo las bobinas de la parte superior e inferior conmutan al mismo tiempo y para paso acortado las bobinas de la parte superior e inferior al no iniciar al mismo tiempo la conmutación aumentan el ancho de la zona.

El ancho de la zona de conmutación para paso completo o acortado es :

$$w_c = \left(b + m + \psi - \frac{a}{p} \right) B_r \quad (5.2)$$

donde:

w_c = Ancho de la zona de conmutación (cm).

b = Ancho de la escobilla sobre la circunferencia del conmutador (delgas).

m = Número de delgas por ranura.

ψ = Diferencia de fase en la conmutación.

a = Número de circuitos en paralelo.

p = Número de polos

B_r = Paso de la barra del conmutador en cm, de circunferencia de armadura.

$$\phi = \frac{k}{p} - \frac{1}{2} (y_1 - 1) \quad (5.3)$$

donde:

k = Número de delgas

ϕ_s = Paso posterior = $2 \frac{k}{s} y_s + 1$

m = Número de ranuras

ϕ_p = Paso de bobina

El ancho de la zona de conmutación no excederá del 50% de la zona neutra, donde zona neutra es la porción de la circunferencia de armadura entre dos esquinas polares adyacentes = $(1 - \Psi)\tau$

Ψ = Porcentaje de abarcamiento polar

τ = Paso polar

EL VOLTAJE DE REACTANCIA.

La bobina en conmutación induce en ella una F.E.M. de autoinducción, debido a la inversión de la corriente en la bobina, el voltaje autoinducido actúa siempre en oposición al cambio en la corriente. Si dicha bobina está en relación inductiva con una o más bobinas de la misma ranura que llegan a conmutación al mismo tiempo, habrá también una F.E.M. de inducción mutua. Este voltaje de autoinducción e inducción mutua en la bobina en cortocircuito se denomina voltaje de reactancia y es la causa principal del chisporroteo.

Para máquinas en las que el número de polos es igual al número de interpolos, el voltaje de reactancia se expresa como :

$$e_r = \frac{4.44 \cdot p \cdot t_a \cdot n_s}{10^8} \cdot \frac{m}{A + m - 1} \cdot M \quad (5.4)$$

$$e_r = \left[2 - \frac{\psi}{A+m-1} \right] \left\{ 1.57 \ell \frac{ds}{ws} + 3.67 (\ell - \ell_i) \log \frac{2t_1 - ws}{ws} + 0.8 \ell_i \frac{w_i - w_s}{\delta_i} \right\} + 3.2 \ell_s$$

donde:

e_r = Voltaje de reactancia (voltios)

n_s = Número de espiras por bobina de armadura.

n_p = Revoluciones por segundo.

m = Número de delgas por ranura

A = Ancho de la zona de conmutación para una bobina en las barras del colector (cm).

$$A = b + t - \frac{a}{p}$$

ℓ_s = Profundidad de la ranura (cm).

ℓ_i = Ancho de la ranura (cm).

ℓ = Longitud del núcleo de la armadura (cm).

ℓ_c = Longitud del polo de conmutación (cm).

t_a = Paso del diente en la superficie de la armadura (cm).

ℓ_s = Semilongitud del cabezal y bobina de armadura = $\ell_a - \ell$

ℓ_c = Ancho del polo de conmutación (cm).

ℓ_i = longitud del entrehierro bajo el polo de conmutación (cm).

Si la máquina tiene sólo la mitad de interpolos respecto de sus polos principales, el voltaje de reactancia es :

$$E_{ra} = \frac{2.22 \cdot p \cdot t_a \cdot n_s}{10^8} \cdot \frac{m}{A+m-1} \cdot \left[\left(2 - \frac{\psi}{A+m-1} \right) \left\{ 1.57 \ell \frac{d_s}{w_s} + 1.84(2\ell - \ell_i) \right. \right. \\ \left. \left. + \log 10 \frac{2t_1 - w_s}{w_s} + 0.4 \ell_i \cdot \frac{w_i - w_s}{\delta_i} \right\} + 3.2 \ell_s \right] \quad (5.5)$$

AMPERE-VUELTAS DEL POLO DE CONMUTACION.

Para inducir un voltaje en las bobinas en cortocircuito igual y opuesto al valor medio del voltaje de reactancia el valor medio de la densidad de flujo en el entrehierro del polo de conmutación, cuando el número de interpolos es igual al número de polos principales es :

$$H_{ci} = \frac{30 e_r \times 10^6}{\tau_a \cdot \ell_i \cdot v} \quad (5.6)$$

Cuando sólo hay la mitad de interpolos respecto del número de polos principales, el flujo de dichos polos afecta sólo a un lado de la bobina Y :

$$H_{ci} = \frac{15 e_r \times 10^6}{\tau_a \cdot \ell_i \cdot v} \quad (5.7)$$

unido:

B_{gi} = Densidad de flujo en el entrehierro del polo de conmutación (Gauss).

v = Velocidad periférica de la armadura (m/min).

Los ampere-vueltas para el entrehierro del interpolo

son:

$$AT_{gi} = \frac{B_{gi} \cdot \delta_i \cdot k_i}{1.25} \quad (5.8)$$

k_i = Factor que toma en cuenta la reluctancia en el entrehierro del interpolo (ver sección 3.2).

Los ampere-vueltas para el resto del circuito magnético del polo de conmutación, podrán calcularse de la manera descrita en el capítulo III, para el caso del circuito del polo principal.

Para máquinas normales los ampere-vueltas de las partes de hierro del circuito magnético son generalmente de 0.5 a 1.0 veces los ampere-vueltas del entrehierro para el interpolo, entonces:

$$AT_{i1} = ATP_a + AT_{gi} (1.5 \text{ a } 2.0) \quad (5.9)$$

AT_{i1} = Ampere-vueltas por polo para el polo de conmutación.

AT_{i2} = Ampere-vueltas de armadura por polo.

5.10 NÚMERO DE ESPIRAS POR POLO.

El número de espiras por polo para la bobina del campo de conmutación es :

$$Z_{c1} = \frac{ATP_1}{I_a} \quad (5.10)$$

5.11 SECCIÓN DEL CONDUCTOR.

La sección del conductor del devanado de conmutación es :

$$S_{c1} = \frac{I_a}{A_1} \quad (\text{mm}^2) \quad (5.11)$$

A_1 = Densidad de corriente en el cobre del campo de conmutación (A/mm^2).

A_1 se calcula a partir de la curva de la Fig. 4.2, también para propósitos estimativos se puede considerar que A_1 es 85% de la densidad de corriente en el cobre del campo derivado (A_f).

5.12 ANCHURAS DE LA ESPIRA MEDIA DE LA BOBINA DE CONMUTACION.

La forma de la bobina de interpolo es igual a la de la bobina de campo, luego por analogía :

$$L_{c1} = 2L_1 + 2(w_1 - 2wd_1) + \pi \left[(d_1 + 2(wd_1 - 0.24)) \right] + 2.5 \quad (5.12)$$

L_i = Longitud de la espira media de la bobina del campo de conmutación (cm).

a_i = Ancho del ducto de ventilación de la bobina del campo de conmutación (cm).

b_i = Profundidad de la bobina del campo de conmutación (cm).

RESISTENCIA DEL DEVANADO DEL CAMPO DE CONMUTACION.

Se la calcula mediante la siguiente expresión :

$$R_i = \frac{L_i \cdot t_i \cdot p \cdot r}{S_i \times 10^4} \quad (\text{ohmios}) \quad (5.13)$$

$r = 2.11$ (75°C) ; 1.76 (25°C).

PESO DEL DEVANADO DEL CAMPO DE CONMUTACION.

El peso del cobre desnudo del devanado del campo de conmutación es :

$$G_i = L_i \cdot t_i \cdot p \cdot S_i \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (\text{kg}) \quad (5.14)$$

CAPITULO VI

PERDIDAS, EFICIENCIA Y ELEVACION DE TEMPERATURA

Cuando una máquina convierte energía de una forma en otra; mecánica en eléctrica en un generador o eléctrica en mecánica en un motor- lo hace con un rendimiento que siempre es menor que el 100%, esto significa que la potencia consumida o de entrada es mayor que la potencia entregada o de salida y la diferencia es igual a las pérdidas internas.

Las pérdidas de potencia en las máquinas eléctricas rotativas se pueden dividir en :

1) Las que son causadas por rotación.

2) Las que provienen de la circulación de corriente en

Las diversas partes de la máquina.

La figura 6.1, representa la división de potencia en una máquina de corriente continua, en la que se destacan las pérdidas que se producen al actuar como generador o motor.

PERDIDAS ROTACIONALES.

Estas pérdidas varían con la velocidad de la armadura, para calcularlas se las divide en :

- pérdidas en el núcleo de la armadura.

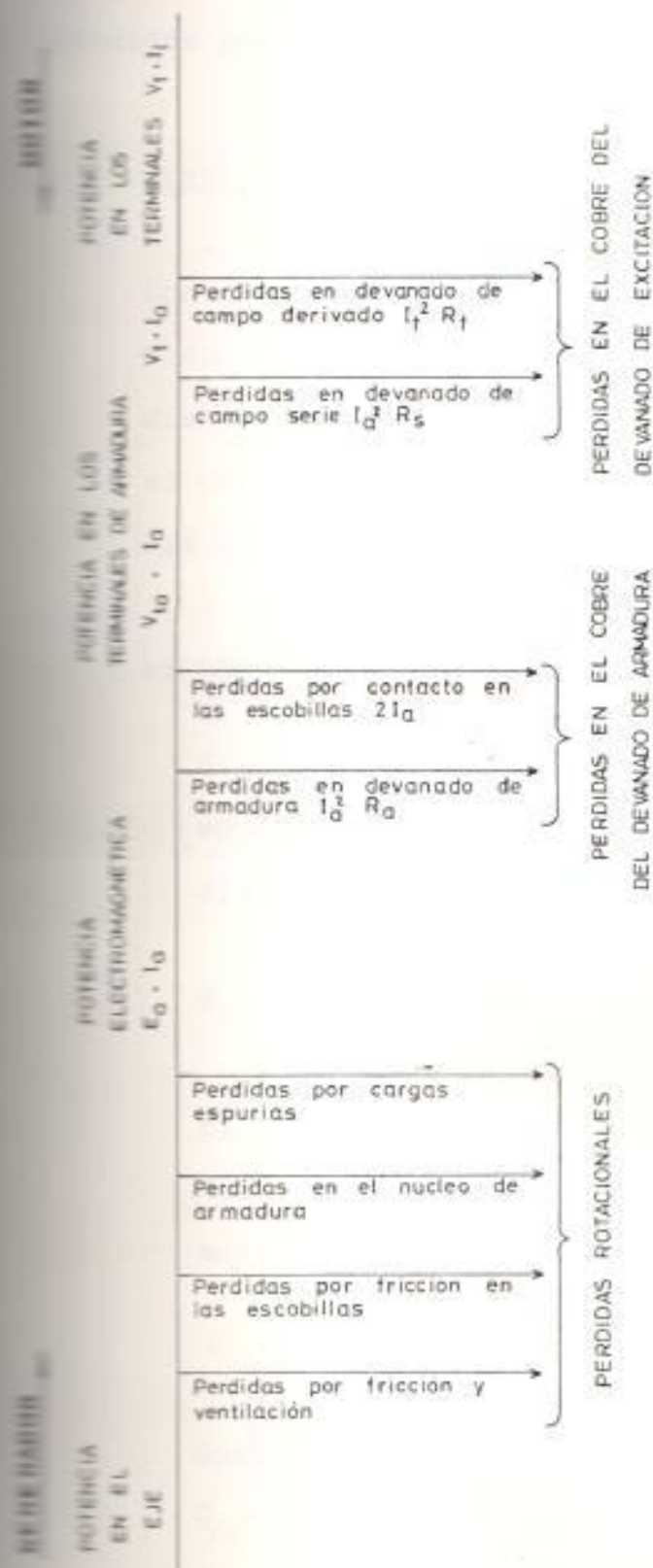


Fig No 6 1 DIVISION DE POTENCIA EN UNA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

- pérdidas por fricción en las escobillas.
- pérdidas por fricción y ventilación.

4.1.1 PERDIDAS EN EL NUCLEO DE LA ARMADURA.

Dentro de esta clasificación de pérdidas, debido a que las densidades de flujo para los dientes y yugo de armadura no son las mismas, el cálculo de las pérdidas en estas partes se las realiza por separado.

a) PERDIDAS EN LOS DIENTES :

Si W_{t_1} y W_{t_2} son los anchos máximo y mínimo del diente de armadura, el ancho promedio del diente es :

$$W_{ta} = \frac{W_{t_1} + W_{t_2}}{2} \quad (6.1)$$

El peso del hierro en los dientes de armadura puede calcularse por medio de la fórmula siguiente :

$$G_{ct} = W_{ta} (\ell - nd \cdot wd) K_1 S ds \times 7.65 \times 10^{-3} \quad (6.2)$$

donde:

G_{ct} = Peso del hierro en los dientes de armadura (Kg)

ℓ = longitud del núcleo de armadura (cm)

nd = Número de ductos de ventilación.

w_d = Ancho del ducto de ventilación.

K_1 = Factor de laminación = 0.88 a 0.93

S = Número de ranuras

d_s = Profundidad de la ranura

La constante 7.65×10^{-3} es el peso específico en Kg/cm^3 para el acero laminado. Conociendo el peso, se calcula la densidad de flujo en el diente a $\frac{1}{3}$ del ancho mínimo (ver capítulo III, sección 3.3) y luego con la ayuda de la curva de la Fig. 3.3, se calculan los vatios/Kg de pérdidas para los dientes de armadura, luego :

$$W_{ct} = W_{tkg_3} \times G_{ct} \times f_{ct} \quad (6.3)$$

donde:

W_{ct} = Pérdidas en los dientes (vatios)

f_{ct} = Factor de corrección para frecuencias diferentes de 60 Hz.

W_{tkg_3} = Vatios/Kg para los dientes.

8) PERDIDAS EN EL YUGO DE ARMADURA.

El peso del hierro en el yugo de armadura puede calcularse mediante la siguiente expresión :

$$G_{cy} = \frac{\pi}{4} \left[(D - 2ds)^2 - D_i^2 \right] (\ell - nd \cdot wd) K_t \times 7.65 \times 10^{-3} \quad (6.4)$$

G_{cy} = Peso del hierro en el yugo de la armadura (Kg).

D = Diámetro exterior de la armadura (cm).

D_i = Diámetro interior de la armadura (cm).

Conocida la densidad de flujo en el yugo de la armadura (ver Capítulo II, sección 3.4) y utilizando la curva de la Fig. 3.3, se obtienen los vatios/Kg para el yugo de la armadura, luego :

$$W_{cy} = W_{tkgy} * G_{cy} * f_{cy} \quad (6.5)$$

W_{cy} = Pérdidas en el yugo de armadura (vatios)

W_{tkgy} = Vatios/Kg para el yugo.

f_{cy} = Factor de corrección para frecuencias diferentes de 60 Hz.

La suma de las pérdidas en el yugo y en los dientes dará las pérdidas en el núcleo debido a los flujos de frecuencia fundamental; para tener en cuenta las pérdidas adicionales, a la suma de estas pérdidas se las multiplica por un factor que para propósitos de cálculo podrá tomarse como 2.5, el cual podrá determinarse por pruebas en

máquinas similares, luego :

$$W_c = 2.5 (W_{ct} + W_{cy}) \quad (6.6)$$

W_c = Pérdidas totales en el núcleo (vatios).

6.7.2 PERDIDAS POR FRICCIÓN EN LAS ESCOBILLAS.

Estas pérdidas dependen de la presión en las escobillas, velocidad periférica del conmutador y coeficiente de fricción entre el conmutador y las escobillas, pueden calcularse aproximadamente mediante la siguiente fórmula:

$$W_{of} = P S_b C_f V_c \times 1.065 \quad (6.7)$$

W_{of} = Pérdidas por fricción en las escobillas (vatios)

P = Presión para cada escobilla = 0.1 a 0.16 Kg/cm²

C_f = Coeficiente de fricción entre el carbón y el conmutador = 0.15 a 0.25 para escobillas de carbón y de grafito.

V_c = Velocidad periférica del conmutador (m/min) :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot RPM}{100}$$

D_c = Diámetro del conmutador (cm)

RPM = Velocidad de rotación de la armadura (R.P.M.)

S_b = Superficie total de las escobillas (cm) :

$$S_b = n_a \cdot n_b \cdot b_t \cdot w_b \quad (6.8)$$

n_a = Número de brazos portaescobillas.

n_b = Número de escobillas por brazo.

b_t = Espesor de la escobilla (cm).

w_b = Ancho de la escobilla (cm).

6.2.3 PERDIDAS POR FRICCIÓN Y VENTILACION.

Estas pérdidas generalmente se las calcula sin separarlas, se las puede determinar a partir de pruebas de máquinas similares o con la ayuda de curvas. Para propósitos de este trabajo se utilizan las curvas de la Fig. 6.2, para determinar de manera aproximada las pérdidas por fricción y ventilación.

6.2.4 PERDIDAS EN EL COBRE.

Estas pérdidas se producen por la circulación de corriente en las diversas partes de los devanados que integran la máquina.

6.2.5 PERDIDAS EN EL COBRE DE ARMADURA.

Exceptuando las máquinas para las cuales la corriente de campo derivado es un gran porcentaje de la corriente de carga, las pérdidas

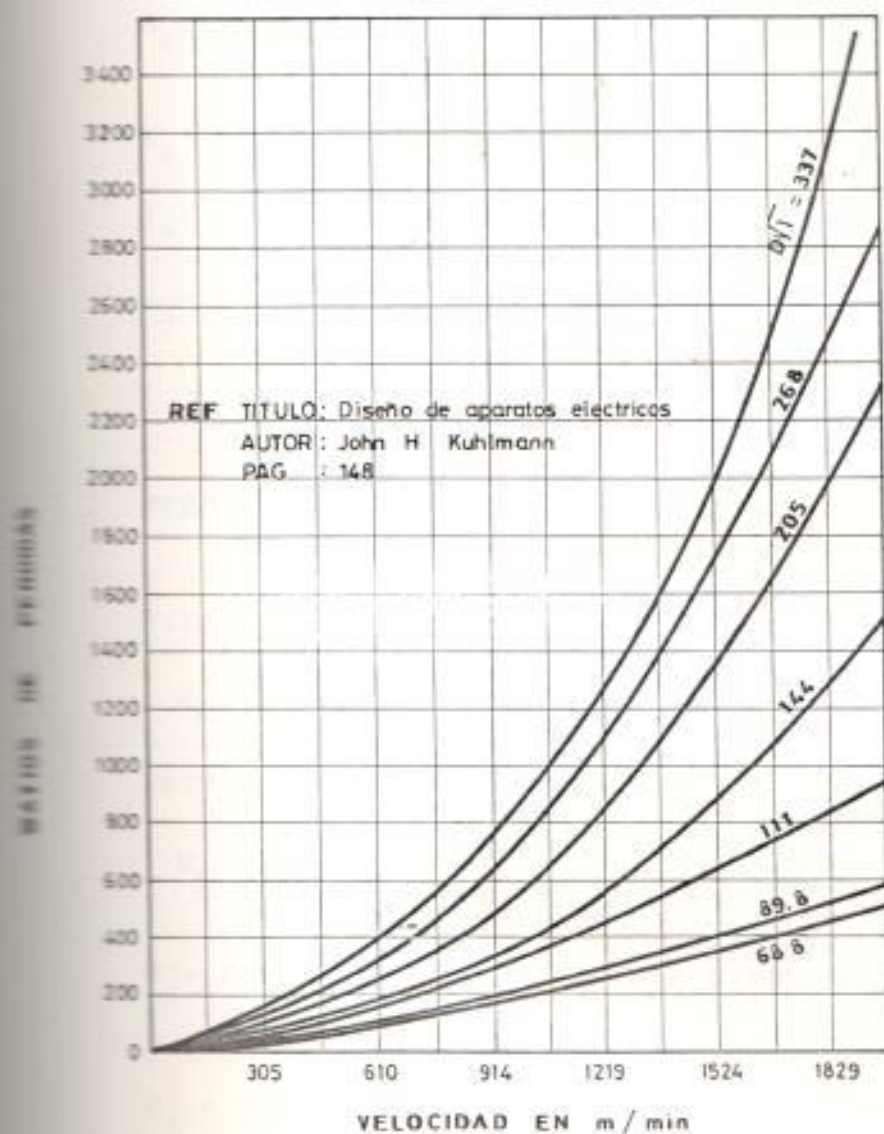


Fig N°6.2 PERDIDAS APROXIMADAS DE FRICCIÓN Y VENTILACION PARA MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA

en el cobre de armadura podrán considerarse que varían con el cuadrado de la carga para motores y generadores.

$$W_a = I_a^2 R_a \quad (6.9)$$

W_a = Pérdidas en el cobre de armadura (vatios)

I_a = Corriente de armadura (amps).

R_a = Resistencia del devanado de armadura (ohmios).

6.2.2 PERDIDAS EN EL COBRE DEL CAMPO SERIE.

Para una máquina compuesto largo es :

$$W_s = I_a^2 \cdot R_s \quad (6.10)$$

Para una máquina compuesto corto :

$$W_s = I^2 \cdot R_s \quad (6.11)$$

W_s = Pérdidas en el cobre del campo serie (vatios).

R_s = Resistencia del devanado serie (ohmios).

I = Corriente de línea (amps).

6.2.3 PERDIDAS EN EL COBRE DEL CAMPO DE CONMUTACION

$$W_i = I_a^2 R_i \quad (6.12)$$

W_i = Pérdidas en el cobre del campo de conmutación (vatios).

R_i = Resistencia del devanado de interpolo
(ohmios).

6.2.4 PERDIDAS DE CONTACTO EN LAS ESCOBILLAS.

Estas pérdidas dependen de la condición del conmutador y de la calidad de la conmutación obtenida, es por tanto, muy difícil predecir las pérdidas de contacto. Las normas A.I.E.E. recomiendan suponer dos voltios como caída de voltaje en los contactos para escobillas negativas y positivas, en escobillas de carbón y grafito con colas de cobre:

$$W_b = 2 \cdot I_a \quad (6.13)$$

W_b = Pérdidas de contacto en las escobillas
(vatios).

6.2.5 PERDIDAS EN EL COBRE DEL CAMPO DERIVADO.

Se las calcula mediante la siguiente expresión :

$$W_f = I_f^2 \cdot R_f \quad (6.14)$$

W_f = Pérdidas en el cobre del campo derivado
(vatios).

I_f = Corriente en el devanado de campo derivado (amps).

R_f = Resistencia del devanado de campo derivado (ohmios).

Cuando un reostato se conecta en serie con el devanado de campo derivado, deben incluirse las pérdidas del reostato al calcular la eficiencia.

PERDIDAS POR CARGAS ESPURIAS.

Son difíciles de determinar, resultan de factores poco definidos tales como:

- 1) Deformación del flujo debido a la reacción de armadura.
- 2) Repartición no uniforme de la corriente en el devanado de armadura entre las diversas ramas en paralelo.
- 3) Corrientes de cortocircuito en las bobinas sometidas a conmutación.

Se asume que estas pérdidas son el 1% de la potencia de salida de la máquina para potencias mayores a 100 Kw a 575 R.P.M.

EFICIENCIA

Es relación de la potencia de salida a la potencia

de salida más todas las pérdidas se expresa como sigue :

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{Pot salida}}{\text{Pot salida} + \text{Pérdidas}} \times 100 \quad (6.15)$$

Para propósitos de cálculo de la eficiencia, las pérdidas son la suma de todas las que se han calculado durante el desarrollo de este capítulo.

6.5 ELEVACION DE TEMPERATURA

Las pérdidas en las diferentes partes de las máquinas eléctricas se convierten en calor, lo cual produce una elevación de temperatura sobre la del aire circundante, el valor de la temperatura final depende de la capacidad calorífica de los materiales aislantes utilizados y la rapidez con la cual el calor pueda ser conducido de dichos materiales al medio de enfriamiento. La temperatura final se alcanza cuando el calor se disipa con la misma rapidez con que es generado.

6.5.1 ELEVACION DE TEMPERATURA DE LA ARMADURA.

La superficie de enfriamiento por vatio de pérdida para diámetros de armadura menores a 40 cm. es :

$$\frac{S_a}{W'_a} = \frac{\left\{ \left[\pi D(\ell + 2\ell_e) + \pi D_i \ell + \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(2 + nd) \right] \right\} (1 + 0.00168V)}{W_a + W_c + W_{FV}} \quad (6.16)$$

Para diámetros de armadura mayores de 40 cm. se tiene :

$$\frac{S_a}{W'_a} = \frac{\left\{ \left[\pi D(\ell + 4\ell_e) + \pi D_i \ell + \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(2 + nd) \right] \right\} (1 + 0.00168V)}{W_a + W_c + W_{FV}} \quad (6.17)$$

$\frac{S_a}{W'_a}$ = Superficie de enfriamiento/vatio (cm^2/vatio)

ℓ = Longitud del núcleo de armadura.

ℓ_e = Longitud horizontal del cabezal de bobina de armadura (cm).

W_{FV} = Pérdidas por fricción y ventilación (vattios).

V = Velocidad periférica de la armadura (mt/min)

La elevación de temperatura de la armadura será :

$$T_a = \frac{C_{ca}}{S_a/W'_a} \quad (6.18)$$

T_a = Elevación de temperatura de la armadura ($^{\circ}\text{C}$).

C_{ca} = Coeficiente de enfriamiento.

C_{ca} podrá determinarse sólo por pruebas y no

es el mismo para dos máquinas similares. En ausencia de datos se pueden usar valores para C_{ca} desde 290 a 420.

5.2 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE CAMPO.

La superficie de enfriamiento para las bobinas de campo derivado es :

$$S_f = 2(d_f + h_f) \ell_f p \quad (6.19)$$

S_f = Superficie de enfriamiento (cm^2)

d_f = Espesor de la bobina de campo derivado (cm)

h_f = Altura de la bobina de campo derivado (cm)

ℓ_f = Longitud de la espira media de la bobina de campo derivado (cm).

p = Número de polos

La superficie por vatio de pérdidas para el devanado de campo derivado es :

$$\frac{S_f}{W_f} = \frac{2 (d_f + h_f) \ell_f \cdot p}{i_f^2 R_f} \quad (6.20)$$

Si el campo serie se devana encima del campo derivado, los dos embobinados podrán considerarse como uno solo y calcular la superficie de enfriamiento por vatio combinada :

$$\frac{S_f}{W_f + W_s} \quad (6.21)$$

La elevación de temperatura para el devanado de campo es :

$$T_f = \frac{C_{cf}}{S_f / W_f} \quad (6.22)$$

C_{cf} = Coeficiente de enfriamiento del campo derivado :

$$C_{cf} = C_c + 178 (1 - f_s) d_f \quad (6.23)$$

El valor de C_{cf} es para bobinas sin ductos de ventilación; si existen ductos de ventilación, deberá incluirse en el cálculo de la superficie total de enfriamiento.

El valor de C_c se lo determina a partir de la Fig. 6.3.

Si las bobinas de campo tienen ductos de ventilación en cada extremo :

$$C_{cf} = C_c + 140 (1 - f_s) d_f \quad (6.24)$$

f_s = Factor de espacio del cobre = $\frac{(\text{área de la sección})}{(\text{diámetro cubierto})^2}$

Si las bobinas de campo tienen ductos de ventilación a lo largo de toda la bobina :

$$C_{cf} = C_c + 89 (1 - f_s) d_f \quad (6.25)$$

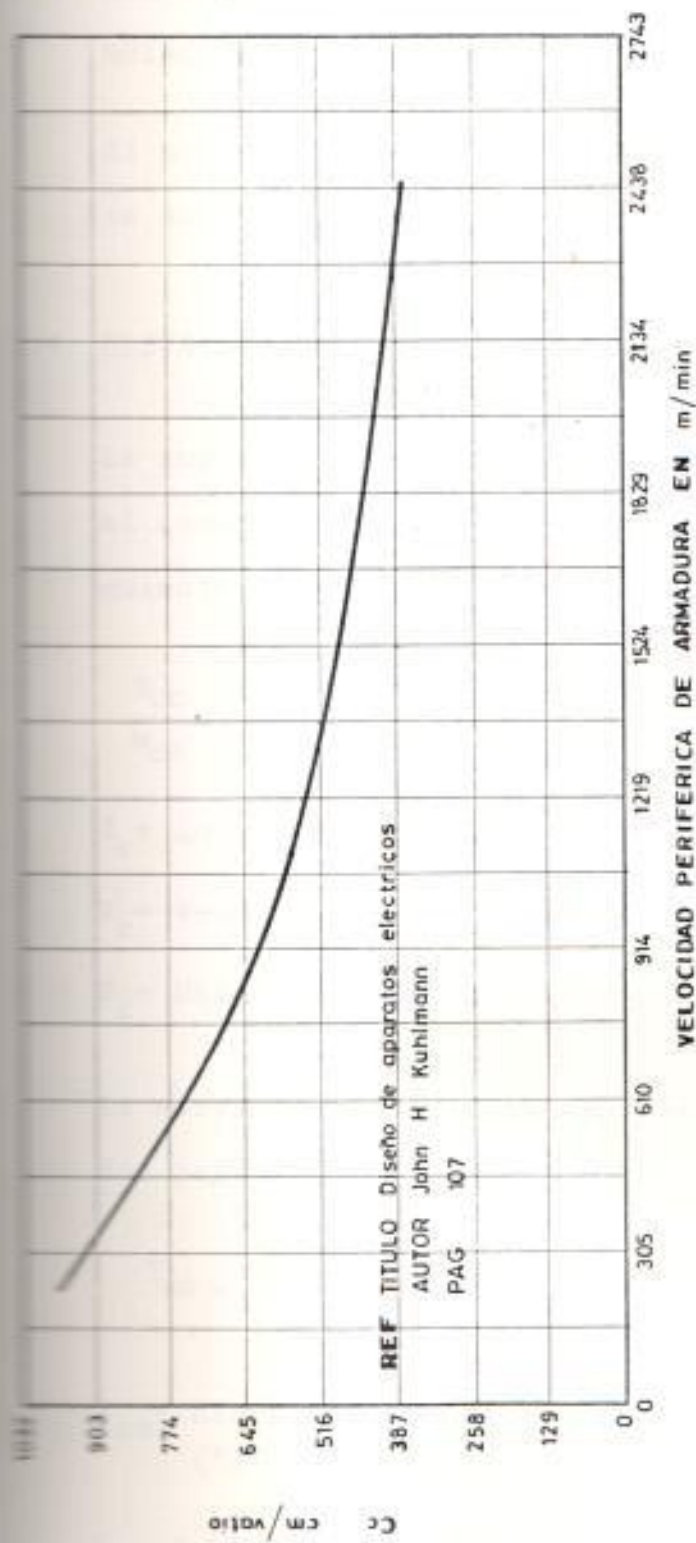


Fig N° 6.3 COEFICIENTE DE ENFRIAMIENTO PARA BOBINAS
 DEL CAMPO DERIVADO

6.5.3 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE CONMUTACION.

El procedimiento y las fórmulas para calcular se son las mismas que las de la sección 6.5.2.

6.5.4 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL CONMUTADOR.

La superficie de enfriamiento por vatio para el conmutador se la expresa de la manera siguiente :

$$\frac{S_{co}}{W_{co}} = \frac{\pi D_c \ell_c (1 + 0.00051 V_c)}{W_b + W_{bf}} \quad (6.26)$$

ℓ_c = Longitud del conmutador (cm)

V_c = Velocidad periférica del conmutador (mt/min)

D_c = Diámetro del conmutador (cm)

La elevación de temperatura para el conmutador será :

$$T_{co} = \frac{C_{cco}}{S_{co}/W_{cc}} \quad (6.27)$$

T_{co} = Elevación de temperatura del conmutador (°C).

C_{cco} = Coeficiente de enfriamiento para el conmutador = 97 a 129 para máquinas con interpolos.

CAPITULO VII

PROGRAMA DE COMPUTACION

En este capítulo se hará una descripción del programa utilizado para rediseñar los devanados de una máquina de corriente continua. Las fórmulas expuestas en los capítulos anteriores, así como los criterios utilizados han sido transformados a instrucciones en lenguaje FORTRAN IV para ser corrido en el sistema IBM 4341 de la ESPOL.

El programa está compuesto de los siguientes elementos :

- Programa principal GUILL
- Subrutina DENFLU
- Subrutina CAIDA
- Subrutina EXCITA
- Subrutina TRASLA
- Subrutina ONDULA
- Subrutina PTRANA
- Subrutina AMCOND
- Subrutina BUSQUE
- Subrutina POCO
- Subrutina AVCDIE
- Subrutina AVCMAR
- Subrutina AVCMP
- Subrutina DENCOF
- Subrutina YE
- Subrutina DIEN3
- Subrutina FRIVE
- Subrutina CFRIO
- Subrutina INTLAG

PROGRAMA PRINCIPAL GUILL.

El programa GUILL realiza las siguientes funciones

durante su ejecución :

Obtiene la potencia, voltaje, velocidad y eficiencia a la que se desea opere la máquina a rediseñarse.

Obtiene las dimensiones de todos los parámetros que intervienen en el circuito magnético.

llama a todas las subrutinas para que realicen la función con que fueron implementadas.

Compara si los valores que ha calculado son del orden esperado, enviando mensajes cuando no lo son.

Muestra sus valores calculados a la salida.

SUBROUTINA DENFLU.

Esta subrutina se utiliza para calcular la densidad de flujo en el entrehierro.

Como entrada recibe un número n de pares de datos muestrales (x,y), que son: densidad de flujo vs potencia . para un valor dado de potencia. Esta sub
R.P.M. R.P.M.

llama a otra subrutina con el nombre INTLAG que obtiene por interpolación la densidad de flujo en el entrehierro.

100 SUBROUTINA CAIDA

Para un valor dado de potencia * RPM, esta subrutina calcula por interpolación la caída de voltaje en el circuito de armadura como un porcentaje del voltaje terminal.

101 SUBROUTINA EXCITA.

Mediante esta subrutina el programa estima un valor preliminar de la corriente de campo derivado como un porcentaje de la corriente en los terminales.

102 SUBROUTINA TRASLA.

Si el tipo de devanado de armadura es imbricado esta subrutina entrega a la salida los siguientes resultados :

- Número de circuitos en paralelo
- Número total de conductores
- Número de conductores por ranura
- Número de vueltas por bobina
- Paso de colector y paso de bobina
- Número de elementos por bobina

103 SUBROUTINA ONDULA.

Esta subrutina se encarga de calcular los parámetros

estados en la sección 7.5, para el caso que el tipo de devanado de armadura sea ondulado, para lo cual previamente chequea si dicho devanado es realizable.

SUBROUTINA PTRANA.

Esta subrutina tiene como función, calcular para devanados en patas de rana, adicional a los parámetros indicados en la sección 7.5, los siguientes :

- Número de circuitos en paralelo de la parte imbricada.
- Número de circuitos en paralelo de la parte ondulada.
- Grado de multiplicidad de la parte ondulada del devanado.
- Paso de bobina para la sección imbricada.
- Paso de bobina para la sección ondulada.
- Paso de colector de la parte imbricada.
- Paso de colector de la parte ondulada.

SUBROUTINA AMCOND.

Esta subrutina tiene como función calcular el producto ampere-conductores por centímetro por densidad de corriente en la armadura ($Aa * Q$) para lo cual recibe como argumento de entrada la velocidad periférica y diámetro de la armadura.

El producto $Aa * Q$ es entregado al programa principal donde conocido Aa se determinan los ampere-conductores por centímetro de circunferencia de armadura (Q).

SUBROUTINA BUSQUE.

Esta subrutina tiene como función seleccionar la sección y número del conductor para cualquier devanado que se esté calculando sea éste armadura, campo, conmutación.

La subrutina va comparando la sección calculada en el programa principal con las secciones de conductores estandarizadas con la norma americana A.W.G. y elige aquel en que la diferencia entre el valor calculado y el normalizado sea menor.

SUBROUTINA POCO.

Esta subrutina tiene como función calcular los ampere-vueltas de cada una de las partes que componen el circuito magnético de una máquina de corriente continua, éstos son :

- Ampere-vueltas para el entrehierro.
- Ampere-vueltas en los dientes.
- Ampere-vueltas en el yugo de armadura.

- Ampere-vueltas en el polo.
- Ampere-vueltas en el yugo del polo.
- Ampere-vueltas por polo totales.
- Ampere-vueltas por polo para la armadura.

PROGRAMA SUBROUTINA AVCDIE.

Esta subrutina tiene como función obtener los ampere-vueltas/cm a $1/3$ del ancho mínimo del diente, el cual es devuelto a la subrutina "poco" donde se calculan los ampere-vueltas en el diente.

PROGRAMA SUBROUTINA AVCMAR.

Esta subrutina tiene como función calcular los ampere-vueltas/cm en el yugo de la armadura, el cual es devuelto a la subrutina "poco" donde al multiplicar por la longitud del yugo de la armadura se obtienen las ampere-vueltas para el yugo de armadura.

PROGRAMA SUBROUTINA AVCMP.

La función de esta subrutina es calcular los ampere-vueltas/cm para el polo del campo y los ampere-vueltas/cm para el yugo del campo, los cuales son devueltos a la subrutina "poco" donde al multiplicar por la longitud radial del polo (ℓ_p) en el primer caso, y por la longitud de la trayectoria del flujo en el

para el polo y yugo del campo respectivamente.

10. SUBROUTINA DENCOF.

Esta subrutina evalúa la densidad de corriente en el campo derivado y en el campo de conmutación para lo cual necesita como argumentos de entrada la velocidad periférica de la armadura, la longitud de la espira media y la profundidad de la bobina.

11. SUBROUTINA YE.

Se encarga de calcular el coeficiente de entrehierro para lo cual necesita como argumento de entrada la abertura de la ranura y la longitud del entrehierro, este valor calculado es utilizado en la subrutina "YUC" para hallar el factor de entrehierro al calcular los ampere-vueltas en el entrehierro del polo principal, y para calcular los ampere-vueltas en el entrehierro del polo de conmutación.

12. SUBROUTINA DIEN3.

Esta subrutina tiene la función de evaluar las pérdidas en el yugo de la armadura. Este valor calculado es llamado por el programa principal donde se calculan las pérdidas en el yugo de la armadura.

NAME SUBROUTINA FRIVE.

La función de esta subrutina es calcular las pérdidas por fricción y ventilación que se producen en la máquina, para lo cual los argumentos de entrada a la subrutina son la velocidad periférica, diámetro y longitud del núcleo de la armadura.

NAME SUBROUTINA CFRIO.

Esta subrutina tiene la función de calcular el coeficiente de enfriamiento de las bobinas de campo principal y de conmutación, valor que es llamado por el programa principal donde se evalúa la elevación de temperatura de dichas bobinas.

NAME SUBROUTINA INTLAG.

Esta subrutina es eje sobre el cual se realiza todo el programa de computación, su función es interpolar puntos de un conjunto n de pares ordenados (x, y) , los cuales son entregados al programa que la llama. El método de interpolación en que se fundamenta esta subrutina es el de Lagrange (ver Apéndice 2).

CAPITULO VIII

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos en el programa Guill, en este capítulo se hará una descripción de los procedimientos empleados y ensayos experimentales a que fue sometido el motor rediseñado para determinar sus características de operación en condiciones normales y de sobrecarga. Los datos de placa que se le impusieron al motor fueron : 3 HP, 230 V, 1750 R.P.M., conexión compuesta, eficiencia 0.8.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el Laboratorio de maquinaria de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la ESPOL.

4.1 CARACTERISTICA EN VACIO.

Esta característica relaciona la fuerza electromotriz inducida como función de la corriente de excitación, manteniendo constante la velocidad de rotación. Para realizar esta prueba el motor bajo prueba se lo hace trabajar como generador.

8.1.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES

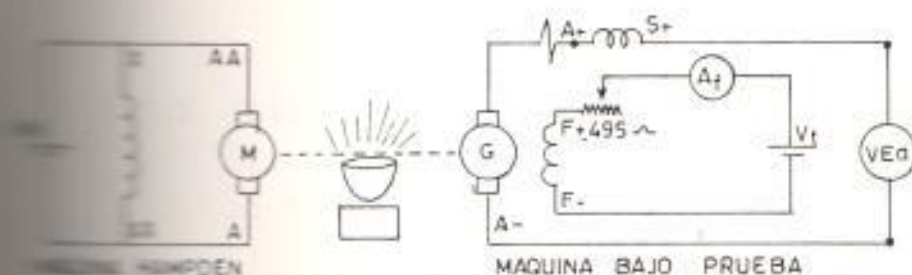


FIGURA 8.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA OBTENER LA CARACTERÍSTICA EN VACÍO.

8.1.2 PROCEDIMIENTO

- 1) Arrancar el motor y llevar el grupo hasta la velocidad nominal de diseño de la máquina bajo prueba.
- 2) Observar que la polaridad del voltaje generado debido al flujo remanente corresponda con la polaridad marcada en sus líneas terminales.
- 3) Energizar el campo del generador, variando el reostato en un solo sentido desde el máximo hasta el mínimo y viceversa.
- 4) Variar la corriente de excitación del generador y manteniendo constante la velocidad del motor, tomar lecturas de voltaje en los terminales y corriente de excitación.
- 5) Anular el flujo remanente de la máquina ba

jo prueba y repetir el procedimiento.

8.1.3 TABLA DE DATOS

a) Con flujo remanente.

VE_a (v)	5	16	21	38	55	74	92	110	127	145	161	169	177	194
A_f (ma)	0	15	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190	200	220

TABLA 8.1 DATOS DE PRUEBA PARA OBTENER CARACTERISTICA EN VACIO.

b) Anulando el flujo remanente se obtuvieron las siguientes lecturas:

VE_a (v)	0	18	35	54	72	91	108	126	143	161	176	192	208	223	230	233
A_f (ma)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	270	275

TABLA 8.2a DATOS DE PRUEBA PARA OBTENER CURVA ASCENDENTE.

VE_a (v)	237	244	248	211	197	182	166	150	133	116	98	80	61	42	23	5
A_f (ma)	282	290	292	240	220	200	179	160	140	120	100	80	60	40	20	0

TABLA 8.2b DATOS DE PRUEBA PARA OBTENER CURVA DESCENDENTE.

Las Figuras 8.2 y 8.3, representan la caracte
ristica en vacio para las Tablas 8.1 y 8.2.

Fig. N.º 8.2 CARACTERÍSTICA EN VACIO

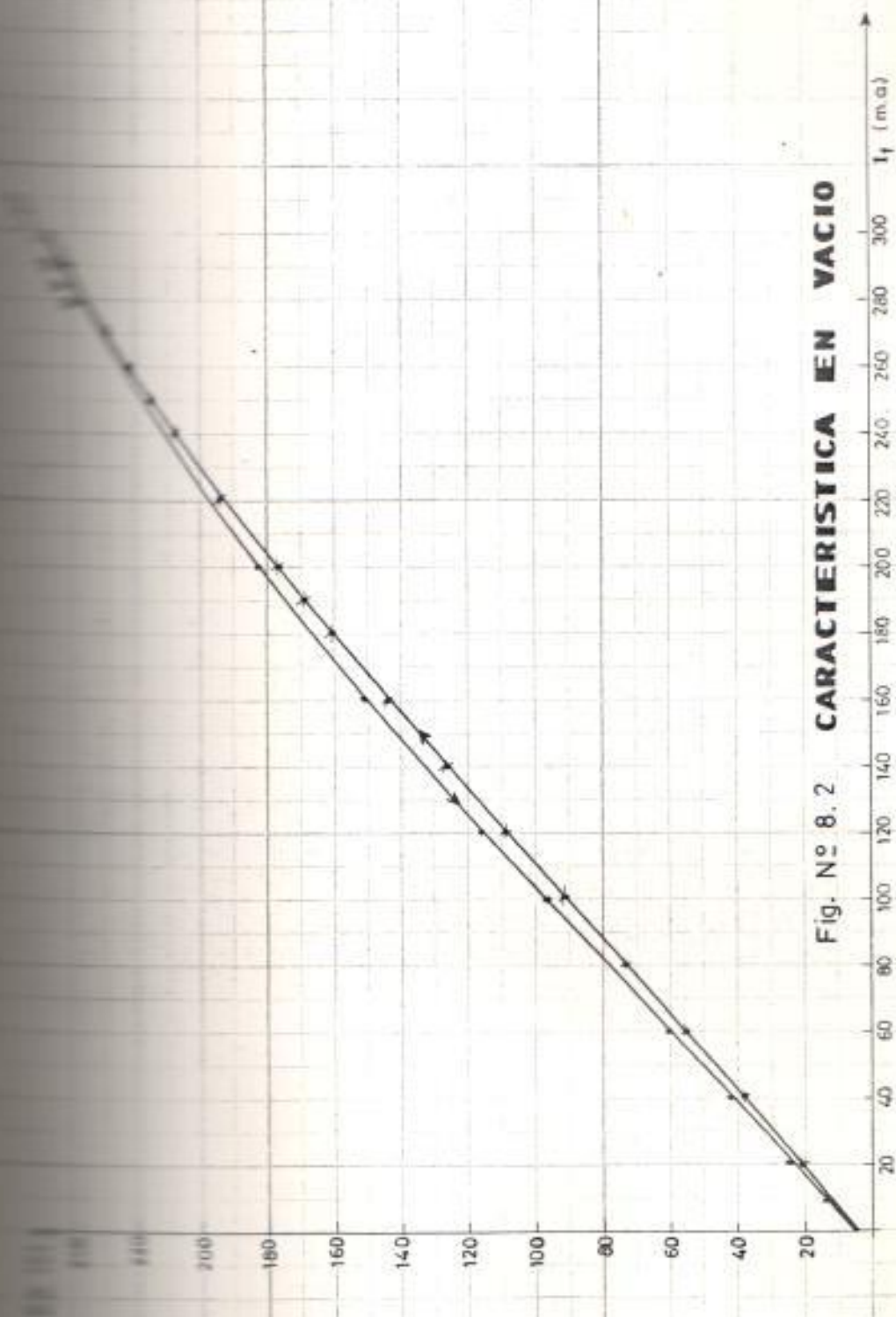
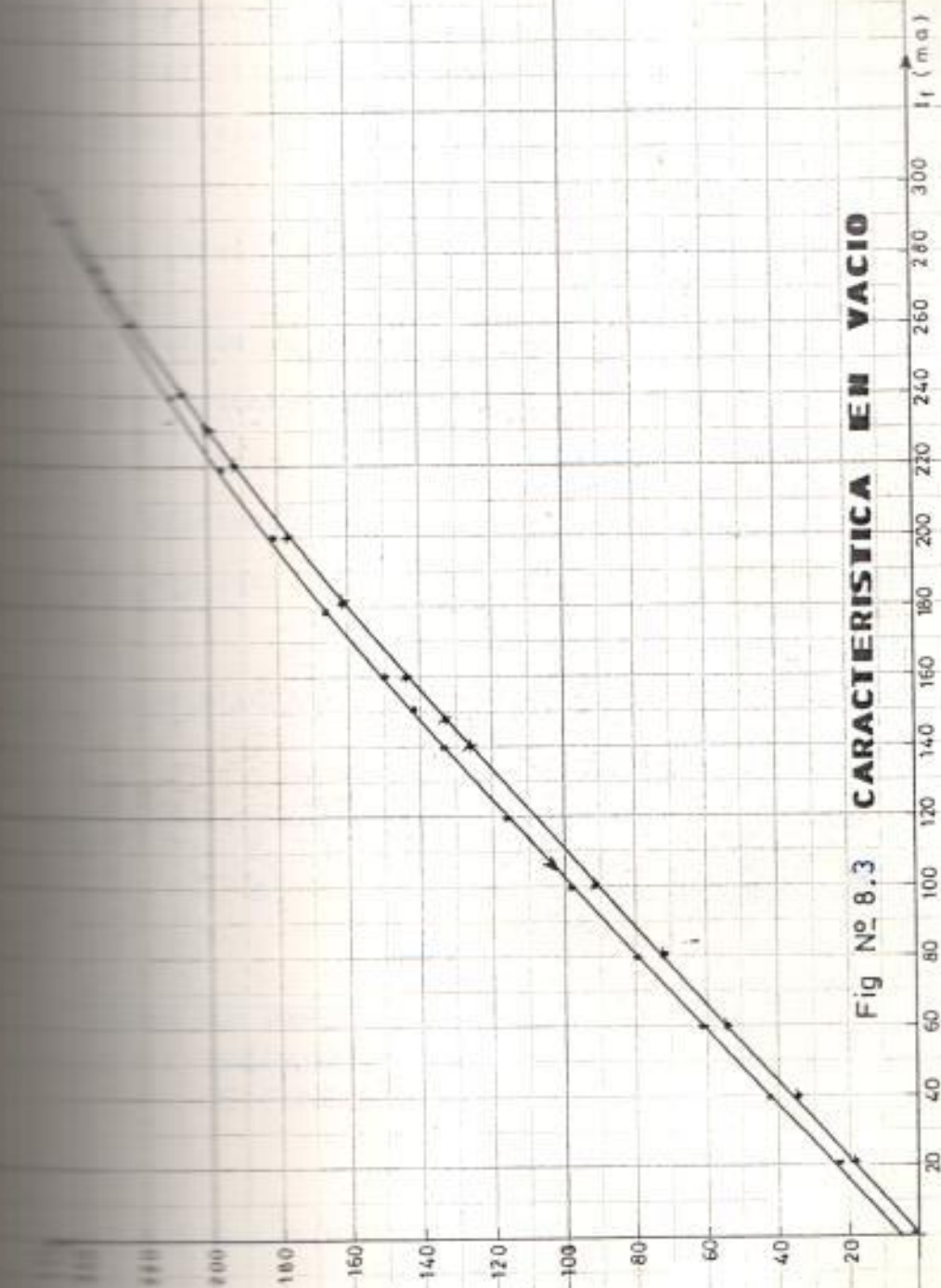


Fig No 8.3 **CARACTERISTICA EN VACIO**

6.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA.

Estas pruebas tienen por objetivo determinar las características eléctricas y mecánicas que tiene la máquina bajo prueba al aplicársele carga.

Las curvas características a obtenerse son :

- a) Torque vs potencia de salida
- b) Corriente de campo vs potencia de salida
- c) Potencia de entrada vs potencia de salida
- d) Eficiencia vs potencia de salida
- e) Regulación de velocidad vs potencia de salida

6.2.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES.

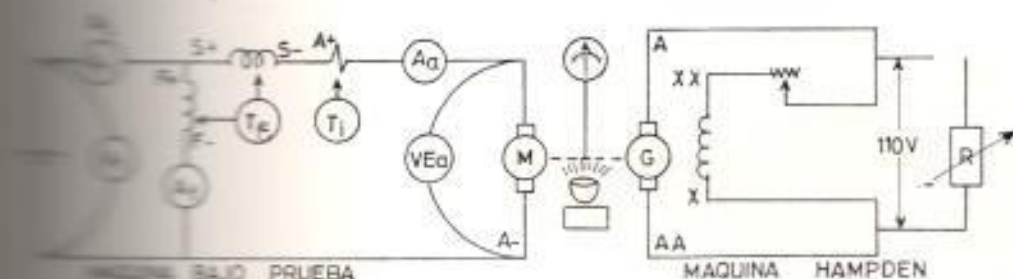


FIGURA 6.4 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA REALIZAR PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA.

6.2.2 PROCEDIMIENTO

- 1) Arrancar la máquina bajo prueba a voltaje nominal de diseño y proceder a conectar carga comenzando con el 25% de la corriente de línea.

- 2) Esperar a que la temperatura en los devanados sea estable.
- 3) Proceder a tomar lecturas de los instrumentos que se indican en la Fig. 8.4.
- 4) Incrementar la carga al 50% de la corriente de línea, luego al 75% y así sucesivamente hasta el 125% manteniendo constante el voltaje de entrada; tomar lecturas para cada caso cumpliendo el paso 2.
- 5) Disminuir la carga por pasos hasta el 25%, tomar lecturas para cada caso, a fin de obtener el promedio de las lecturas.

NOTA: Para obtener la curva de regulación de velocidad fue necesario que el motor se estabilice térmicamente luego de haber trabajado continuamente con carga nominal, manteniendo constante el voltaje de entrada y la corriente de excitación, procediendo luego a tomar las lecturas rápidamente a fin de que la temperatura de los devanados no cambie apreciablemente.

8.2.3 TABLA DE DATOS

Para obtener las características: a, b, c, d, de la sección 8.2, se obtuvieron los siguientes datos de prueba :

Para obtener la característica "e" de la sección 8.2 se obtuvieron las siguientes lecturas:

$\% I_L$	100	75	50	25	vacío
A_L (A)	12	9	6.1	3	1:2
A_a (A)	11.8	8.8	5.8	2.7	0.9
A_F (ma)	186	186	186	186	187
V_{E_a} (v)	223	226	229	228	229
V_t	230	230	230	230	230
n (R.P.M.)	1912	2068	2237	2455	2580
T_F (°C)	47				
T_i (°C)	50				

TABLA 8.4 DATOS DE PRUEBA PARA OBTENER CURVA DE REGULACION DE VELOCIDAD.

A partir de los datos de la Tabla 8.3, se obtuvieron valores promedios, los que se indican en la Tabla 8.5, con los que se grafican las familias de curvas de la Fig. 8.5.

Para la característica de regulación de velocidad los resultados que se grafican en la Fig. 8.5, se indican en la Tabla 8.6.

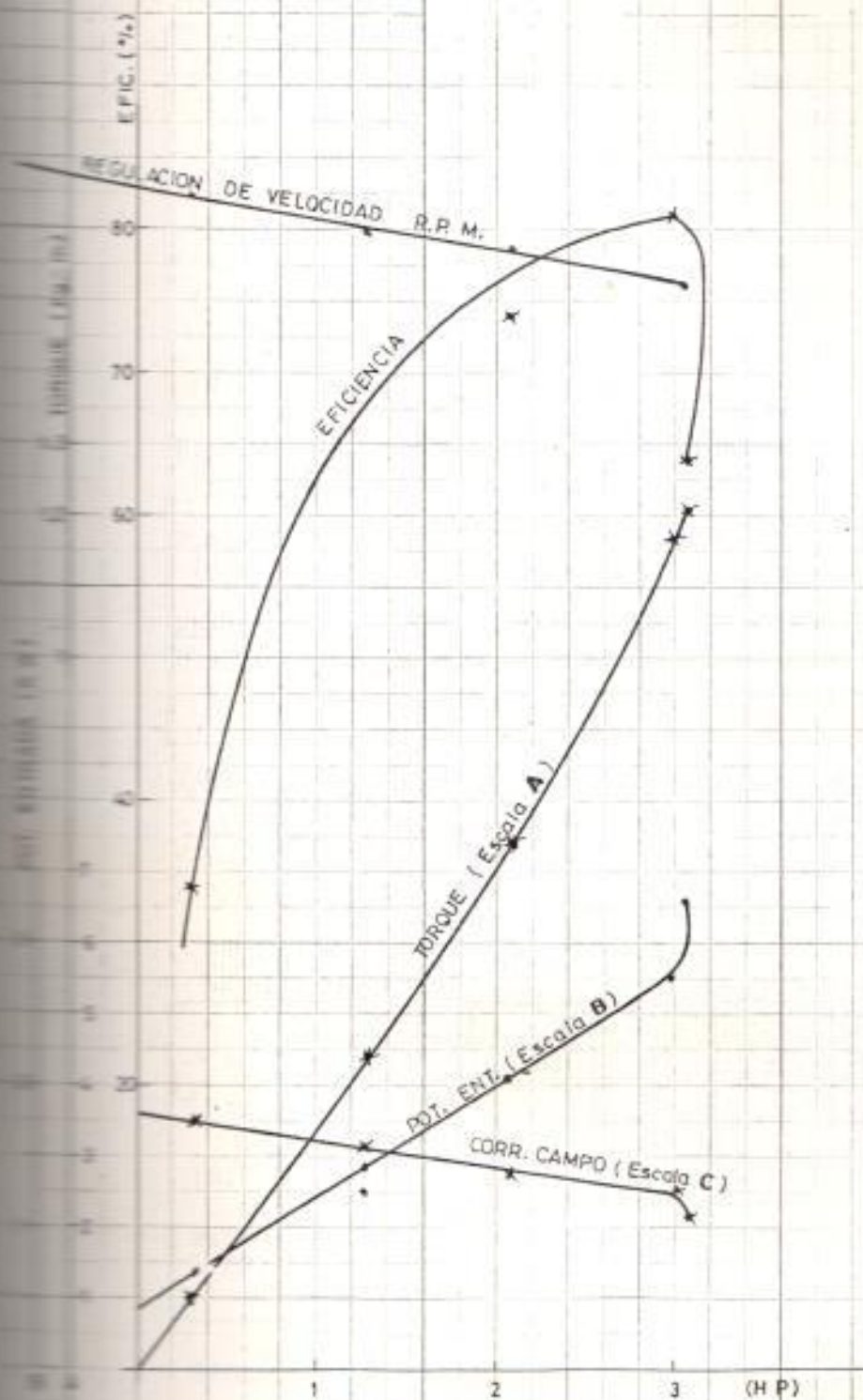


FIG. 85 CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

% I_L	25	50	75	100	125
A_L (A)	3	6.05	9.1	12	14.5
A_F (ma)	194.5	191	186.5	185	181
n (R.P.M.)	2404	2203	2106	1913	1900
P.ENTRADA (vatios)	690	1400.6	2088.5	2760	3335
P.SALIDA (HP)	0.316	1.308	2.081	3.02	3.08
EFICIENCIA DIRECTA (%)	34.1	69.64	74.35	81.57	64.94

TABLA 8.5 VALORES PROMEDIOS DE PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA.

% I_L	100	75	50	25	vacío
n (R.P.M.)	1912	2068	2237	2455	2580
P.SALIDA (HP)	3.02	2.081	1.308	0.316	0.27

TABLA 8.6 DATOS A GRAFICARSE EN LA CURVA DE REGULACION DE VELOCIDAD.

3.3 MEDICION DE RESISTENCIAS.

Para determinar las resistencias de los devanados de la máquina bajo prueba se utilizó el método de la caída de potencial, que consiste en aplicar un bajo voltaje al bobinado a determinar su resistencia, tomando lecturas de voltaje aplicado y corriente que circula, luego la resistencia será igual a la relación de voltaje aplicado para la corriente que circula por el bobinado bajo prueba. Estas pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente.

Para propósito de cálculo de pérdidas en el cobre el valor de resistencia calculado fue a 75°C .

3.3.1 RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA.

a) DIAGRAMA DE CONEXIONES.

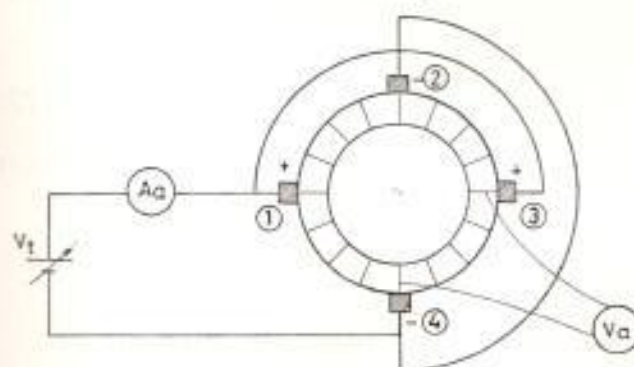


FIGURA 8-6 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA DETERMINAR RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA.

b) PROCEDIMIENTO.

- Bloquear eje del rotor para evitar rotación.
- Aplicar un pequeño voltaje directamente a los carbones de la máquina bajo prueba, como indica la Fig. 8.6.
- Tomar lecturas de voltaje entre las delgas que se encuentran debajo del centro de dos carbones consecutivos.
- Tomar lecturas de la temperatura ambiente.

c) TABLA DE DATOS

V_{a14}	V_{a41}	A_a	TEMPERATURA (°C)	V_a	R_a 27°C	R_a 25°C	R_a 75°C
1.32	1.34	1	27	1.335	1.335	1.324	1.579

FIGURA 8.7 DATOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA.

8.3.2 RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO.

a) DIAGRAMA DE CONEXIONES

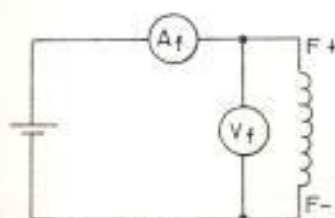


FIGURA 8.7 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA DETERMINAR RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO.

b) PROCEDIMIENTO

- Aplicar voltaje nominal directamente al devanado de campo derivado como indica la Fig. 8.7.
- Tomar lecturas de voltaje y corriente.
- Tomar lectura de la temperatura ambiente.

c) TABLA DE DATOS

V_f (v)	A_f (ma)	T_f (°C)	R_f 35°C	R_f 25°C	R_f 75°C
229	195	35	1174.35	1130.77	1348.65

TABLA 8.8 DATOS DE PRUEBA PARA HALLAR RESISTENCIA DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO.

8.3.3 RESISTENCIAS DE LOS DEVANADOS SERIE E INTERPOLO.

a) DIAGRAMA DE CONEXIONES.

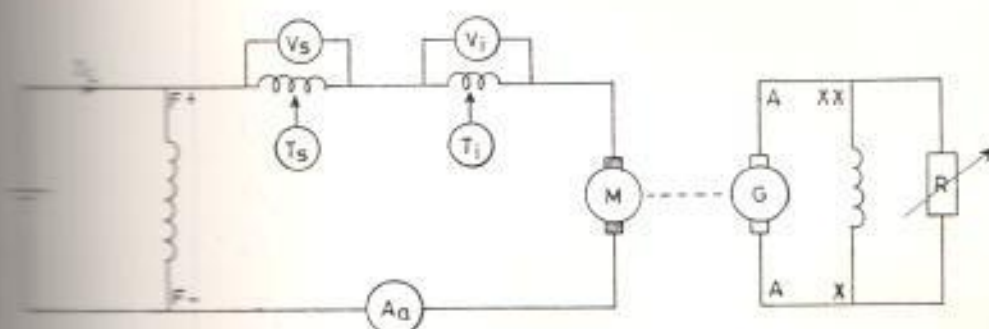


FIGURA 8.8 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA DETERMINAR RESISTENCIAS DE LOS DEVANADOS SERIE E INTERPOLO.

b) PROCEDIMIENTO

- Arrancar el motor bajo prueba con las conexiones que se indican en la Fig. 8.8.
- Aplicar carga al motor desde el 25% hasta el 100% de su corriente de línea.
- Tomar lecturas de voltaje en el devanado serie e interpolo y corriente de armadura para cada porcentaje de carga a temperatura estable.
- Corregir los valores de resistencias a las temperaturas de 25°C y 75°C utilizando la fórmula siguiente :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{(234.5 + T_1)}{(234.5 + T_2)}$$

c) TABLA DE DATOS

% I _L	25	50	75	100
V _s (v)	0.342	0.735	1.126	1.53
V _i (v)	0.98	2.53	3.31	4.8
A _a (A)	2.7	5.8	8.8	11.8
T _s (°C)	35	38	44	52
T _i (°C)	39	45	50	53

TABLA 8.9 DATOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

$\% I_L$	25	50	75	100
R_s (ohms)	0.1266	0.1267	0.1279	0.1296
R_i (ohms)	0.3629	0.4362	0.3761	0.4067
T_s (°C)	35	38	44	52
T_i (°C)	39	45	50	53

TABLA 8.10. VALORES CALCULADOS A PARTIR DE LA TABLA 8.9

R_s (Ω)	0.1453	0.1439	0.1421	0.1400
R_i (Ω)	0.4106	0.4830	0.4091	0.4378
T_s (°C)	75	75	75	75
R_s (25°C)	0.1197 Ω			
R_s (75°C)	0.1428 Ω			
R_i (25°C)	0.3648 Ω			
R_i (75°C)	0.4351 Ω			

TABLA 8.11 RESISTENCIAS DE LOS DEVANADOS SERIE E INTERPOLO.

PÉRDIDAS EN EL COBRE.

Para calcular las pérdidas en el cobre de los devana

de armadura, derivación, interpolo y serie, se utilizan las fórmulas (2.15), (4.6), (4.11), (5.13) respectivamente. Para propósitos de cálculo de estas pérdidas se han considerado los valores de resistencia a 75°C, los cuales se resumen en la Tabla 8.12.

R_a (Ω)	R_s (Ω)	R_i (Ω)	R_f (Ω)
1.579	0.1428	0.4351	1348.65
TEMP (°C)	75°C	75°C	75°C

TABLA 8.12 RESISTENCIA EN EL COBRE DE LA MAQUINA REDISEÑADA.

Las pérdidas han sido calculadas para el 25, 50, 75, 100, 125% de la corriente nominal de la máquina bajo prueba, las que se resumen en la Tabla 8.13.

	25	50	75	100	125
	2.7	5.8	8.8	11.8	14.3
	0.198	0.194	0.188	0.185	0.181
	11.51	53.117	122.277	219.859	322.889
	1.0483	4.8374	11.135	20.022	29.405
	3.1594	14.5795	33.562	60.346	88.625
	52.872	50.757	47.666	46.157	44.183
	68.589	123.29	214.64	346.384	485.102

TABLA 8.13 DATOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR PERDIDAS EN EL COBRE.

8.5. PERDIDAS ROTACIONALES.

Para determinar las pérdidas rotacionales en la máquina bajo prueba, ésta fue accionada como generador en vacío, utilizando como motor impulsor la máquina Sumpden.

Las pérdidas a determinarse son:

- pérdidas en el núcleo debido al fenómeno de histéresis y corrientes de Eddy.
- pérdidas por fricción y ventilación.
- pérdidas por fricción en las escobillas.

8.5.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES

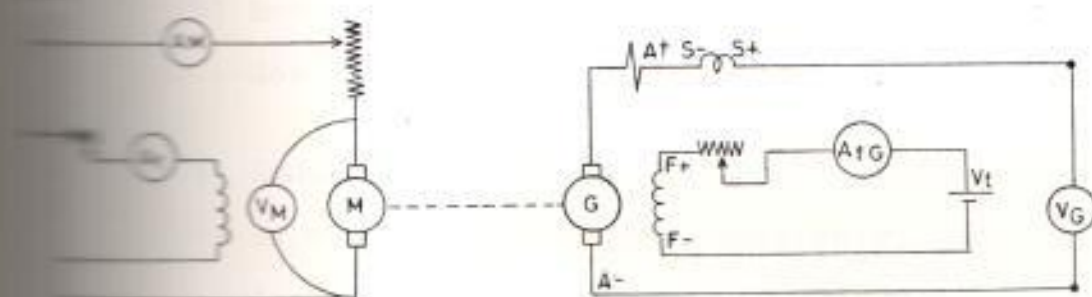


FIGURA 8.9 DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA DETERMINAR PERDIDAS ROTACIONALES.

8.5.2 PROCEDIMIENTO

- 1) Realizar diagrama de conexiones como indica la Fig. 8.9; como se ve los campos de ambas máquinas son excitados separadamente, de manera que estas pérdidas no intervengan en los cálculos.

- 2) Arrancar el motor impulsor con la finalidad de lograr el rango de velocidades, corriente de campo, voltaje de armadura de diseño, de la máquina bajo prueba en carga.
- 3) Para cada valor de velocidad, mantener constante la corriente de campo del motor impulsor, variar la velocidad variando el voltaje aplicado a la armadura.
- 4) Para cada velocidad leer: voltajes, corrientes en el motor y en el generador; medir la velocidad del grupo, comenzando con excitación máxima en el generador.
- 5) Reducir por pasos la excitación del generador manteniendola constante en cada paso.
- 6) Reducir la velocidad por pasos manteniendo la excitación del motor constante; tomar lecturas de voltajes, corrientes, velocidad en el grupo.
- 7) Repetir los pasos 5 y 6, hasta llegar al caso de cero excitación en el generador, punto en el cual se determinan las pérdidas por fricción.
- 8) Sacar los carbones de la máquina bajo prueba y sin excitar el campo del generador, pa

ra el mismo rango de velocidades, tomar lecturas de voltaje, corriente, velocidad del motor impulsor. Las diferencias entre las pérdidas encontradas en el punto 7 y 8 darán las pérdidas por fricción en las escobillas.

- 9) Desacoplar el grupo y mover el motor sólo, para el mismo rango de velocidad, manteniendo constante su corriente de excitación; tomar lecturas de voltaje, corriente y velocidad.
- 10) Determinar la resistencia (a 75°C) del inducido de la máquina Hampden a fin de encontrar sus pérdidas.

8.5.3 TABLAS DE DATOS.

Las tablas siguientes reúnen los valores medidos en el laboratorio y los calculados en el grupo motor-generador. Para el cálculo se usaron las siguientes fórmulas:

$$P_M = V_M * A_M - (A_M)^2 R_a \text{ Hampden} - 2 * A_M$$

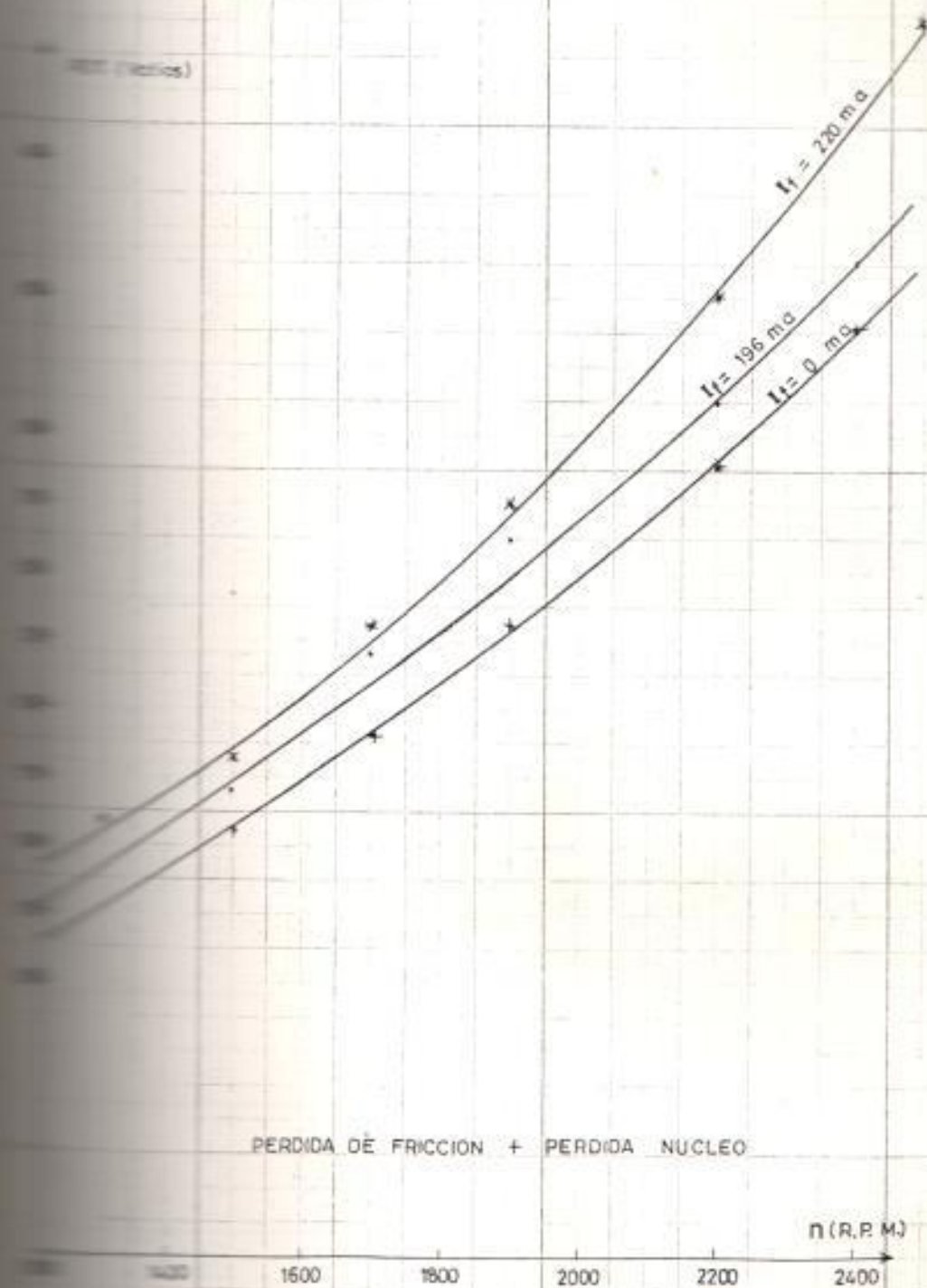
$$P_G = P_M - P_{MO}^*$$

$$R_a \text{ Hampden (75°C)} = 0.887 \text{ medida de acuerdo a lo descrito en sección 8.3.1.}$$

$$P_G = \text{Pérdidas en vacío de la máquina bajo prueba las que se grafican en la Fig. 8.10}$$

$$P_{MO} = \text{Pérdidas de la máquina Hampden en vacío.}$$

(mm Hg)



PERDIDA DE FRICCIÓN + PERDIDA NUCLEO

n (R.P.M.)

Fig. 10-10 PERDIDAS EN VACIO (Friccion + Nucleo)

V_M (v)	110	111	90	90	80	70	60
A_{PM} (A)	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
n (R.P.M)	2400	2200	1900	1700	1500	1300	1200
V_G	222	204	177	158	140	112	196
A_{fG} (ma)	196	196	196	196	196	196	196
P_M (vatios)	562.82	502.76	417.92	356.24	288.49	215.19	125.94
P_G (vatios)	364.82	319.76	266.87	221.84	172.39	125.94	7.6
$A_M R_a$ (vatios)	22.18	20.44	19.18	17.56	14.91	12.81	
$2 A_M$ (vatios)	10	9.6	9.3	8.9	8.2	7.6	

TABLA 8.15

TABLA 8.14

DATOS DE PRUEBAS PARA DETERMINAR PERDIDAS ROTACIONALES

I_M (A)	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
V_M (V)	111	111	111	111	111	111	111	111	111
A_{DM} (A)	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
n (R.P.M)	2400	2200	1900	1700	1500	1200	1000	800	600
V_G (V)	100	92	79	71	62	51	41	31	21
A_{FG} (ma)	80	80	80	80	80	80	80	80	80
P_M (vatios)	545.24	482.64	387.73	321.81	271.76	208.11	155.66	118.86	80
P_G (vatios)	347.24	299.64	236.68	187.41	155.66	118.86	80	60	40
$A_M^2 R_a$ (vatios)	20.01	18.76	16.02	14.19	13.14	11.49	10.00	8.50	7.20
$2 A_M$ (vatios)	9.5	9.2	8.5	8	7.7	7.2	6.6	6.0	5.4

TABLA 8.17

I_M (A)	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
V_M (V)	111	111	111	111	111	111	111	111	111
A_{DM} (A)	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
n (R.P.M)	2400	2200	1900	1700	1500	1200	1000	800	600
V_G (V)	189	172	150	133	118	93	79	62	51
A_{FG} (ma)	160	160	160	160	160	160	160	160	160
P_M (vatios)	572.83	487.17	405.04	340.98	292.59	206.16	155.66	118.86	80
P_G (vatios)	374.83	304.17	254	206.58	176.49	116.91	80	60	40
$A_M^2 R_a$ (vatios)	22.17	19.68	17.96	16.02	14.91	12.14	10.00	8.50	7.20
$2 A_M$ (vatios)	10	9.3	9.0	8.5	8.2	7.4	6.6	6.0	5.4

TABLA 8.16

DATOS DE PRUEBAS PARA DETERMINAR PERDIDAS ROTACIONALES

TABLA 8.19

TABLA 8.18

DATOS DE PRUEBAS PARA DETERMINAR PERDIDAS ROTACIONALES

V_M (v)	60	63	68	73	78	83	88
A_M (A)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
n (R.P.M)	2400	22.00	1900	1700	1500	1200	0
V_G (v)	0	0	0	0	0	0	0
A_{FG} (ma)	0	0	0	0	0	0	0
P_M (vatios)	232.74	202.64	169.95	140.14	121.68	94.02	
P_G (vatios)	34.74	19.64	18.9	5.74	5.58	4.77	
$A_M^2 R_a$ (vatios)	11.81	10.86	10.25	9.36	8.52	7.98	
$2 A_M$ (vatios)	7.3	7.0	6.8	6.5	6.2	6.0	

V_M (v)	100	105	110	115	120	125	130
A_M (A)	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
n (R.P.M)	1200	1500	1700	1900	2200	2400	0
V_G (v)	3	4	5	5	6	7	0
A_{FG} (ma)	0	0	0	0	0	0	0
P_M (vatios)	205.37	272.19	317.7	379.16	472.54	539.71	
P_G (vatios)	116.12	156	183.3	228.11	289.54	341.71	
$A_M^2 R_a$ (vatios)	11.18	12.81	13.49	15.64	17.96	19.59	
$2 A_M$ (vatios)	7.1	7.6	8.17	8.4	9.0	9.4	

Desacoplando el generador se obtienen las siguientes lecturas de la máquina Hampden:

I_M (A)	3	3	2.85	2.8	2.7	2.55
V_M (v)	66	61	53	48	43	35
I_{PM} (A)	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
n (R.P.M.)	2400	2200	1900	1700	1500	1200
P_{MD}	198	183	151.05	134.4	116.1	89.25

TABLA 8.20 DATOS DE PRUEBAS PARA DETERMINAR PERDIDAS ROTACIONALES.

8.5.4 SEPARACION DE LAS PERDIDAS ROTACIONALES.

En la sección anterior, se han tomado los datos necesarios par encontrar las pérdidas rotacionales, en esta sección se realizará una separación de dichas pérdidas, las cuales están compuestas por :

- pérdidas por fricción y ventilación
- pérdidas en rodamientos + ventilador
- pérdidas por fricción en las escobillas
- pérdidas en el núcleo: histéresis + corrientes de Eddy.

-PERDIDAS POR FRICCION Y VENTILACION (WFRVE)

Estas pérdidas se determinan en la Tabla 8.18 (P_G) de la sección 8.5.3, para el caso en que la corriente de excitación del generador es cero y se resumen en la Tabla 8.21.

WFRVE (vatios)	116.2	156	183.3	228.11	289.54	341.71
n (R.P.M)	1200	1500	1700	1900	2200	2400

TABLA 8.21 PERDIDAS POR FRICCION Y VENTILACION.

-PERDIDAS EN RODAMIENTOS + VENTILADOR (WRVE)

Se determinan en la Tabla 8.19 (P_G) de la sección 8.5.3, para el caso en que se sacan las escobillas de la máquina bajo prueba y su corriente de excitación es cero. Estas pérdidas son las siguientes :

WRVE (vatios)	4.77	5.58	5.74	18.9	19.64	34.74
n (R.P.M.)	1200	1500	1700	1900	2200	2400

TABLA 8.22 PERDIDAS EN RODAMIENTOS + VENTILADOR.

-PERDIDAS POR FRICCIÓN EN LAS ESCOBILLAS (WBF)

Estas pérdidas se determinan de la siguiente manera :

$$WBF = WFRVE - WRVE$$

WBF (vatios)	11.43	150.42	177.56	209.21	269.9	306.97
n (R.P.M)	1200	1500	1700	1900	2200	2400

TABLA 8.23 PERDIDAS POR FRICCIÓN EN LAS ESCOBILLAS.

-PERDIDAS EN EL NUCLEO (WINUC)

Si a la potencia que entrega el motor impulsor en su eje (P_G) se le restan las pérdidas por fricción y ventilación de la máquina bajo prueba se obtendrán las pérdidas totales en el núcleo.

$$WINUC = P_G - WFRVE$$

A continuación se indican las pérdidas en el núcleo para diferentes corrientes de excitación en la máquina bajo prueba (TABLA 8.24).

WINUC (vatios)	109.01	65.29	48.06	49.78	31.45	44.44
n (R.P.M)	2500	2200	1900	1700	1500	1300
A_{fG} (ma)	220	220	220	220	220	220

(a)

WTNUC (vatios)	23.11	30.22	38.76	38.54	16.39	9.82
n (R.P.M.)	2400	2200	1900	1700	1500	1300
A_{fG} (ma)	196	196	196	196	196	196

(b)

WTNVC (vatios)	0.79	20.49	23.28	25.89	14.63	33.12
n (R.P.M.)	1200	1500	1700	1900	2200	2400
A_{fG} (ma)	160	160	160	160	160	160

(c)

WTNVC (vatios)	5.53	10.1	8.57	4.11	0.16	2.74
n (R.P.M.)	2400	2200	1900	1700	1500	1200
I_{fG} (ma)	80	80	80	80	80	80

(d)

TABLA 8.24 PERDIDAS EN EL NUCLEO PARA DIFERENTES CORRIENTES DE EXCITACION.

-PERDIDAS POR HISTERESIS Y CORRIENTES DE EDDY.

La Fig. 8.11, muestra las curvas de pérdidas en el núcleo para dos valores de corriente de excitación.

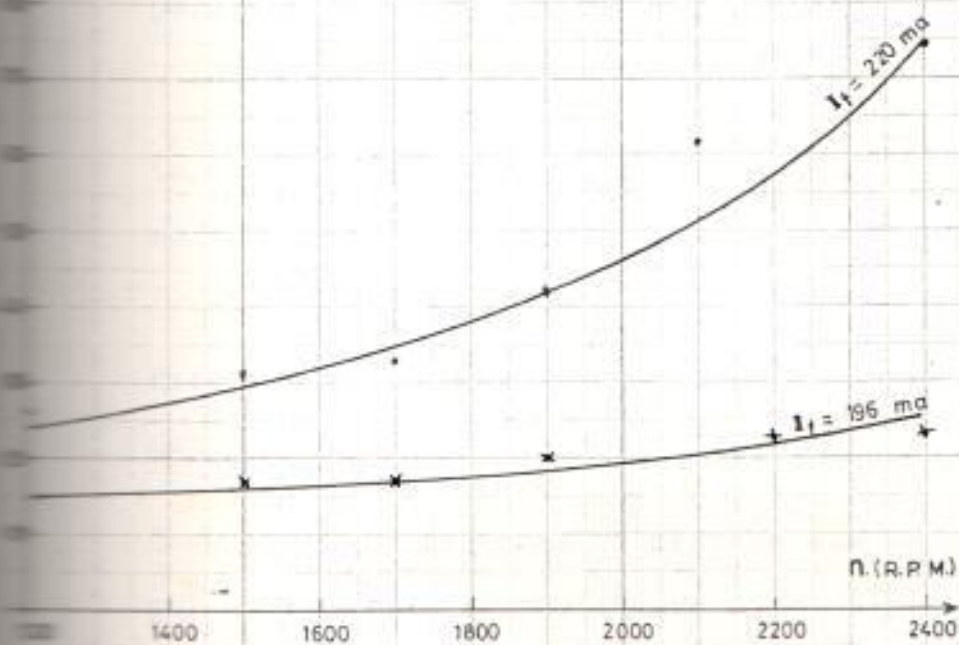


Fig. N° 8-11 PERDIDAS EN EL NUCLEO.

El próximo paso es separar las pérdidas de histéresis de las de eddy. Esto es realizado bajo el hecho de que, para una excitación dada, las pérdidas de potencia debido a histéresis es proporcional a la velocidad y las debido a corrientes de eddy se incrementan con el cuadrado de la velocidad, luego para una velocidad y corriente de excitación constante las pérdidas en el núcleo son :

$$W_{NUC} = H_n + F_n^2$$

La ecuación anterior puede ser representada como :

$$W_{NUC} / n = H + F_n$$

Esta ecuación es la de una recta, la cual puede representarse como en la Fig.8.12.

Conociendo H, se puede determinar las pérdidas por histéresis, multiplicando este valor por el valor deseado de n. Conocido F_n se puede hallar las pérdidas por corrientes de eddy multiplicando dicho valor por el valor deseado de velocidad (n).

Mediante este procedimiento se toman puntos de la curva de pérdidas en el núcleo para corriente de campo nominal (ver Fig.8.11) y se procede a graficar la curva de separación de pérdidas

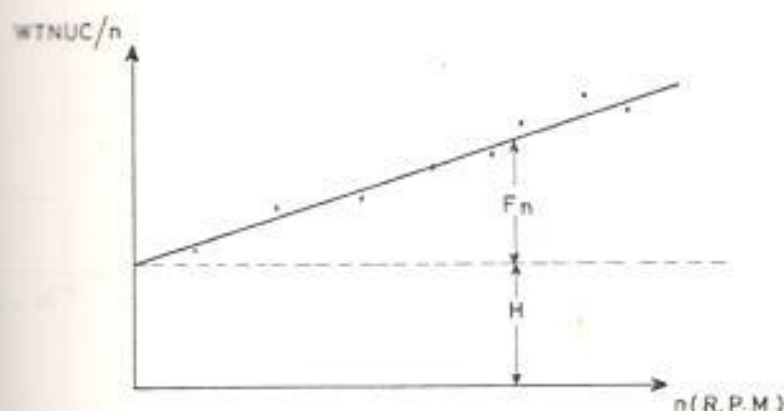
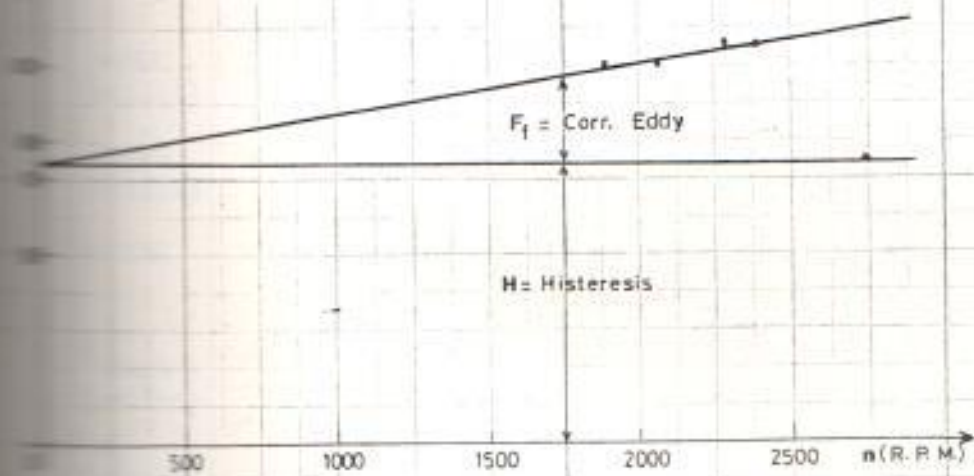


FIGURA 8.12 SEPARACION DE LAS PERDIDAS DE EDDY DE LAS HISTERESIS.

en el núcleo (Fig.8.13) a partir de la cual se obtuvo la siguiente tabla de datos.

WTNUC (vatios)	10.2	14.1	16.32	18.62	22.44	24.96
H vatios/rev	74×10^{-4}	74×10^{-4}	74×10^{-4}	74×10^{-4}	74×10^{-4}	74×10^{-4}
WHIST (vatios)	8.88	11.1	12.58	14.06	16.28	17.76
F_n vatios/rev	11×10^{-4}	20×10^{-4}	22×10^{-4}	24×10^{-4}	28×10^{-4}	30×10^{-4}
WEDDY (vatios)	1.32	3	3.74	4.56	6.16	7.2
n (R.P.M.)	1200	1500	1700	1900	2200	2400
I_f (ma)	196	196	196	196	196	196

TABLA 8.25 PERDIDAS POR HISTERESIS Y CORRIENTES DE EDDY.

$WINDOS \times 10^{-4}$ 

PERDIDAS DE HISTERESIS + CORRIENTES DE EDDY

CALCULO DE LA EFICIENCIA A PARTIR DE LAS PERDIDAS.

$$\text{Por definición eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}}$$

Potencia de salida = potencia de entrada - pérdidas, luego :

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}}$$

La Tabla 8.26 resume todas las pérdidas encontradas en la máquina bajo prueba así como la eficiencia para diferentes porcentajes de la corriente de línea.

$\% I_L$	25	50	75	100	125
W_{NUC} (vatios)	24.96	22.44	22.44	18.62	18.62
W_{WYE} (vatios)	341.71	289.54	289.54	228.11	228.11
W_{MOTAC}	366.67	311.98	311.98	246.73	246.73
W_{cable} (vatios)	68.589	123.291	214.64	346.384	485.102
W_0 (vatios)	6	12	18	24	30
W_{total}	441.259	447.271	544.62	617.114	761.832
W_{entrado} (vatios)	690	1380	2070	2760	3450
Effic (%)	36.04	67.58	73.68	77.6	77.9

TABLA 8.26 RESUMEN DE LAS PERDIDAS EN LA MAQUINA REDISEÑADA.

ELEVACION DE TEMPERATURA.

Para calcular la elevación en los devanados de la máquina bajo prueba se han considerado dos métodos :

- a) Método del termómetro, que consiste en aplicar el bulbo del termómetro directamente sobre la superficie que se desee registrar su temperatura.
- b) Método de la resistencia que consiste en comparar la resistencia de un devanado a la temperatura que se va a determinar, con la resistencia a una temperatura conocida.

La elevación de temperatura será :

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234.5 + T_1)$$

R_2 , R_1 son las resistencias a las temperaturas T_2 y T_1 respectivamente. Puesto que el enfriamiento en los devanados no es uniforme, todas sus partes no tienen la misma temperatura; las temperaturas superficiales en general son menores que en las secciones encerradas, de ahí que el método "a" dará una elevación de temperatura menor, debido a que el punto más caliente del bobinado se encuentra interiormente donde la temperatura será mayor, en estas condiciones y considerando que la resistencia varía proporcional-

mente con la temperatura el método "b" dará un cálculo más cercano a la verdadera elevación de temperatura del devanado bajo prueba.

8.7.1 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE CAMPO.

METODO A :

Puesto que sobre la bobina de campo derivado está devanada la bobina de campo serie, la temperatura que registró el termómetro es la del conjunto. La Fig. 8.14, muestra la curva de temperatura vs tiempo para la prueba de funcionamiento con carga de la máquina examinada, a partir de esta gráfica se tiene :

$$T_1 = 28^{\circ}\text{C} \quad T_2 = 52^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 52 - 28 = 24^{\circ}\text{C}$$

METODO B :

Devanado serie :

$$R_s (25^{\circ}\text{C}) = 0.1197\Omega$$

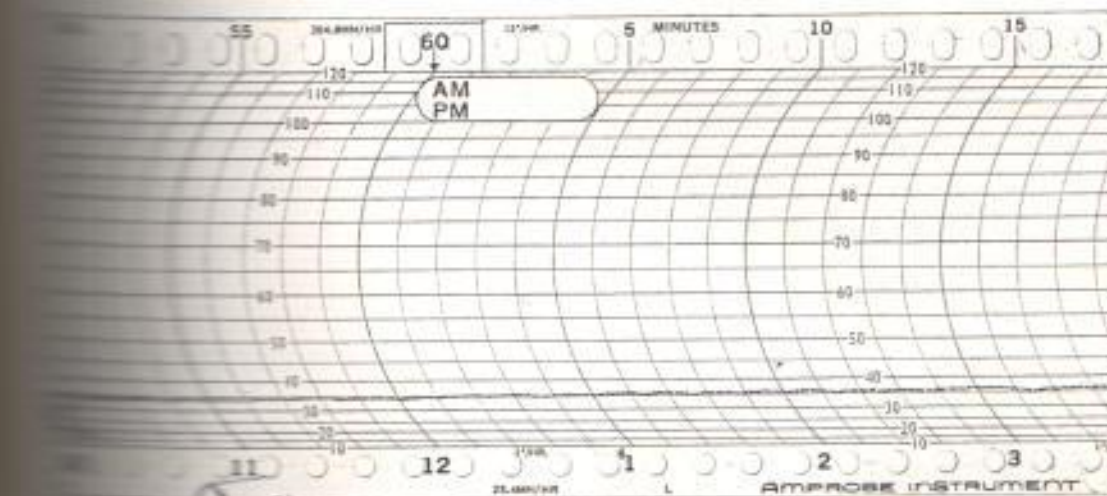
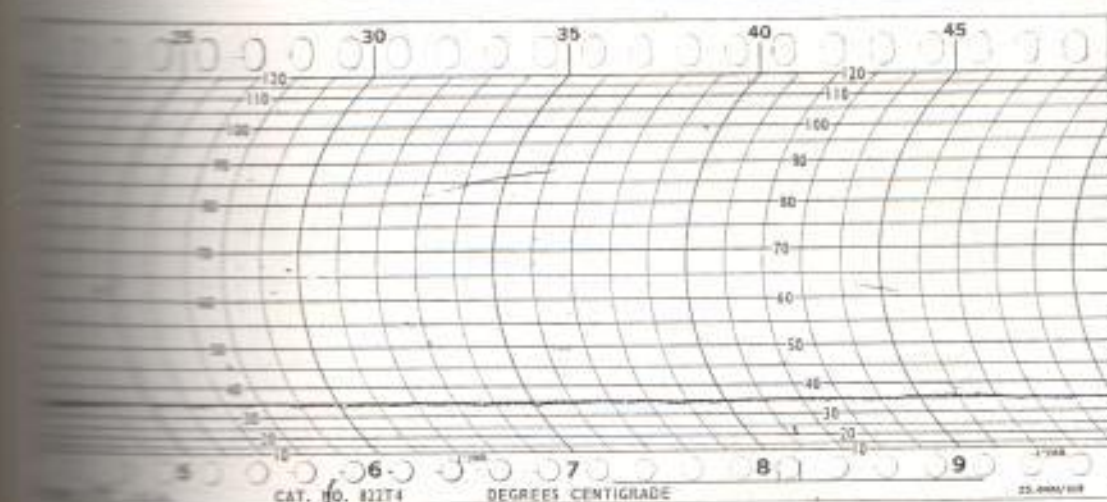
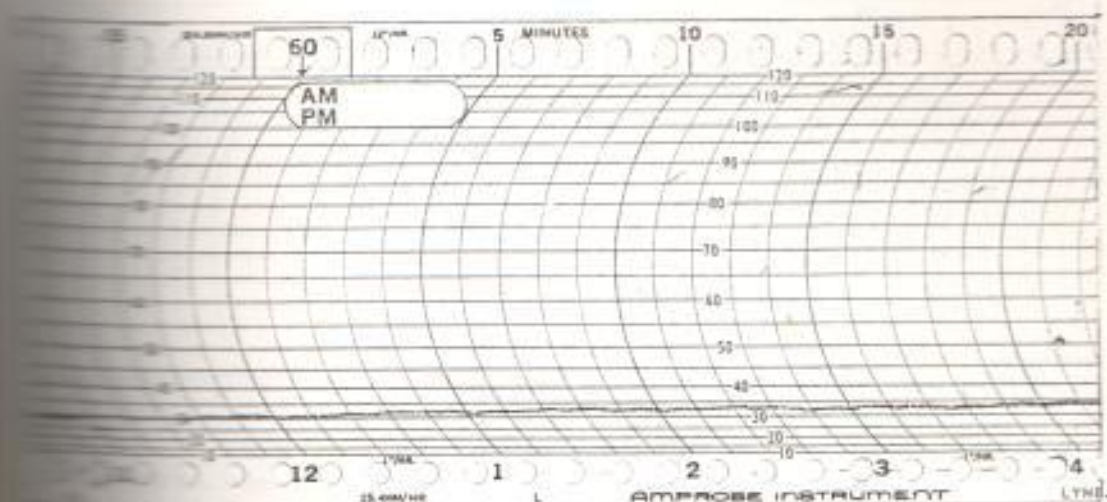
$$R_s (75^{\circ}\text{C}) = 0.1428\Omega$$

$$\Delta T_s = \frac{0.1428 - 0.1127}{0.1197} (234.5 + 25) = 50.07^{\circ}\text{C}$$

DEVANADO DERIVACION :

$$R_f(25^{\circ}\text{C}) = 1130.77\Omega$$

$$R_f(75^{\circ}\text{C}) = 1348.65\Omega$$



REGISTRO DE TEMPERATURA EN EL DEVANADO DE CAMPO (Part I)

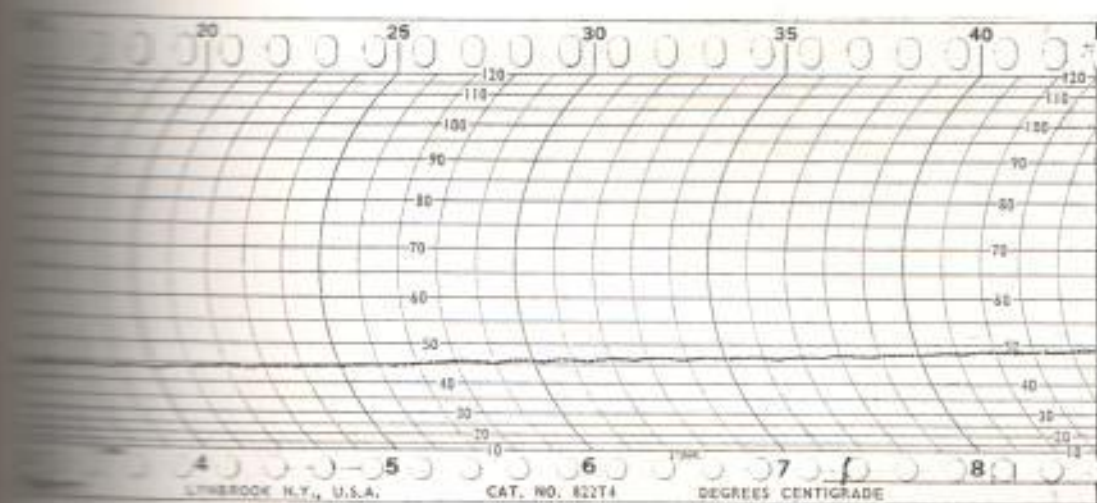
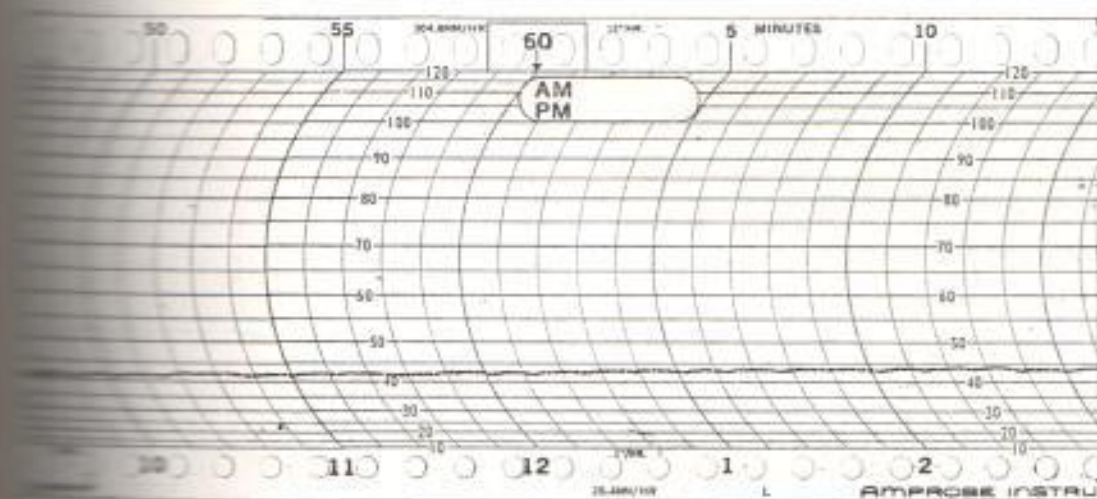
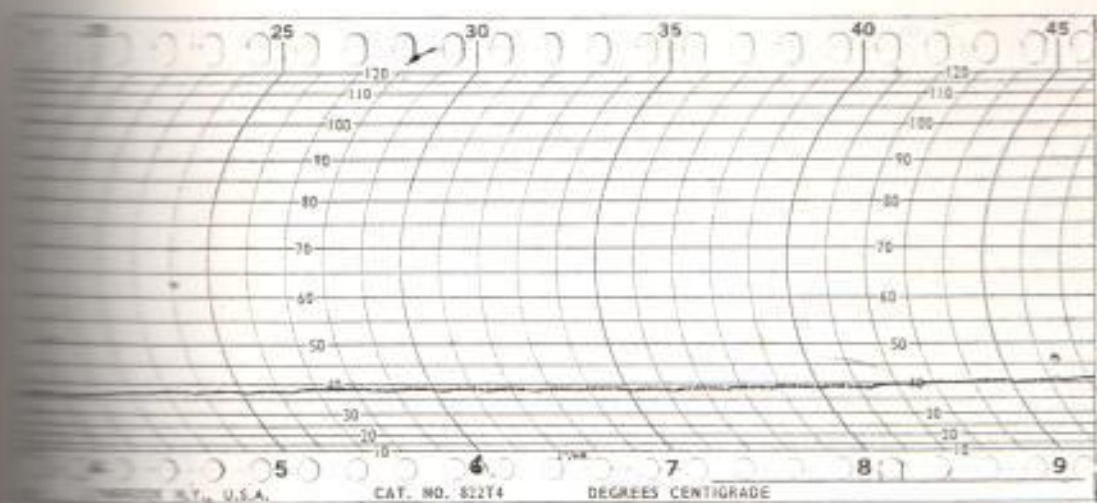


Fig. 8.14 (Parte II)

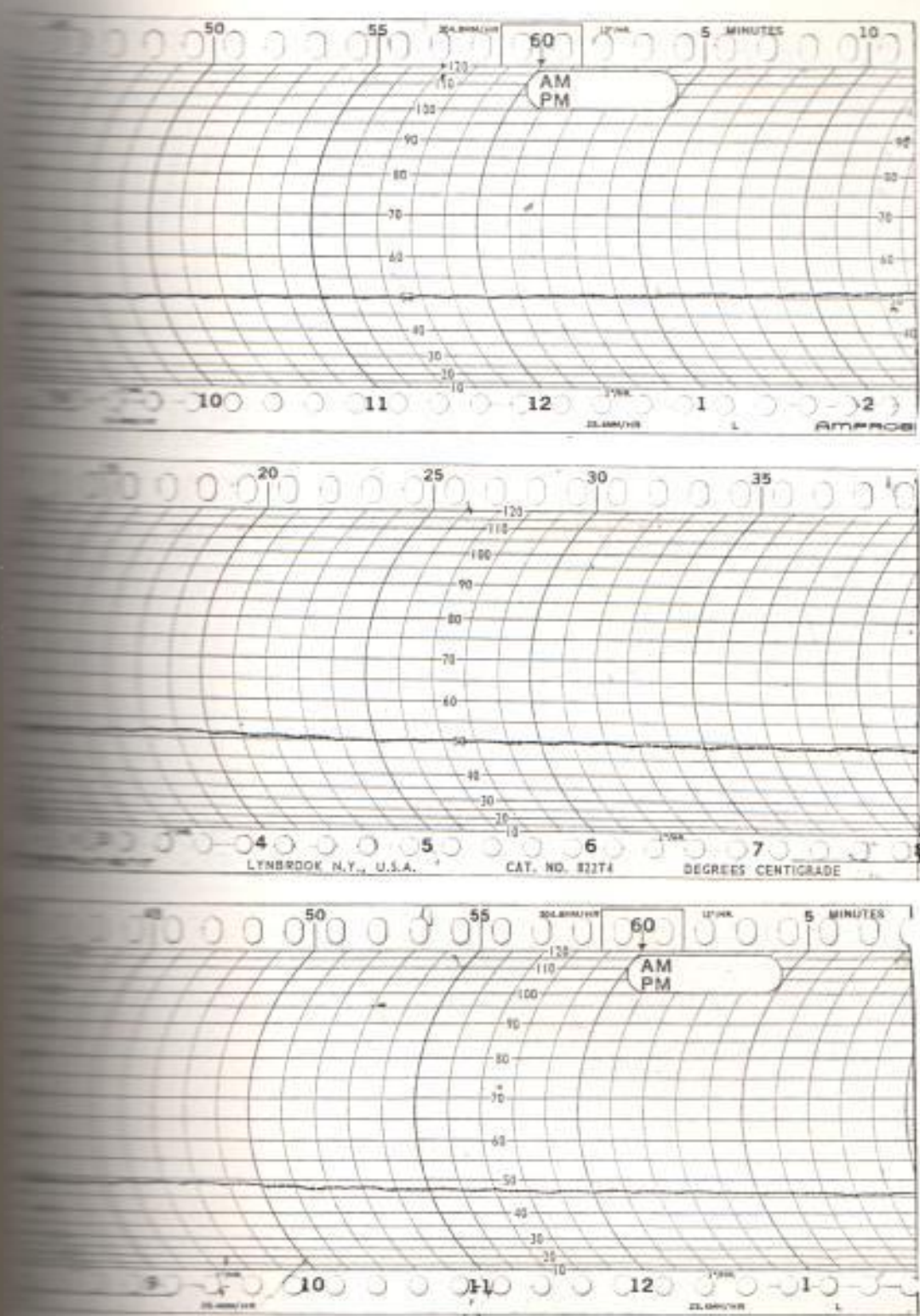


Fig. 8.14 (Parte III)

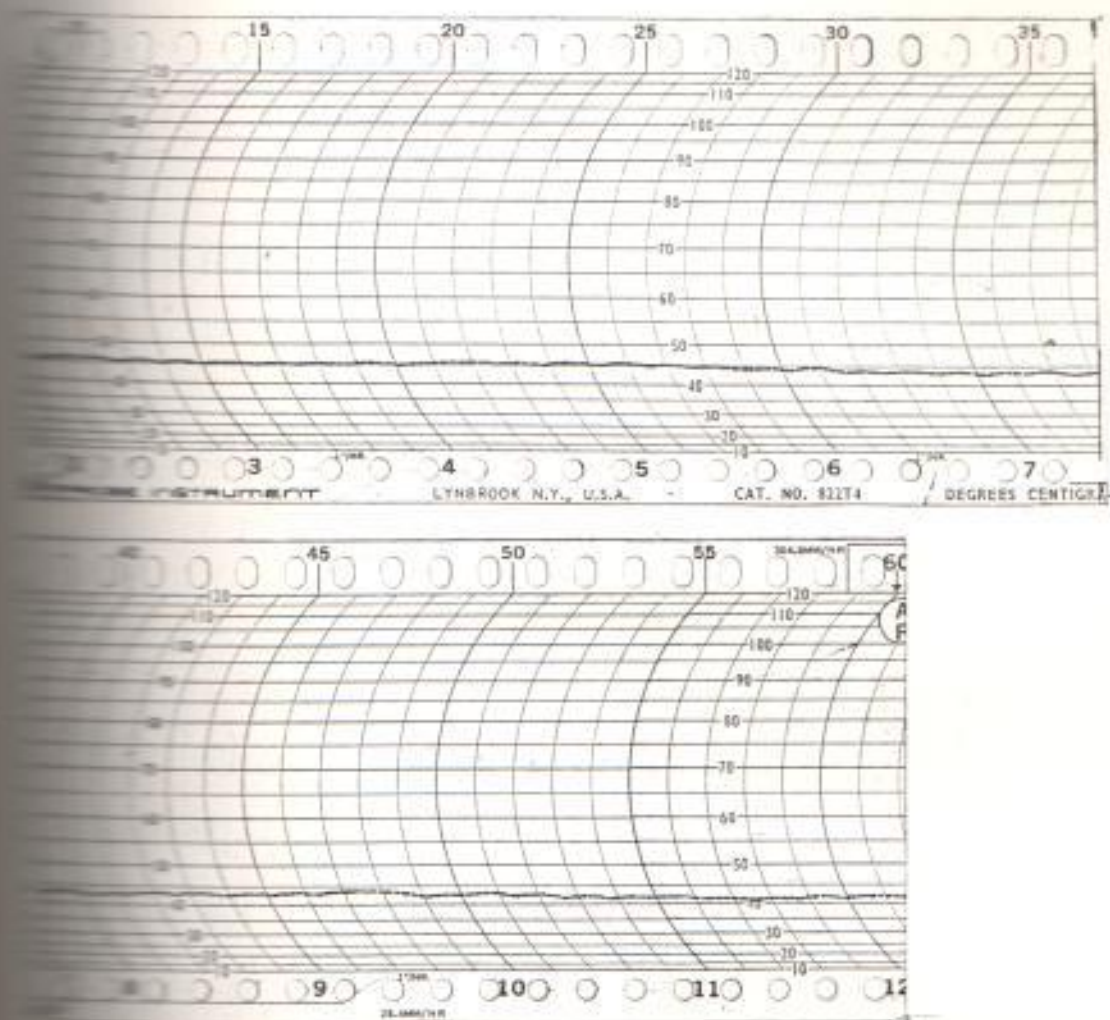


Fig. 8.14 (Parte IV)

$$\Delta T_f = \frac{1348.65 - 1130.77}{1130.77} (234.5 + 25) = 50^\circ\text{C}$$

8.7.2 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE CONMU TACION.

METODO A :

A partir de la curva de la Fig. 8.15 se tiene :

$$T_1 = 28^\circ\text{C} \quad T_2 = 53^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_i = 25^\circ\text{C}$$

METODO B :

$$R_i(25^\circ\text{C}) = 0.3648\Omega$$

$$R_i(75^\circ\text{C}) = 0.4351\Omega$$

$$\Delta T_i = \frac{0.4351 - 0.3648}{0.3648} (234.5 + 25) = 50^\circ\text{C}$$

8.7.3 ELEVACION DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE ARMA- DURA.

Puesto que no es posible colocar un termómetro en la armadura durante el funcionamiento la elevación de temperatura se la calculó con el método "b".

$$R_a(25^\circ\text{C}) = 1.324\Omega$$

$$R_a(75^\circ\text{C}) = 1.579\Omega$$

$$\Delta T_a = \frac{1.579 - 1.324}{1.324} (234.5 + 25) = 49.97^\circ\text{C}$$

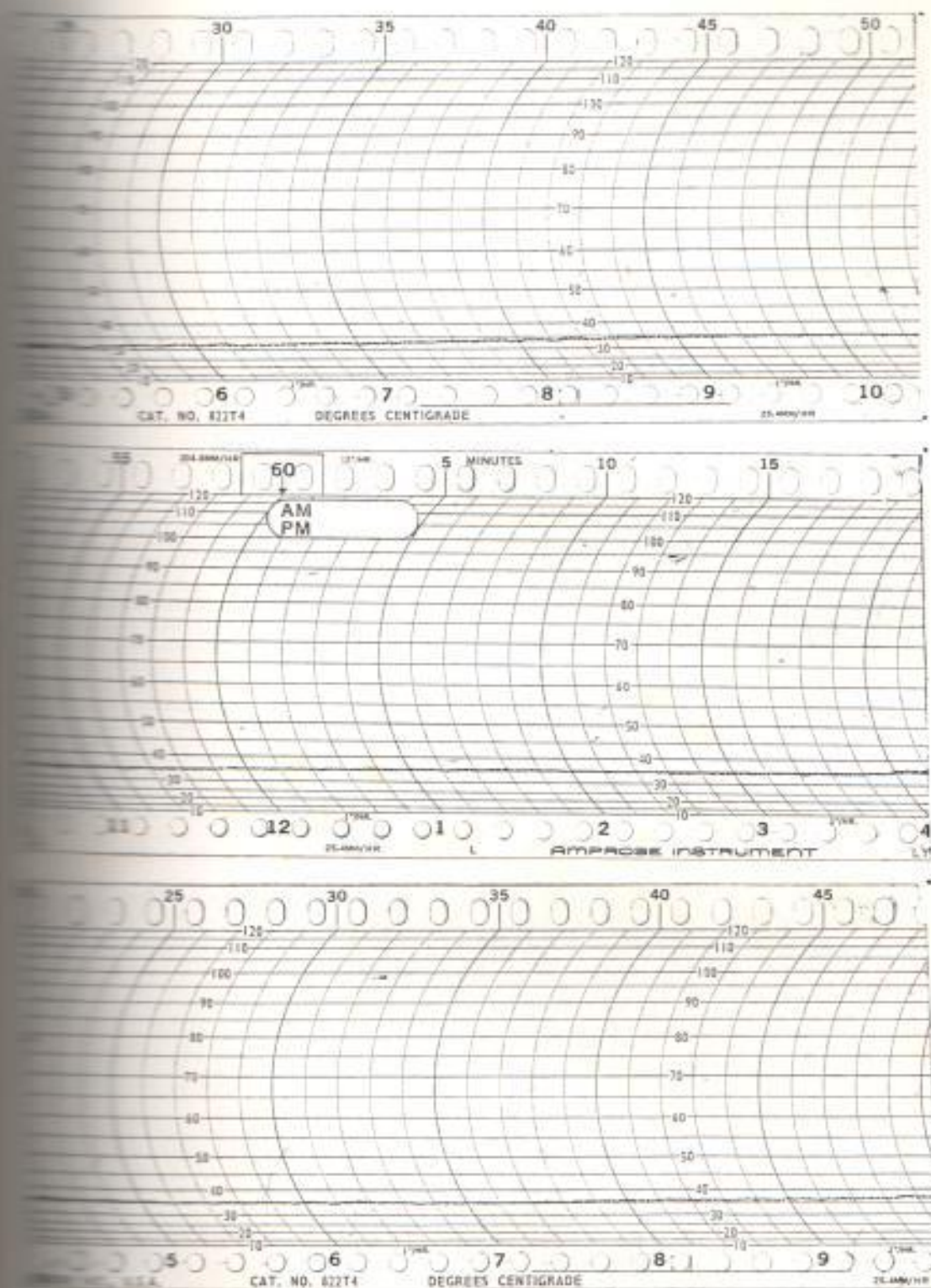


Fig. 8.15 REGISTRO DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DE CONMUTACION (Parte I)

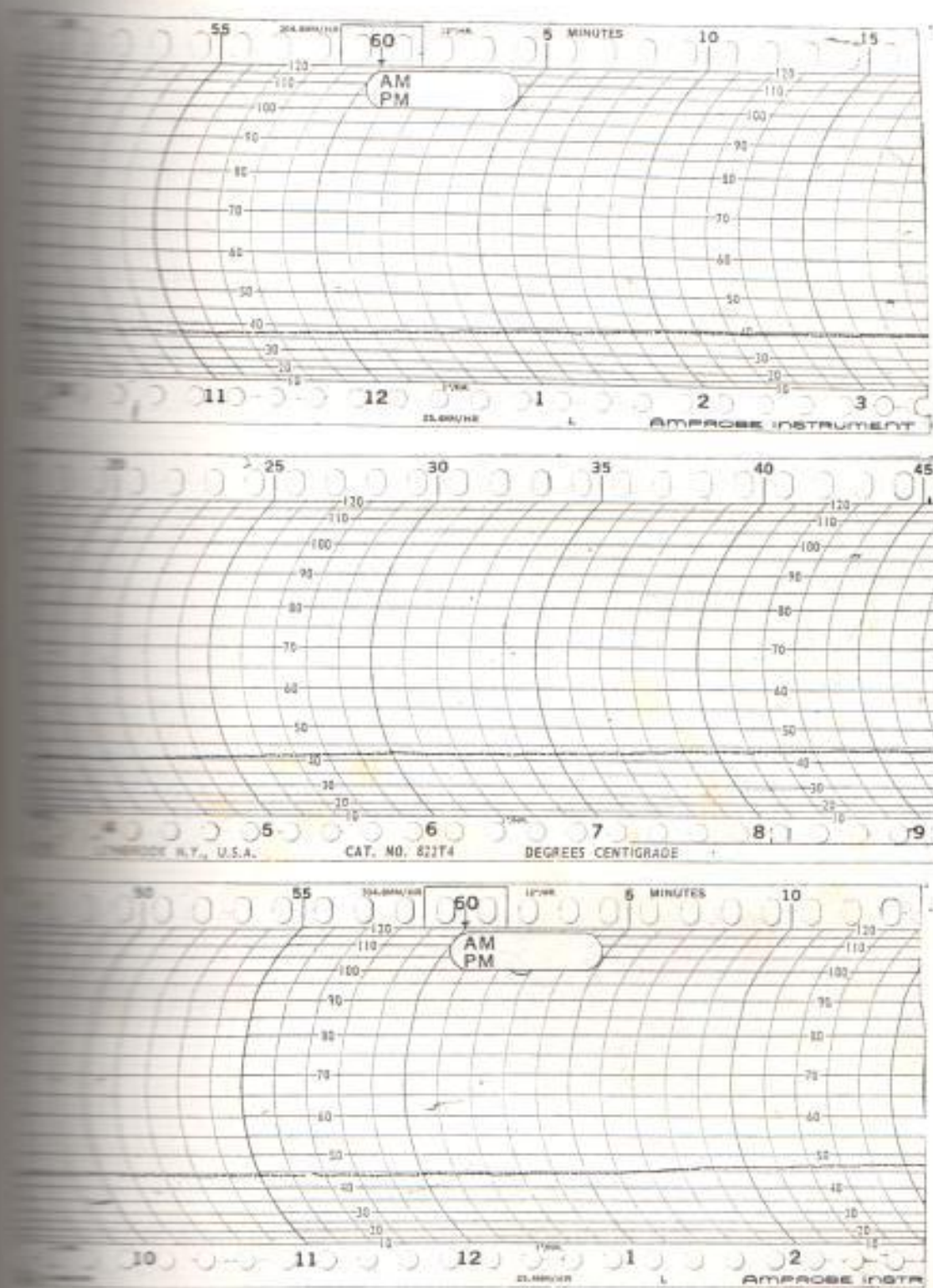


Fig. 8.15 (Parte II)

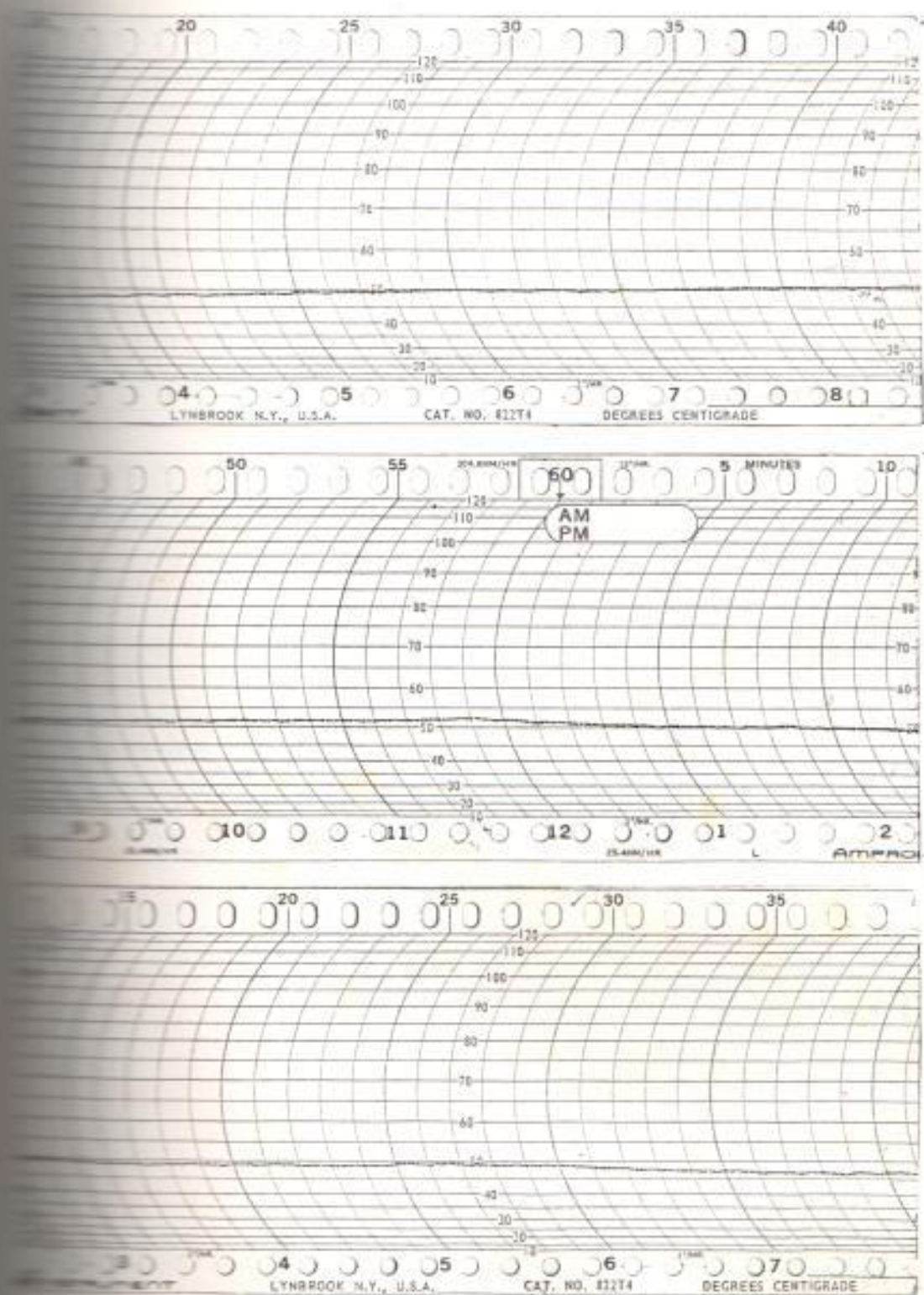


Fig. 8.15 (Parte III)

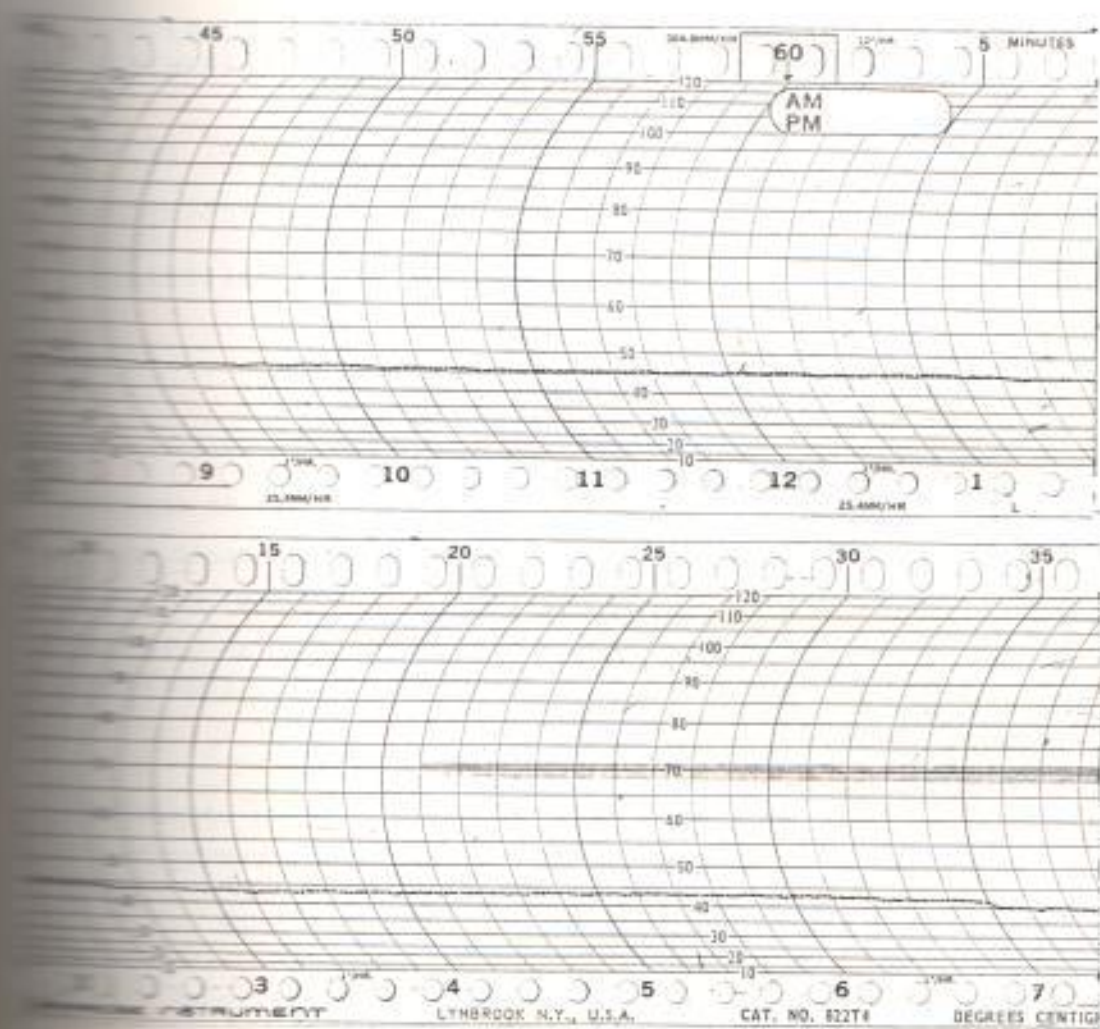


Fig. 8.15 (Parte IV)

COMPARACION ENTRE LAS CARACTERISTICAS TEORICAS Y EXPERIMENTALES DE DISEÑO.

En la Tabla 8.27, se detallan los valores de diseño obtenidos en el programa GUILL y los obtenidos experimentalmente en el Laboratorio.

	VALOR ASUMIDO	VALOR CALCULADO	VALOR EXPERIMENTAL	
Potencia de salida (Kw)	2.24	2.16	2.252	
Torque desarrollado(Kg-mt)	-	1.529	1.17	
Velocidad (R.P.M.)	1750	1750	1900	
Corriente de campo derivada (amps)	0.30	0.20	0.185	
			DIRECTA	A partir pérdidas
rendimiento (p.u.)	0.8	0.77	0.81	0.77

TABLA 8.27 COMPARACION ENTRE LOS VALORES DE DISEÑO TEORICO Y EXPERIMENTAL.

8.8.1 RESISTENCIAS.

En la Tabla 8.28, se indican los valores teóricos y experimentales de la resistencia de los devanados estáticos y rotóricos de la máquina rediseñada.

RESISTENCIA A 75°C (ohmios)	VALOR CALCULADO	VALOR EXPERIMENTAL
R_a	1.569	1.579
R_s	0.130	0.1428
R_i	0.419	0.4351
R_f	1143.97	1348.65

TABLA 8.28 COMPARACION ENTRE LOS VALORES TEORICO CON EXPERIMENTALES DE LAS RESISTENCIAS EN EL COBRE.

8.8.2 PERDIDAS

La Tabla 8.29 muestra los valores teóricos y experimentales de las pérdidas en la máquina rediseñada.

PERDIDA (vatios)	VALOR CALCULADO	VALOR EXPERIMENTAL
W_a	221.17	219.85
W_F	47.82	46.157
W_s	18.45	20.022
W_I	59.03	60.346
W_{reos}	0.0	0.0
W_B	23.74	24
WINUC	87.17	18.62
W_{BF}	16.81	209.21
WFRVE	142.98	228.11
W_{ESPU}	0.0	0.0

TABLA 8.29 COMPARACION DE LOS VALORES TEORICOS Y EXPERIMENTALES DE LAS PERDIDAS.

8.8.3 ELEVACION DE TEMPERATURA.

La Tabla 8.30 muestra los valores teóricos y

experimentales de elevación de temperatura en la máquina rediseñada.

ELEVACION TEMPERATURA (°C)	VALOR CALCULADO	VALOR EXPERIMENTAL
TEMPA	52.4	49.97
TEMPF	30.6	50
TCOM	52	50
TEMPC	41.0	45

TABLA 8.30 COMPARACION DE VALORES TEORICO Y EXPERIMENTAL DE LA ELEVACION DE TEMPERATURA.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se ha comprobado la posibilidad de rediseñar los devanados de una máquina de corriente continua, partiendo de las dimensiones de las partes que componen su circuito magnético para la potencia, voltaje, velocidad y eficiencia que se desee rediseñar.

2. Las pruebas experimentales del motor rediseñado dieron resultados satisfactorios acordes con los objetivos planteados en el programa de computación, estos fueron :

Potencia de salida	:	2.25 Kw (3.018 HP)
Velocidad	:	1.900 R.P.M.
Eficiencia	:	0.81
Corriente de línea	:	12.1 A
Corriente de excitación	:	0.185 A
Torque nominal	:	1.17 Kg-mt
Elevación de temperatura	:	50°C

3. De acuerdo a la norma americana "NEMA" el motor rediseñado tiene las características siguientes :

A prueba de goteo

Clase de aislamiento : A

Elevación de temperatura : 50 °C

- Si bien, la velocidad del motor rediseñado fue mayor que el valor deseado, fue necesario sacrificar este parámetro, para lograr el funcionamiento normal del motor.

RECOMENDACIONES

- Aplicar el programa para máquinas con devanados imbricados y patas de ranas, realizando el rebobinado y pruebas de laboratorio de la máquina elegida.
- Implementar el programa de computación para máquinas con devanados de compensación y verificar experimentalmente estos resultados.
- Realizar las mediciones del circuito magnético con instrumentos de precisión, especialmente la longitud del entrehierro, cuya medida influye en la determinación de los ampere-vueltas en esta región.

BIBLIOGRAFIA

1. Ch. Dawes, Tratado de electricidad, Tomo I (México : G. Gili, 1979), 805 p.
2. B. Dennison y V. Karapetoff, Electrical laboratory experiments (New York : John Wiley, 1958), 487 pág.
3. IBM, IBM system/360 and system/370 FORTRAN IV language (New York : IBM, 1974), 169 pág.
4. IEEE, Standard test code for direct current machines, STD-113 (New York : IEEE, 1973), 35 pág.
5. J. Kuhlmann, Diseño de aparatos eléctricos (México : CECSA, 1980), 559 pág.
6. A. Still y Ch. Siskind, Elements of electrical machine design (Tokyo : McGraw-Hill, 1954), 445 pág.
7. NEMA, National Electric Manufactures Association, 1969.
8. C. Ricker y C. Tucker, Electrical engineering laboratory experiments (New York : McGraw-Hill, 1955), 457 pág.

9. Ch. Siskind, Máquinas de corriente continua (Buenos Aires : HASA, 1967), 342 pág.
10. Torres y Czitron, Métodos para la solución de problemas con computadora digital (México : Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A., 1970), 579 pág.
11. H. Trenkmann, Teoría, cálculo y construcción de las máquinas de corriente continua (Barcelona : Labor, 1971), 443 pág.
12. A. Langsdorf, Principio de las máquinas de corriente continua (Madrid : McGraw-Hill, 1971), 371 pág.