



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**“REDISEÑO DE LOS DEVANADOS PARA MAQUINAS SINCRONAS
TRIFASICAS DE POLOS SALIENTES”.**

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: POTENCIA

Presentada por:

Jacinto Alvarado Ortega

Guayaquil - Ecuador

1988

AGRADECIMIENTO

A todos los integrantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica principalmente a sus directivos por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

Al Ing. Gustavo Bermudez F. director de tesis por su colaboración y facilidades prestadas para la realización de esta tesis.

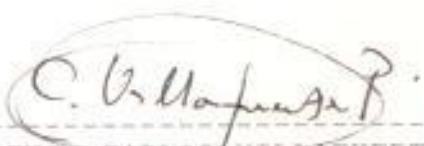
DEDICATORIA

AL CREADOR DE CIELOS Y TIERRA: Por darme la vida y la salud para poder culminar una etapa más de mi vida.

A BOLIVAR GALLARDO Y FAMILIA: Por su valiosa ayuda durante mis estudios.

A MI MADRE Y A MIS HERMANOS: Quienes me brindaron afecto y ayuda económica en los momentos más apremiantes durante mis años de estudio.

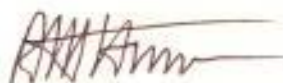
DECLARACION EXPRESA



ING. CARLOS VILLAFUERTE
SUBDECANO DE LA FIE



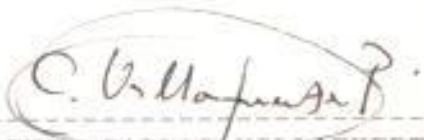
ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
DIRECTOR DE TESIS



ING. ALBERTO HANZE B.
MIEMBRO PRINCIPAL



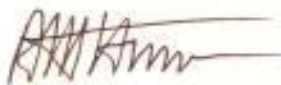
ING. ARMANDO ALTAMIRANO
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. CARLOS VILLAFUERTE
SUBDECANO DE LA FIE



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
DIRECTOR DE TESIS



ING. ALBERTO HANZE B.
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. ARMANDO ALTAMIRANO
MIEMBRO PRINCIPAL

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 POLITECNICA DEL LITORAL".

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

Jacinto Alvarado Ortega

RESUMEN

Con el objetivo de rediseñar los devanados del campo y del inducido de una máquina síncrona trifásica de polos salientes donde no se tiene los datos originales de tales devanados, se debe partir del conocimiento de las características de los núcleos del estator y del rotor en lo que se refiere a dimensiones, forma de ranuras etc. Adicionalmente debe de conocerse la potencia, voltaje, frecuencia, factor de potencia de operación y número de polos para lograr un buen rediseño de la máquina.

Para agilizar el proceso de rediseño se realiza un programa de computadora que agilizará los cálculos que de otra manera manualmente sería largo y tedioso.

Este programa básicamente determina :

- Número de espiras del inducido y del campo
- Parámetros de la máquina síncrona
- Especificaciones de los devanados

Finalmente para verificar el método de cálculo se rediseña una máquina síncrona de polos salientes.

INDICE GENERAL

	PAG.
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VII
INDICE DE FIGURAS -----	XIII
INDICE DE TABLAS -----	XV
INDICE DE ABREVIATURAS -----	XVI
INTRODUCCION -----	IX
CAPITULO I	
FUNDAMENTOS EN EL REDISEÑO DE MAQUINAS SINCRONAS	1
1.1. CASOS TÍPICOS EN LOS QUE SE DEBE REDISEÑAR	1
1.2. PRINCIPALES CRITERIOS EN EL REDISEÑO DE DEVANADOS -----	2
1.3. DIMENSIONES DE LOS NUCLEOS -----	3
1.3.1. DIMENSIONES DEL NUCLEO DEL ESTATOR -	3
1.3.2. DIMENSIONES DEL NUCLEO DEL ROTOR ---	4
1.4. POTENCIA UTIL -----	4
1.5. DENSIDADES DE FLUJO EN LA MAQUINA SINCRONA-	9
1.5.1. DENSIDAD DE FLUJO EN LOS POLOS DEL CAMPO DEL ROTOR -----	9
1.5.2. DENSIDAD DE FLUJO EN EL ENTREHIERRO-	10
1.5.3. DENSIDAD DE FLUJO EN DIENTES DEL ESTATOR -----	11

	PAG.
1.5.4. DENSIDAD DE FLUJO EN LA CORONA DEL ESTATOR -----	12
1.6. DEVANADO DE CAMPO -----	13
1.6.1. AMPERIOS-VUELTAS PARA EL ENTREHIERRO -----	13
1.6.2. AMPERIOS-VUELTAS PARA EL DEVANADO DE CAMPO -----	14
1.6.3. DIMENSIONES DEL CONDUCTOR -----	17
1.6.4. NUMERO DE ESPIRAS POR POLO DEL DEVANADO DEL DEL CAMPO -----	18
1.7. DEVANADO DEL INDUCIDO -----	19
1.7.1. FLUJO MAGNETICO POR POLO EN EL ESTATOR -----	19
1.7.2. NUMERO TOTAL DE ESPIRAS POR FASE ---	19
1.7.3. DIMENSIONES DEL CONDUCTOR -----	20
1.7.3.1. AREA NETA O UTIL DE LA RANURA -----	21
1.7.3.2. SECCION DEL CONDUCTOR -----	23

CAPITULO II

DETERMINACION TEORICA-EXPERIMENTAL DE PARAMETROS PERDIDAS Y CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO	25
2.1. CARACTERISTICAS DEL DEVANADO DEL INDUCIDO -	25
2.1.1. LONGITUD DE LA ESPIRA MEDIA -----	25
2.1.2. PESO DEL DEVANADO DEL INDUCIDO -----	27
2.2. CARACTERISTICAS DEL DEVANADO DE CAMPO-----	27
2.2.1. PESO DEL DEVANADO DE CAMPO -----	27

	PAG.
2.3. RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS -----	28
2.3.1. RESISTENCIA DEL INDUCIDO -----	28
2.3.2. RESISTENCIA DE CAMPO -----	28
2.4. REACTANCIA DE DISPERSION DEL INDUCIDO -----	29
2.4.1. REACTANCIA DE DISPERSION EN LAS RA- NURAS -----	29
2.4.2. REACTANCIA DE DISPERSION EN LOS CA- BEZALES -----	30
2.4.3. REACTANCIA DE DISPERSION EN ZIG-SAG -	30
2.4.4. REACTANCIA DE DISPERSION DE BANDA ---	32
2.5. REACTANCIAS SINCRONAS -----	32
2.5.1. REACTANCIA SINCRONA DE EJE EN CUA- DRATURA -----	34
2.5.2. REACTANCIA SINCRONA DE EJE DIRECTO -	34
2.6. CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE FUNCIONA- MIENTO -----	36
2.6.1. CONDICIONES MAXIMAS DE OPERACION ---	37
2.7. CALCULO DE PERDIDAS -----	38
2.8. CALCULO EXPERIMENTAL DE PARAMETROS Y PERDI- DAS -----	38
2.8.1. MEDIDA DE RESISTENCIA DE LOS DEVANA- NADOS -----	39
2.8.1.1. RESISTENCIA DEL INDUCIDO --	40
2.8.1.2. RESISTENCIA DEL DEVANADO DEL CAMPO -----	40
2.8.2. PRUEBA DE VACIO -----	41

	PAG.
2.8.3. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO -----	43
2.8.4. CARACTERISTICA DE FACTOR DE POTENCIA CERO -----	45
2.8.5. PRUEBA DE DESLIZAMIENTO -----	46
2.8.6. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO REPENTINO --	48
2.8.7. PRUEBA PARA DETERMINAR LA REACTANCIA DE SECUENCIA NEGATIVA -----	49
2.8.8. PRUEBA PARA MEDIR LA REACTANCIA SE- CUENCIA CERO -----	51
2.8.9. CARACTERISTICA EXTERNA -----	52
2.8.10. CARACTERISTICA DE REGULACION -----	53
2.8.11. CURVAS "V" DEL MOTOR SINCRONICO ---	55
 CAPITULO III	
METODO COMPUTACIONAL PARA EL REDISEÑO -----	57
3.1. PROGRAMA GENERAL -----	57
3.1.1. OBJETIVOS -----	57
3.1.2. PROCEDIMIENTO -----	58
3.2. ARCHIVOS DEL PROGRAMA -----	60
3.2.1. ARCHIVO DE DATOS "DTABLA COBRE" ----	61
3.2.2. ARCHIVO DE DATOS "DRMS MAQUI" ----	61
3.2.3. ARCHIVO DE RESULTADOS "RESULT RMS" -	61
3.3. DIAGRAMA DE FLUJO -----	61
3.4. MANUAL DEL USUARIO -----	68
3.4.1. NOMENCLATURA -----	68

3.4.2. EJECUCION DEL PROGRAMA "RMS" EN EL SISTEMA 43/41 -----	71
---	----

CAPITULO IV

REDISEÑO DE UNA MAQUINA SINCRONA

4.1. CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA -----	74
4.1.1. DIMENSIONES DEL CIRCUITO MAGNETICO DEL ESTATOR -----	74
4.1.2. DIMENSIONES DEL CIRCUITO MAGNETICO DEL ROTOR -----	75
4.1.3. ESPECIFICACIONES ELECTRICAS DE LA MAQUINA -----	75
4.1.4. ESPECIFICACIONES DE LOS DEVANADOS --	76
4.1.5. CURVAS Y TABLAS -----	76
4.2. CALCULO EXPERIMENTAL DE PARAMETROS Y PERDIDAS DE LA MAQUINA REDISENADA -----	77
4.2.1. RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS -----	77
4.2.2. PRUEBA DE VACIO -----	78
4.2.3. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO -----	81
4.2.4. CARACTERISTICA DE FACTOR DE POTENCIA CERO -----	84
4.2.5. PRUEBA DE DESLIZAMIENTO -----	87
4.2.6. PRUEBA DE CORTOCIRCUITO REPENTINO --	87
4.2.7. REACTANCIA DE SECUENCIA NEGATIVA -	88
4.2.8. REACTANCIA DE SECUENCIA CERO -----	89

	PAG.
4.2.9. CARACTERISTICA EXTERNA -----	89
4.2.10. CARACTERISTICA DE REGULACION -----	90
4.2.11. CURVAS "V" DEL MOTOR SINCRONICO ---	92
4.2.12. PERDIDAS Y EFICIENCIA -----	96
4.3. CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO -----	97
4.4. PARAMETROS DE LA MAQUINA REDISENADA -----	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	99
ANEXOS -----	
BIBLIOGRAFIA -----	

INTRODUCCION

Las máquinas síncronas por su función que tienen de generar la energía eléctrica tienen aplicaciones en el proceso de producción, debido a esta aplicación deben funcionar continuamente por lo que están expuestas a daños y los que más están expuestos a daños son los devanados.

Por otra parte, se ha observado que existe en el medio núcleos magnéticos con devanados quemados que no se pueden reconocer el calibre del conductor ni el tipo de conexión y sin datos de placa. Estos núcleos magnéticos pueden ser rehabilitados realizando un trabajo de rediseño.

Con la finalidad de utilizar el núcleo magnético de la máquina se pone en práctica el concepto teórico de rediseño de máquinas síncronas y se desarrolla un programa computacional de cálculo para el rediseño del devanado del campo y del inducido de una máquina síncrona trifásica de polos salientes.

Con la finalidad de comprobar las características de la máquina rediseñada se realizan pruebas experimentales

para determinar los parámetros y características de funcionamiento.

Por último se realiza un análisis comparativo entre el rediseño teórico realizado y los resultados obtenidos en las pruebas a fin de verificar que la máquina ha sido rediseñada de acuerdo a las especificaciones teóricas que se han impuesto.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS EN EL REDISEÑO DE MAQUINAS SINCRONAS

El presente capítulo describe los principales criterios que deben ser considerados en el rediseño de los devanados del inducido y del campo de una máquina síncrona.

Se indica el procedimiento de medir las dimensiones del circuito magnético del estator y rotor.

Finalmente se presenta el algoritmo del procedimiento de cálculo para la determinación del número de espiras por bobina del inducido y del campo, los parámetros de la máquina y las características de funcionamiento.

1.1. CASOS TIPICOS EN LOS QUE SE DEBE REDISEÑAR

En los siguientes casos es necesario realizar un cálculo total o parcial de los devanados.

- a. Ausencia de los devanados del inducido, campo y placa indicadora.
- b. Cuando los devanados se encuentran en

condiciones que no es posible averiguar sus características originales y la placa indicadora se halla intacta, la misma que suministrará las características necesarias que servirán de punto de partida para el cálculo.

c. Cuando la máquina ha sido reparada y existe duda que se ha realizado un buen trabajo de reparación.

d. Cuando se requiere realizar modificaciones en la máquina ya sea de voltaje, frecuencia, o factor de potencia.

1.2. PRINCIPALES CRITERIOS EN EL REDISEÑO DE DEVANADOS

Las consideraciones necesarias para efectuar un buen rediseño son las siguientes:

a. Diámetro y longitud del entrehierro necesaria para obtener la potencia deseada a una velocidad dada.

b. Conocimiento de rangos de densidades de flujo magnético permisibles en los dientes, núcleo y entrehierro con la finalidad de adoptar valores razonables de densidades de flujo.

c. Clase de aislamiento a utilizarse que servirá para evitar que los conductores se pongan en contacto con el núcleo magnético, entre si y para aislar entre capa y capa . Esta clase de aislamiento depende del nivel de voltaje requerido.

d. Conocimiento de rangos permisibles de densidades de corriente para fijar el valor adecuado tanto en el devanado del inducido como del campo de acuerdo al tipo de construcción y ventilación.

1.3. DIMENSIONES DE LOS NUCLEOS

1.3.1. Dimensiones del Núcleo del Estator

Las dimensiones principales se muestran en las figuras 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4.

Los tipos de ranuras del estator a considerarse se representan en las figuras 1.3a, 1.3b, 1.3c .

Todas las dimensiones (W10, W11, W13, D10, D11, D14, D15, R13) son dadas en cm.

Además , en los dientes deberán tomarse las

dimensiones del espesor de las chapas con el objeto de seleccionar el coeficiente de utilización dado en la tabla # 1.1 .

Tabla 1.1
COEFICIENTE DE UTILIZACION

(tomado del libro de John Kuhlman)

espesor de chapas	tipo de aislamiento		
	sin aislamiento	chapas esmaltadas	aislamiento con papel
0.50 mm	0.95	0.93	0.90
0.35 mm	0.93	0.90	0.87

1.3.2. Dimensiones del Núcleo del Rotor

Las dimensiones necesarias del rotor se ilustran en las figuras 1.5a y 1.5b.

1.4. POTENCIA UTIL

La potencia útil que desarrolla una máquina sincrónica en función del diámetro del entrehierro, longitud del paquete de chapas y velocidad de la máquina puede ser estimada con aceptable aproximación utilizando la curva de la figura 1.6 .

DIMENSIONES DEL ESTATOR

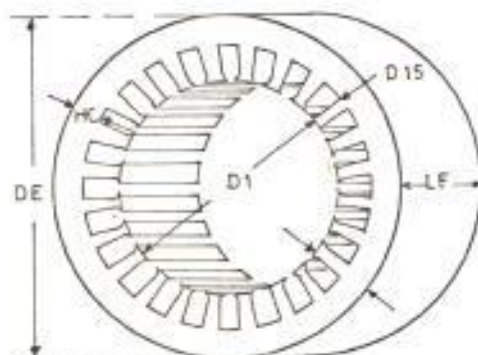


fig: 1.1

DE = diámetro exterior del estator en cm

DI = diámetro interior del estator en cm

HC = altura de la corona en cm

D15 = altura de la ranura del estator en cm

LF = longitud del paquete de chapas en cm

CANALES AXIALES DE VENTILACION

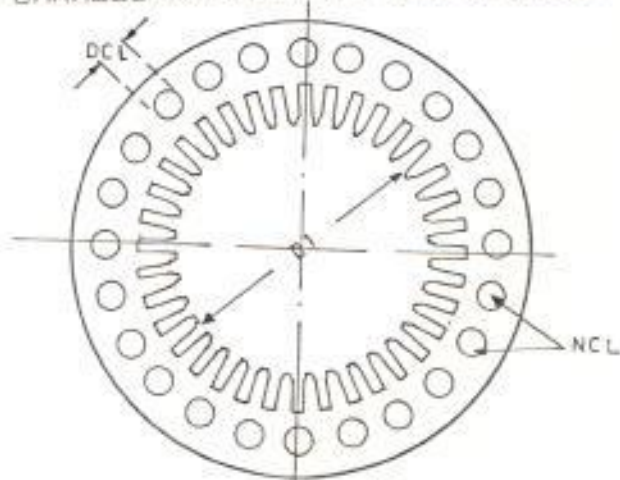


fig: 1.2

DCL = diámetro de canales longitudinales en cm

NCL = número de canales longitudinales en cm

TIPOS DE RANURAS DEL ESTATOR

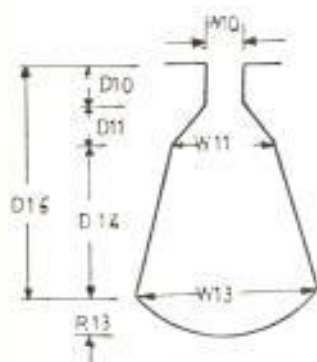


Fig: 1.3a

RANURA TRAPEZOIDAL
CON FONDO REDONDO

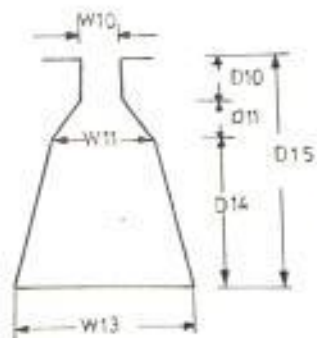


Fig: 1.3b

RANURA
TRAPEZOIDAL

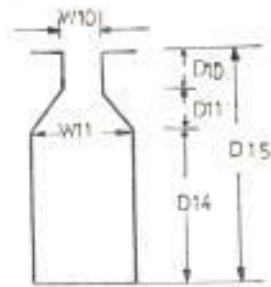


Fig: 1.3c

RANURA
RECTANGULAR

DIENTES DEL ESTATOR

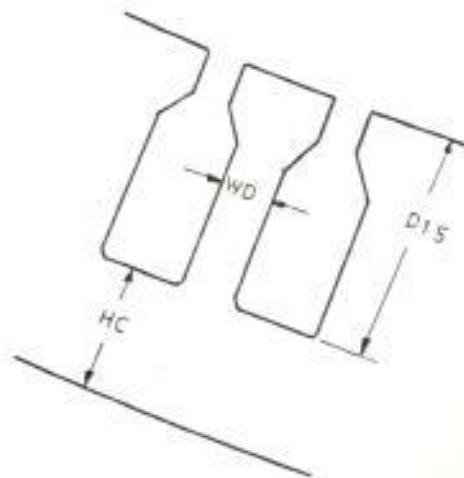


fig: 1.4

HC = altura de la corona detrás de la ranura en cm

WD = ancho del diente en cm

D15 = altura de la ranura del estator en cm

DIMENSIONES DEL NUCLEO DEL ROTOR

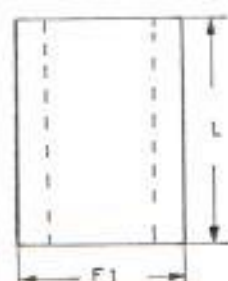
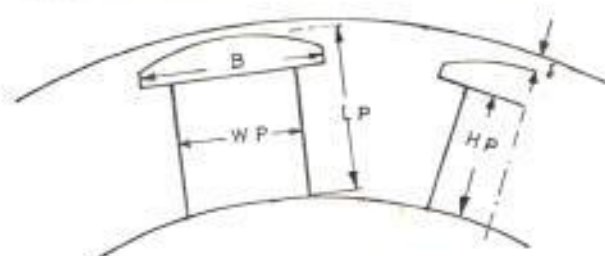


fig: 1.5a

fig: 1.5b

- δ = entrehierro mínimo en el centro del polo en cm
- LP = altura total del polo en cm
- WP = ancho del núcleo del polo en cm
- L = longitud axial del polo en cm
- B = ancho de la cara polar en cm
- Hp = altura del cuerpo del polo en cm
- FI = longitud de la cara polar en el entrehierro en cm

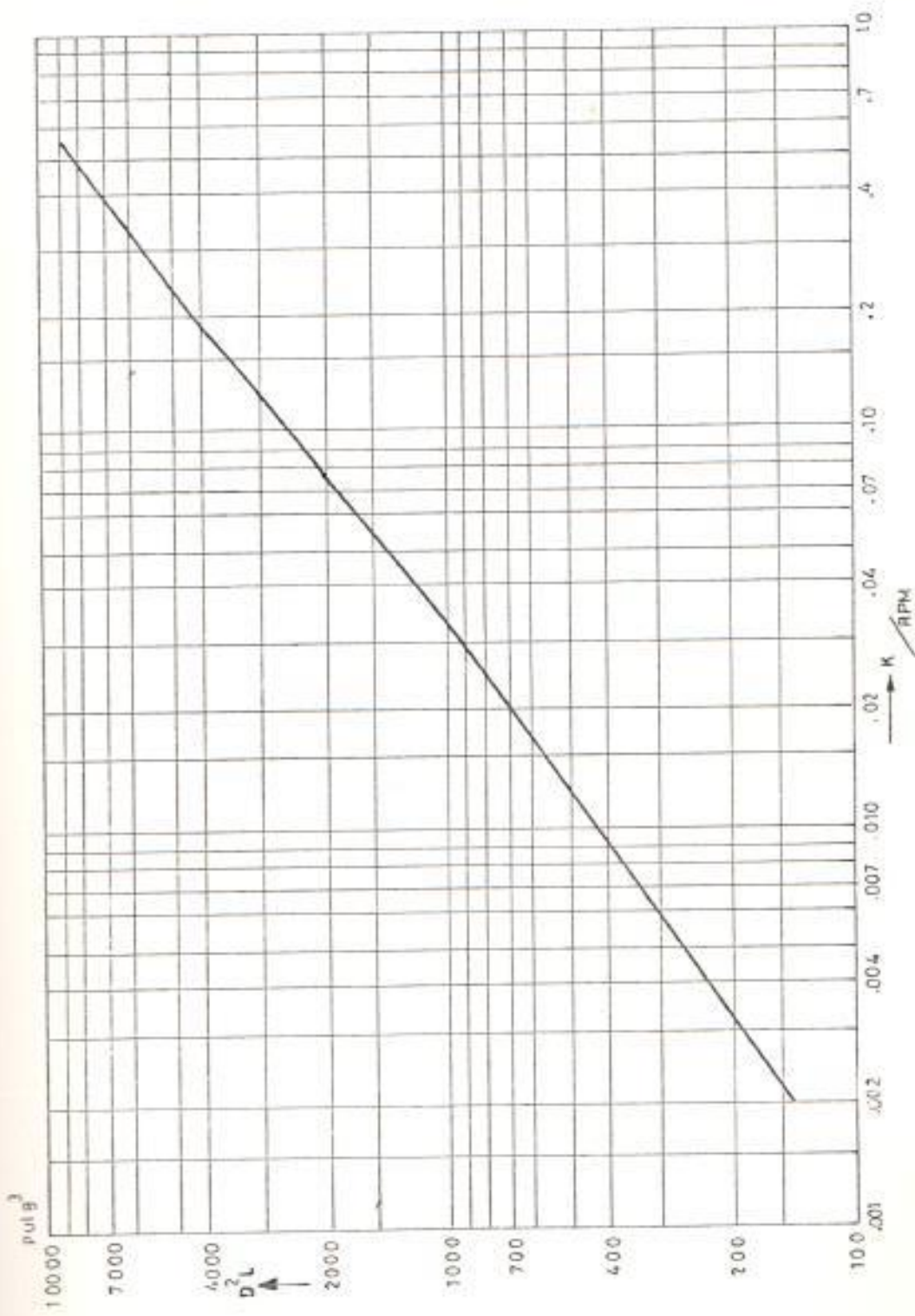


Fig: 1-6 D_L^2 como una funcion de K/RPM

1.5. DENSIDADES DE FLUJO EN LA MÁQUINA SINCRONA

En el circuito magnético de la máquina síncrona se distinguen cinco partes.

1. Corona o yugo del estator
2. Dientes del estator
3. Entrehierro
4. Polos del rotor
5. Corona o yugo del rotor

1.5.1. Densidad de Flujo en los Polos del Campo del Rotor

El flujo total en los polos es igual al flujo por polo (Φ) que cruza el entrehierro y entra en la armadura más el flujo que no cruza el entrehierro, pero que pasa entre los polos y se llama flujo de dispersión.

La relación del flujo total al flujo por polo se llama factor de dispersión (λ) y para efectos de cálculo este factor se considera en un rango de 1.2 a 1.3 .

La densidad de flujo se calcula según la

siguiente ecuación:

$$BP = \frac{\Lambda \times I}{L \times WP} \quad (1.1)$$

BP = densidad de flujo en el polo en gauss

L = longitud axial del polo en cm

WP = ancho del cuerpo del polo en cm

Para polos laminados se usarán inducciones de 13200 - 15500 gauss. Para polos no laminados se aconseja los valores menores.

1.5.2. Densidad de Flujo en el Entrehierro

Considerando que se tiene una onda sinusoidal, el valor máximo de la densidad de flujo en el entrehierro es:

$$BG = \frac{H_m \times \delta}{2 \times SG} \quad (1.2)$$

donde:

BG = densidad de flujo máxima en el entrehierro en gauss.

Para calcular la sección del entrehierro se emplea la longitud corregida del paquete de chapas (LC) :

$$LC = LF - NCAT \times DCAT \quad (1.3)$$

$$SG = \frac{\pi \times D1 \times LC}{P} \quad (1.4)$$

donde:

LF = longitud del paquete de chapas en cm

NCAT = número de canales transversales

P = número de polos

Para máquinas sincronas la inducción máxima en el entrehierro puede variar entre un rango de 5400 a 8500 gauss.

1.5.3. Densidad de Flujo en los Dientes del Estator

Debido a que la inducción en el entrehierro se considera sinusoidal esta misma consideración debe ser hecha para la inducción máxima en los dientes del estator, por consiguiente:

$$BD = \frac{\pi \times \phi}{2 \times SD} \quad (1.5)$$

donde:

BD = densidad de flujo máxima en los dientes
en gauss

SD = sección del diente por polo en cm²

Para calcular la sección (SD) es necesario conocer la longitud neta (LN) del paquete de

chapas magnéticas definida por:

$$LN = K1 \times LC \quad (1.6)$$

$$SD = \frac{LN \times NRAN1 \times WD}{P} \quad (1.7)$$

donde:

NRAN1 = número de ranuras del estator

WD = ancho del diente en cm

LC = longitud del paquete corregida en cm

K1 = coeficiente de utilización que depende

del espesor de las chapas y del tipo de aislamiento que tengan y se obtiene de la tabla # 1.

La inducción en los dientes del estator debe ser no menor de 15500 y no mayor de 18000 gauss.

1.5.4. DENSIDAD DE FLUJO EN LA CORONA DEL ESTATOR

La inducción magnética en la corona se calcula según la ecuación (1.8).

$$BD = \frac{\phi}{2 \times SC} \quad (1.8)$$

$$SC = (HC - 2/3 \times DCL) \times LN \quad (1.9)$$

donde:

BC = densidad de flujo en la corona en gauss²

SC = sección del yugo o corona en cm

DCL = diámetro de canales longitudinales en cm.

La inducción máxima en la corona está comprendida entre 7800 a 13400 gauss.

1.6. DEVANADO DEL CAMPO

El devanado del campo deberá diseñarse de tal manera que proporcione la fuerza magnetomotiva necesaria para el correcto funcionamiento de la máquina, generalmente este devanado es diseñado para condiciones de plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado.

La sección del alambre debe ser calculada para un porcentaje de voltaje de campo que varía entre 0.80 a 0.90 de este voltaje para tolerar la caída de voltaje en el reostato de campo.

1.6.1. Amperios-Vueltas para el Entrehierro

Los amperios-vueltas para el entrehierro en una armadura ranurada se calcula utilizando

1.3. Ecuación de ondas

donde

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (1.10)$$

donde

ϵ = permitividad de flujo máxima en el medio
 = longitud del antena dividida por el periodo
 del ciclo en cm

μ = factor de permeabilidad en el medio
 = longitud del antena dividida por el periodo
 del ciclo en cm

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (1.11)$$

donde

ω = frecuencia angular en la superficie de
 la antena en cm

v = velocidad de la onda en la superficie de
 la antena en cm

k = constante de propagación que es
 inversa de la longitud de onda λ

1.4. Ecuación de ondas para el momento de campo

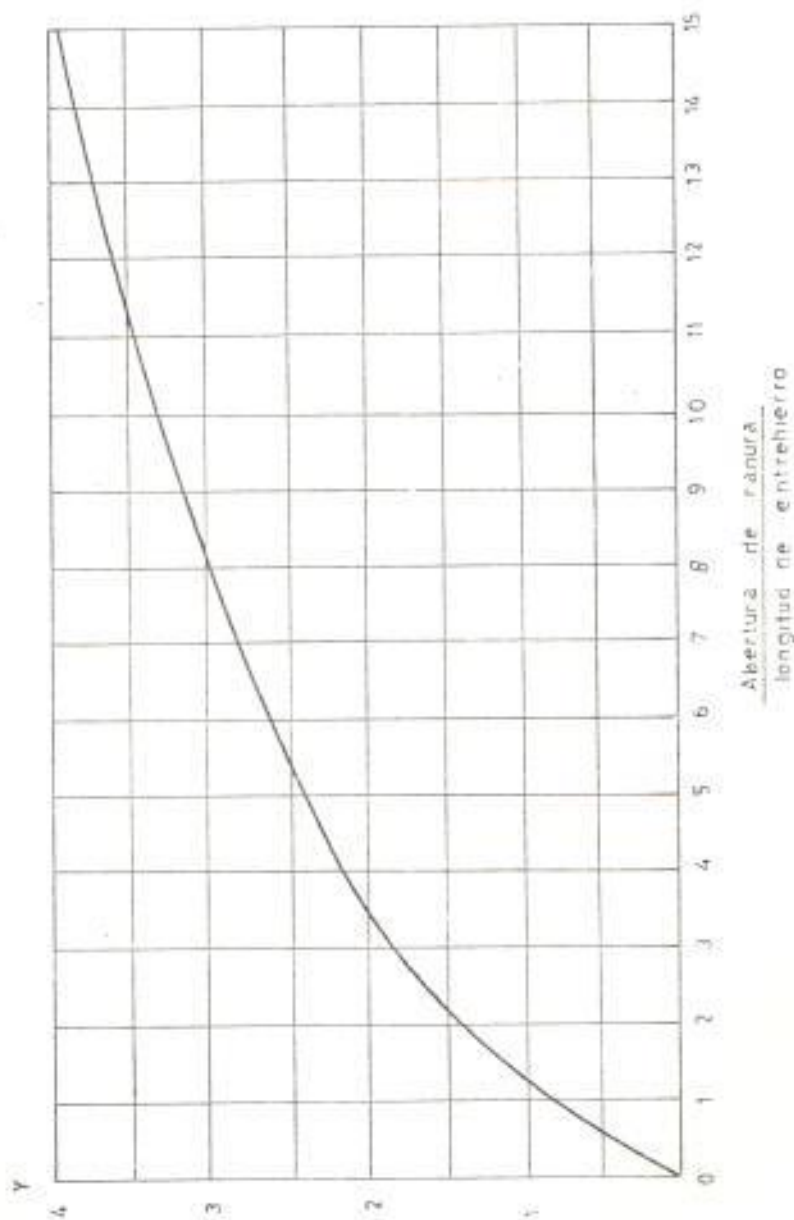


FIG. 1-7 CURVA PARA CALCULAR COEFICIENTE DE ENTREHIERRO

REF. TITULO: Diseño de aparatos eléctricos

AUTOR : JOHN H. KUHLMAN

PAG. 94

campo se calculan con la ecuación 1.12.

$$ATPF = 1.20 \times ATG \times ED \quad (1.12)$$

donde:

ATPF = amperios-vueltas para el devanado del campo

$$ED = V \times \cos\theta + I_a \times X_D \times \sin(\theta + \delta_e) \quad (1.13)$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{X_Q \times I_a \times \cos\theta}{V + X_D \times I_a \times \sin\theta} \right) \quad (1.14)$$

ED = voltaje por fase inducido en voltios

V = voltaje terminal por fase en voltios

δ_e = ángulo de defasamiento entre la fuerza electromotriz inducida y el voltaje terminal.

θ = ángulo del factor de potencia a plena carga.

X_D = reactancia en eje directo en ohmios/fase.

X_Q = reactancia de eje en cuadratura en ohmios/fase.

I_a = corriente de armadura a plena carga en amperios.

Para facilitar el cálculo se considera un incremento de fuerza magnetomotiva de un 20% que correspondería a los amperios-vueltas necesarios para vencer la reluctancia en la

parte del circuito que contiene material magnético.

1.6.3. Dimensiones del Conductor

La sección del conductor del devanado de campo se determina según la ecuación 1.15.

$$SCF = \frac{ATPF \times LFC \times P \times 211}{(0.8 - 0.9) \times EF \times 10^6} \quad (1.15)$$

donde:

EF = Voltaje del devanado de campo en voltios

SCF = sección del conductor en mm²

LFC = longitud de la espira media en cm.

La longitud de la espira media del devanado del campo se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$LFC = 2 \times L + 2 \times WP + 3.1416 [DF + 0.24] \quad (1.16)$$

L = longitud axial del polo en cm

WP = ancho del cuerpo del polo en cm

DF = espesor de la bobina del campo en cm.

El valor de DF, debe estimarse por

comparación con bobinas de campo de máquinas con características similares a la que se está rediseñando. La forma de bobina más usual es el que se ilustra en la figura 1.8.

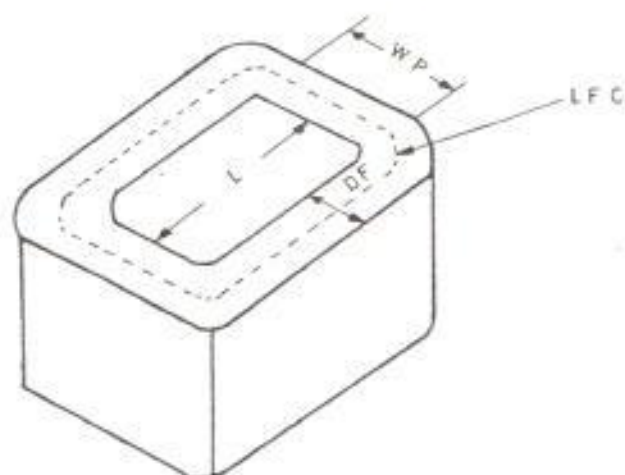


fig: 1.8 dimensiones de la bobina de campo

1.6.4. Número de Espiras por Polo del Devanado del Campo

El número de espiras del devanado del campo se calcula en función de la densidad de corriente que se estime conveniente.

$$NF = \frac{ATPF}{DCF + SDF} \quad (1.17)$$

donde :

NF = número de espiras por polo

DCF = densidad de corriente 4 a 5 amp/mm²

1.7. DEVANADO DEL INDUCIDO

1.7.1. Flujo Magnético por Polo en el Estator

El flujo magnético por polo, es calculado en función del valor asumido para la densidad de flujo en los dientes y área polar correspondiente como indica la ecuación 1.18

$$\phi = 3.1416 \times BD \times SD / 2 \quad (1.18)$$

BD = densidad de flujo en los dientes

Para evitar la saturación magnética, la densidad de flujo asumida no debe ser muy grande caso contrario la máquina se sobresaturaría y si la densidad de flujo es pequeña el material magnético sería mal utilizado.

1.7.2. Número Total de Espiras por Fase

El número de espiras en serie por fase es evaluado utilizando la siguiente relación :

$$ESF = \frac{VLL/1.732}{4.44 \times \phi \times KDP \times F \times 10^{-8}} \quad (1.19)$$

donde :

KDP = factor de devanado

F = frecuencia del voltage terminal en hz

ϕ = flujo magnético en maxwells

Para un arrollamiento con A circuitos en paralelo, cada uno con un determinado número de espiras en serie por fase (ESF) , el número de espiras por ranura será.

$$CR = \frac{2 \times ESF \times A \times M}{NRANI} \quad (1.20)$$

donde :

A = número de circuitos en paralelo

M = número de fases

NRANI = número de ranuras del estato

1.7.3. Dimensiones del Conductor

Las dimensiones del conductor dependerá de la forma de ranura , tipo de arrollamiento seleccionado y densidad de corriente asumida.

Deberá verificarse que el número de

conductores se alojen en la sección neta de la ranura.

1.7.3.1. Área Neta o Útil de la Ranura

El área neta o útil de la ranura es definida por la siguiente ecuación.

$$S_{NETA} = S_{RAN} - S_{AIS} \quad (1.21)$$

donde:

S_{RAN} = área de la ranura que depende de la forma de la ranura y de sus dimensiones y se expresa en cm^2

S_{AIS} = área ocupada por el material aislante colocado en la ranura, el aislante colocado en las ranuras y el que se coloca entre las bobinas y el espacio que ocupa la cuña.

La clase de aislamiento depende del nivel de tensión y condiciones térmicas de funcionamiento de la máquina, la tabla 1.2 muestra los espacios de aislamiento recomendado

en máquinas síncronas en función de las dimensiones del entrehierro y voltage de la máquina. Por otra parte en la tabla 1.2 se indican los siguientes parámetros:

C = claros entre bobinas y cabezales en cm.

B = extensión de la bobina de la armadura en cm.

Con el objeto de calcular el área neta de la ranura, se consideran tres tipos de ranuras.

a) Ranura trapezoidal con fondo redondo, ver la figura 1.3a.

$$S_{NETA} = ((W_{11}+W_{13})/2-IW)(D_{15}-ID + IW/2)+3.1416(R_{13}-IW/2)^2/2 \quad (1.22)$$

b) ranura tipo trapezoidal con fondo redondo ver la figura 1.3b.

$$S_{NETA} = ((W_{11}+W_{13}-IW)/2)(D_{15}-ID) \quad (1.23)$$

c) Ranura tipo rectangular ver la figura 1.3c.

$$S_{NETA} = (W_{11} - IW)(D_{15} - ID) \quad (1.24)$$

Tabla # 1.2

ESPACIOS PARA AISLAMIENTO DE LAS RANURAS

(tomado del libro de John H. Kuhlman)

voltajes envoltios	C (cm)	2B (cm)	profundidad de ranura (ID)			ancho de la ranura (IW)		
			diámetro del entrehierro (cm)	38 o menos	38 a 100 mas	100 o mas	diámetro del entrehierro (cm)	38 o menos
0-300	0.25	3.6	0.61	0.635	0.788	0.152	0.165	0.203
300-60	0.305	4.4	0.71	0.735	0.862	0.191	0.216	0.241
600-150	0.355	5.0	0.76	0.785	0.94	0.228	0.241	0.28
1500-3000	0.405	5.70	0.86	0.915	1.14	0.279	0.305	0.38

1.7.3.2. Sección del Conductor

La sección del conductor es calculada en base a la densidad de corriente asumida y la corriente nominal de la máquina. Para máquinas sincrónicas la densidad de

nominal de la máquina. Para máquinas sincronas la densidad de corriente la densidad de corriente se puede estimar de 4 a 6 amp/mm² dependiendo del tipo de ventilación y la estructura física de la máquina. Los valores altos de densidad de corriente se utilizarán para máquinas de 2 y 4 polos.

El cálculo de la sección del conductor se realiza mediante la ecuación 1.25.

$$SCDN = \frac{I_a}{DCI \times HILOS \times A} \quad (1.25)$$

donde:

SCDN = sección del conductor desnudo en mm²

DCI = densidad de corriente en amp/mm²

HILOS = número de hilos en paralelo

CAPITULO II

DETERMINACION TEORICA-EXPERIMENTAL DE PARAMETROS PERDIDAS Y CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Realizada la determinación del número de espiras en serie por fase (ESF), la sección del conductor (SCON) del devanado del inducido y número de espiras por polo (NF), sección del conductor (SCF) del devanado de campo, es necesario proceder a realizar el cálculo de parámetros (resistencias y reactivancias), para lo cual se describe las fórmulas a emplearse y técnicas de cálculo.

Mediante el uso de curvas características y los diagramas fasoriales se determinan las características de funcionamiento de la máquina.

Con el propósito de verificar las características de rediseño se describen pruebas experimentales.

2.1. CARACTERISTICAS DEL DEVANADO DEL INDUCIDO

2.1.1. Longitud de la Espira Media

Para calcular la longitud de la espira media

se considera el modelo de bobina que se ilustra en la figura 2.1. Para el cálculo de su longitud se utiliza la ecuación 2.1 .

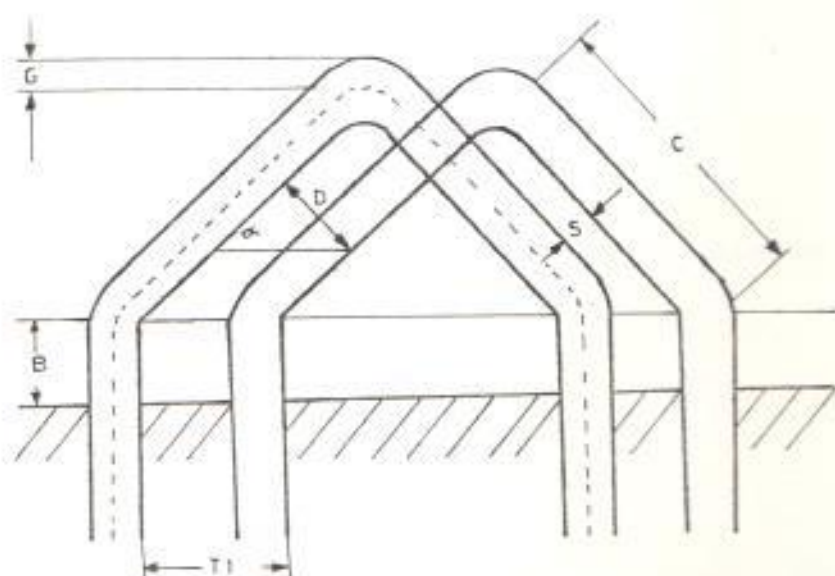


fig: # 2.1 cabezal de bobina

$$LA = 2(2D+2B+G+LF) \quad (2.1) \quad \square$$

$$LA = 2 \times \left(\frac{3.1416 \times (D1+D15)}{P \times \cos \alpha} \times P1 + 2B + D15 + LF \right) \quad (2.1.a)$$

donde:

LA = longitud de la espira media en cm

2B = extensión recta de la bobina en cm

P1 = paso en por unidad de la bobina

D = espesor del cabezal más claros en cm

G = doblés en los extremos de la bobina se considera igual a D/5 (altura de la ranura)

α = ángulo entre parte recta del cabezal y el eje de la bobina y se calcula según la ecuación 2.2 .

$$\alpha = \sin^{-1} (D/T_1) \quad (2.2)$$

T₁ = paso del diente en la superficie de la armadura en cm.

2.1.2. PESO DEL DEVANADO DEL INDUCIDO

El peso total del devanado del inducido se determina mediante la siguiente ecuación.

$$GA = LA + ESF \times A \times M \times SCDN \times HILOS \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (2.3)$$

GA = peso del devanado en Kg.

2.2 CARACTERISTICAS DEL DEVANADO DEL CAMPO

2.2.1. Peso del Devanado del Campo

El peso del devanado de campo se calcula según la ecuación 2.4.

$$GF = LFD \times NF \times P \times SCF \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (2.4)$$

donde:

GF = peso del devanado en Kg

2.3. RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

La resistencia de los devanados varia con la temperatura , se ha considerado una temperatura ambiente de 25 °C y 75°C como temperatura de trabajo debido a que las normas recomiendan estas temperaturas como valores normalizados.

2.3.1. Resistencia del Inducido

La resistencia del inducido por fase se calcula usando la ecuación 2.5 .

$$R_a = \frac{R_c \times ESF \times LA \times 10^{-4}}{A \times SCON \times HILOS} \quad (2.5)$$

donde:

R_a = resistencia del devanado en ohmios/fase

R_c = resistividad eléctrica igual a 1.74 y 2.11 para 25 y 75 grados centigrados respectivamente , y es expresada en ohmios-mm² / cm .

2.3.2. Resistencia de Campo

La resistencia del campo puede calcularse según la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{LFC \times NF \times P \times R_c \times 10^{-4}}{SCF} \quad (2.6)$$

donde:

R_f = resistencia del devanado en ohmios/fase

R_c = 2.11 (75°C) ; 1.74 (25°C).

2.4. REACTANCIA DE DISPERSION DEL INDUCIDO

Cuando la máquina trabaja con carga, la corriente de armadura produce un campo magnético alterno, la parte del campo que no pasa por el circuito magnético se llama flujo disperso de armadura.

El flujo de dispersión puede dividirse en los siguientes componentes: Flujo de dispersión en las ranuras, cabezales de bobina, dispersión en zig-zag y de banda.

Cada flujo origina sus respectivas reactancias y la reactancia total será la suma de todas las dispersiones.

2.4.1. Reactancia de Dispersión en las Ranuras

Esta reactancia se calcula mediante la siguiente relación:

$$X_S = K_2 (K_S \left(\frac{D_{15} + 2 \times D_{10}}{3 \times W_{10}} \right)) \quad (2.7)$$

donde:

X_S = reactancia de dispersión en las ranuras

$$K_2 = \frac{0.79 \times F \times LF \times M \times N^2 \times 10^{-7}}{NRAN1} \quad (2.8)$$

K_S = factor de corrección de devanados y se obtiene de la figura 2.2

2.4.2. Reactancia de Dispersión en los Cabezales

Esta reactancia es producida por el flujo disperso en los cabezales el cual abarca las bobinas de armadura en las conexiones extremas y puede ser determinada por:

$$X_{CB} = K_2 \left(\frac{0.30 \times (3 \times P_1 - 1) \times D_1 \times NRAN1}{P^2 \times LF} \right) \quad (2.9)$$

donde:

X_{CB} = reactancia de dispersión de cabezales

2.4.3. Reactancia de Dispersión en Zio-Zag

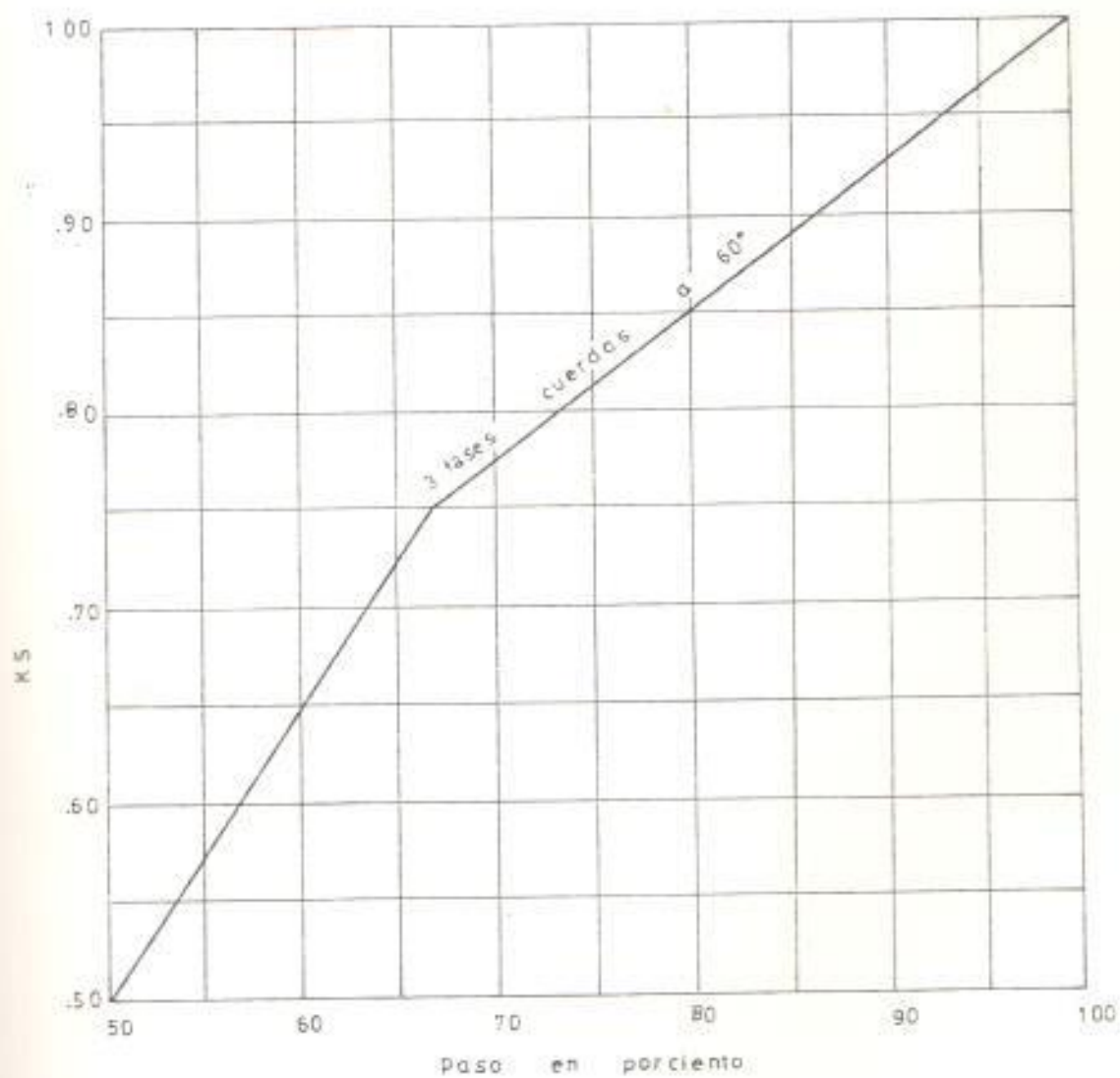


Fig. 2.2 CURVA PARA OBTENER EL FACTOR DE CORRECCION K_S

REF. TITULO: DISEÑO de aparatos eléctricos

AUTOR: JOHN H. KUHLMAN

PAG 147

producida por las componentes armónicas del flujo en el entrehierro y se calcula con la ecuación 2.10 .

$$X_{ZZ} = \frac{K_2 \times 0.26 \times D_1 \times K_{DP}^2}{N_{RAN1} \times \delta \times K} \quad (2.10)$$

X_{ZZ} = reactancia en zig-zag en ohmios/fase

2.4.4. Reactancia de Dispersión de Banda

Esta reactancia es originada en el entrehierro , para máquinas con devanados en las caras polares del rotor $X_B = 0$, y para máquinas sin devanados en las caras polares se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$X_B = K_2 \left(\frac{0.319 \times D_1 \times K_{DP}^2 \times N_{RAN1} \times K_B}{P^2 \times \delta \times K} \right) \quad (2.11)$$

X_B = reactancia dispersa de banda en ohmios/fase

K_B = constante de banda que se obtiene de la figura 2.3 .

2.5. REACTANCIAS SINCRONAS

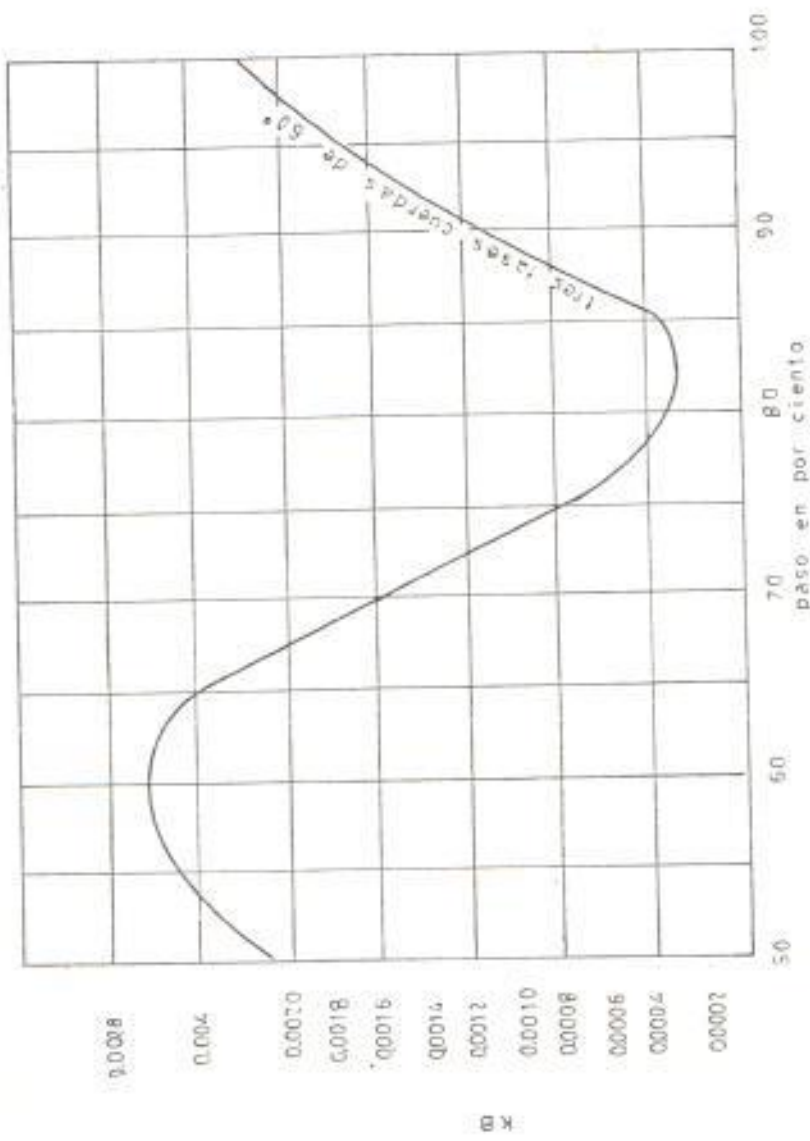


Fig. 2.3 CURVA PARA OBTENER EL FACTOR DE DISPERSION K_d

REF. TITULO: Diseño de aparatos eléctricos

AUTOR: JOHN H. KUHLMAN

PAG. 143

En una máquina síncrona de polos salientes el entrehierro no es uniforme siendo menor en los polos y mayor en el espacio entre polos consecutivos. Esta no uniformidad del entrehierro origina la reactancia de eje directo (X_D) y reactancia de eje en cuadratura (X_Q) siendo $X_D > X_Q$.

2.5.1. Reactancia Síncrona de Eje en Cuadratura

La reactancia de eje en cuadratura se calcula según la siguiente relación :

$$X_Q = X_L + X_{AQ} \quad (2.12)$$

donde:

$$X_{AQ} = X_M \times CQ \quad (2.13)$$

X_M = reactancia magnetizante definida como:

$$X_M = \frac{2.51 \times F \times LC \times M \times N_p^2 \times KDP \times D_1^2}{P^2 \times \ell \times K \times 10^8} \quad (2.14)$$

CQ = coeficiente de distribución de flujo que se obtiene de la figura 2.4 .

2.5.1. Reactancia Síncrona de Eje Directo

La reactancia síncrona de eje directo se

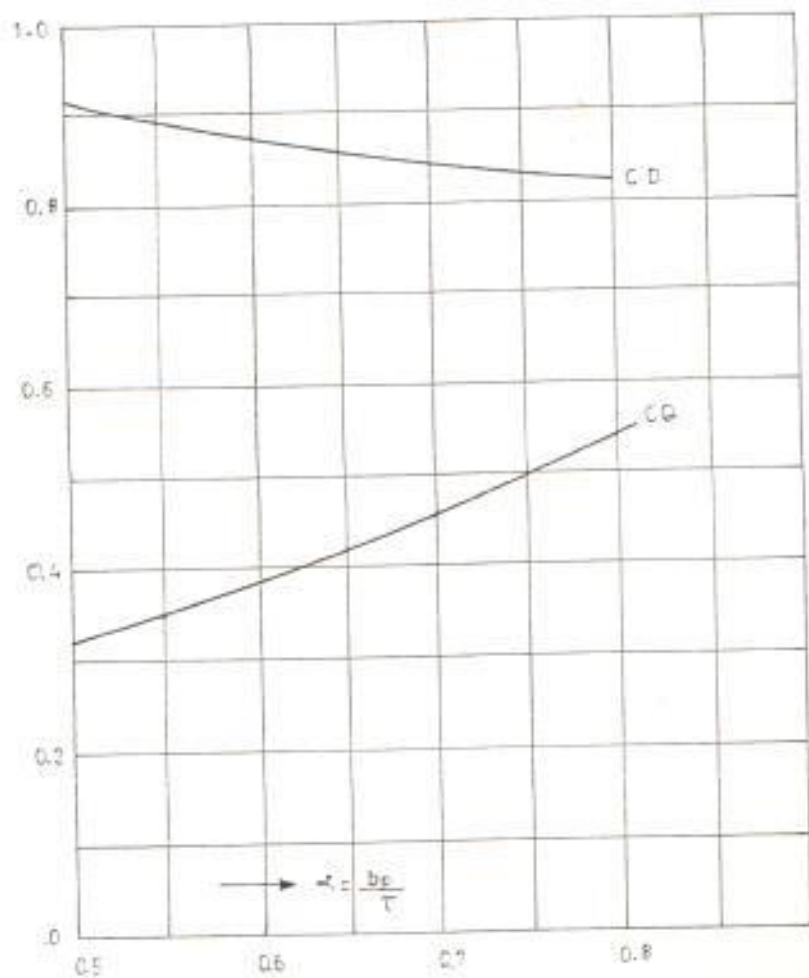


FIG. 2.4 CURVAS PARA OBTENER LOS FACTORES CD Y CQ

REF. TITULO: Máquinas de Corriente Alterna.

AUTOR: MICHAEL UWSCHITS - GARIK.

PAG. 375

calcula conforme a la siguiente relación:

$$X_D = X_L + X_{AD} \quad (2.15)$$

X_D = reactancia sincrona de eje directo en ohmios/fase

$$X_{AD} = X_M \times CD \quad (2.16)$$

CD = coeficiente de distribución de flujo de eje directo se obtiene de la figura 2.4.

2.6 CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Las características de funcionamiento serán evaluadas para dos puntos : nominal y máxima.

Para este propósito se utiliza el diagrama fasorial simplificado mostrado en la figura # 2.5 en donde se desprecia la caída de voltage en la resistencia del inducido, los puntos a tratarse serán potencia y torque desarrollado por la máquina.

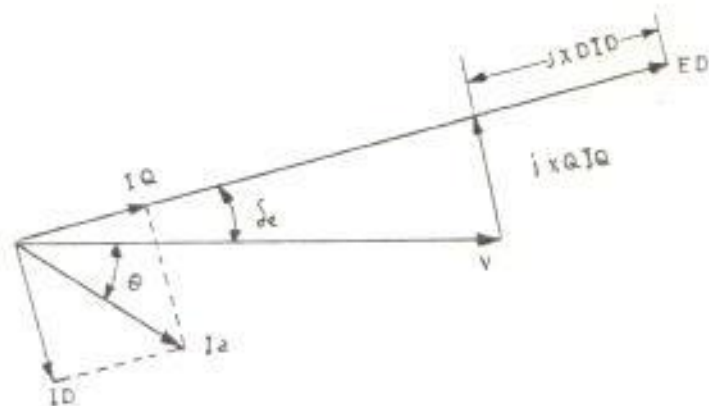


fig : N° 2.5 diagrama fasorial simplificado

Las siguientes ecuaciones son utilizadas:

$$I_a = \frac{\text{KVA} \times 1000}{1.732 \times \text{VLL}} \quad (2.17)$$

$$\delta_e = \text{tang}^{-1} \left(\frac{X_D \times I_a \times \cos \theta}{V + X_Q \times I_a \times \sin \theta} \right) \quad (2.18)$$

$$E_D = V \times \cos \theta + X_D \times I_a \times \sin(\theta + \delta_e) \quad (2.19)$$

$$\text{PCG} = 3 \left(\frac{E_D \times V \times \sin \delta_e}{X_D} + \frac{(X_D - X_Q) \times V^2 \times \sin 2\delta_e}{2 \times X_D \times X_Q} \right) \quad (2.20)$$

$$\text{TEM} = 0.974 \times \text{PCG} / \text{NS} \quad (2.21)$$

donde :

KVA = potencia nominal de la máquina

cos θ = factor de potencia

PCG = potencia de campo giratorio en vatios

TEM = torque electromagnético en Kg - m

NS = velocidad sincrónica (RPM)

2.6.1. Condiciones Máximas de Operación

Para establecer las condiciones máximas de operación se determina el ángulo crítico (δ_c) al cual la máquina desarrolla la máxima potencia las ecuaciones que se usarán son las siguientes :

$$PCGM = 3 \left(\frac{ED \times V \times \sin \delta_c}{XD} + \frac{(XD - XQ) \times V^2 \times \sin^2 \delta_c}{2 \times XD \times XQ} \right) \quad (2.22)$$

$$TEMM = 0.974 \times PCGM / NS \quad (2.23)$$

donde :

PCGM = potencia de campo giratorio máxima

TEMM = torque electromagnético máximo

2.7. CALCULO DE PERDIDAS

Las pérdidas que se dan en máquinas síncronas son las siguientes :

- Pérdidas en el cobre del devanado del inducido
- Pérdidas en el cobre del devanado del campo
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas mecánicas de fricción y ventilación
- Pérdidas de carga dispersa.

Las pérdidas mencionadas serán determinadas experimentalmente más adelante mediante las pruebas de vacío y cortocircuito .

2.8. CALCULO EXPERIMENTAL DE PARAMETROS Y PERDIDAS

Las pruebas experimentales tienen por objeto

verificar el método de cálculo utilizado y en algunos casos obtener datos que permitan la correcta especificación de la máquina.

Las pruebas necesarias para determinar los parámetros, pérdidas y características de funcionamiento son las siguientes:

- Medición de resistencia de los devanados
- Prueba de vacío
- Prueba de cortocircuito
- Prueba de factor de potencia cero
- Prueba de deslizamiento
- Prueba de corto circuito repentino
- Prueba para medir la reactancia de secuencia negativa.
- Prueba para medir la reactancia de secuencia cero
- Prueba para obtener la característica externa
- Prueba para obtener la característica de regulación.
- Curvas "V" del motor síncrono

2.8.1. Medida de Resistencia de los Devanados

El método para determinar la resistencia tanto del devanado del campo como del inducido consiste en aplicar un voltaje de corriente continua a los devanados y que

permita circular la corriente nominal, tomar datos de corriente, voltaje y temperatura durante la prueba.

2.8.1.1. Resistencia del Inducido

El diagrama de conexiones para esta prueba se muestra en la figura 2.6.

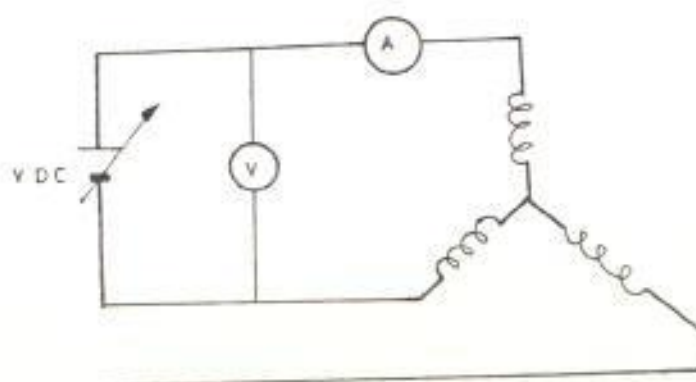


fig: # 2.6 medición de la resistencia del inducido

$$RDC(T_i) = \frac{VDC}{2 * IDC} \quad (2.24)$$

$$Ra(T_f) = \frac{RDC(T_i) * (234.5 + T_f)}{(234.5 + T_i)} \quad (2.25)$$

2.8.1.2. Resistencia del Devanado del Campo

Para medir la resistencia del devanado del campo se aplica voltaje

dc (VDC) al devanado con la precaución que la corriente no sea mayor a la nominal, la resistencia del campo será calculada por las ecuaciones 2.26 y 2.27 donde T_i es la temperatura inicial a la que se realiza la prueba y T_f se considera igual a 75°C .

$$R_f(T_i) = \text{VDC} / \text{IDC} \quad (2.26)$$

$$R_f(T_f) = \frac{R_f(T_i) \times (234.5 + T_f)}{(234.5 + T_i)} \quad (2.27)$$

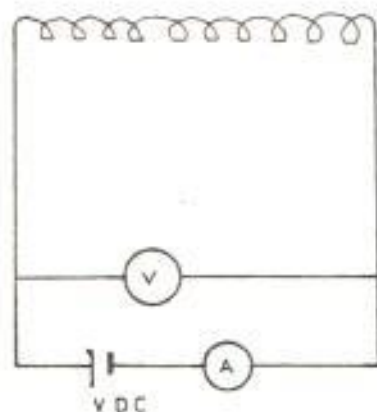


fig: # 2.7 medición de la resistencia de campo

2.8.2. Prueba de Vacío

La prueba de vacío representa el voltaje

terminal en circuito abierto en función de la corriente de campo I_f .

Midiendo la potencia de entrada necesaria para realizar esta prueba se determinan las pérdidas de fricción más ventilación y las pérdidas en el núcleo. A continuación se describe el procedimiento para realizar esta prueba.

1. Llevar la máquina auxiliar DC a la velocidad de sincronismo del generador y medir la potencia consumida por la máquina DC.
2. Realizar las conexiones mostradas en la figura 2.8.
3. Arrancar la máquina auxiliar DC y llevar el grupo a la velocidad de sincronismo del generador y tomar la lectura de la potencia consumida por la máquina auxiliar DC.
4. Tomar lecturas del voltaje terminal y corriente del campo variando la excitación, simultáneamente medir la

potencia consumida por la máquina DC .

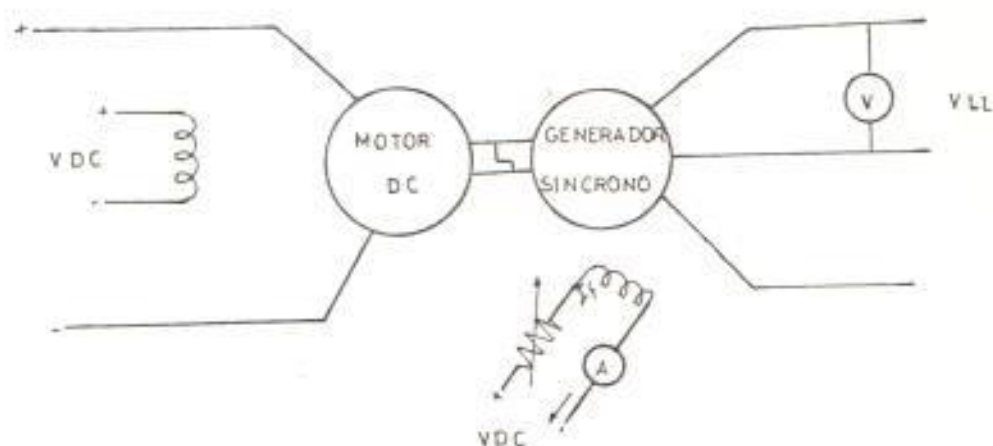


fig: # 2.8 diagrama de conexiones prueba de vacío

La lectura de la potencia realizada en el paso tres corresponde a las pérdidas de ventilación mas fricción . Las pérdidas en el núcleo deberán encontrarse por diferencia entre la lectura de potencia tomada en el paso cuatro y paso tres.

2.8.3. Prueba de Cortocircuito

Con la prueba de cortocircuito se determina la variación de la corriente del inducido I_a en función de la corriente de campo I_f .

Midiendo la potencia consumida en la máquina

DC se obtienen las pérdidas en el cobre del inducido más las pérdidas por cargas dispersas. Seguidamente se describe el procedimiento para realizar esta prueba.

1. Realizar las conexiones mostradas en la figura 2.9.
2. Arrancar la máquina DC y llevar el grupo a la velocidad de sincronismo.
3. Variar I_f en pasos hasta un valor tal que $I_a = 1.5 I_n$, tomar simultáneamente lecturas de I_a , I_f y potencia consumida por la máquina DC.

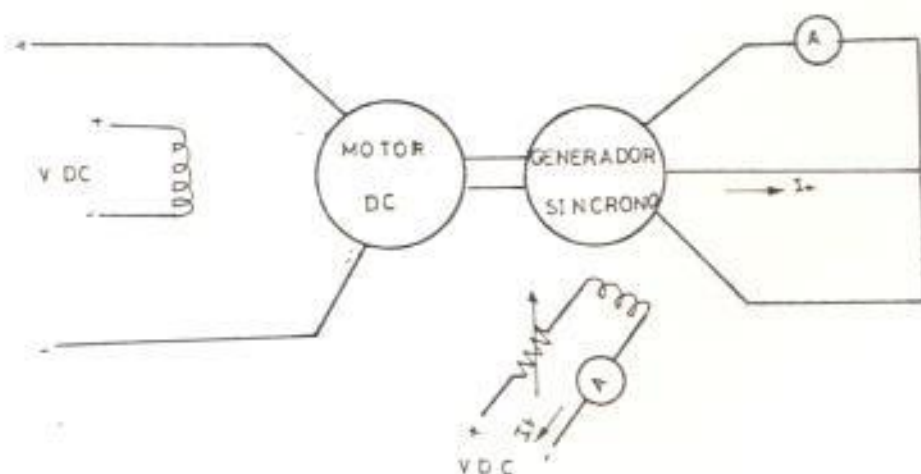


fig: # 2.9 diagrama de conexiones prueba de cortocircuito

Las pérdidas del cobre en el inducido más

las pérdidas por cargas dispersas son obtenidas al hacer la diferencia entre la potencia medida durante la prueba y las pérdidas por ventilación y fricción calculadas en la prueba de vacío.

2.8.4. Característica de Factor de Potencia Cero

La característica de factor de potencia cero expresa el voltaje terminal en función de la corriente de campo manteniendo la corriente de armadura constante. Utilizando esta característica y la de vacío es posible determinar la reactancia de dispersión. A continuación se describe el procedimiento para realizar esta prueba.

1. Realizar el esquema de conexiones mostrado en la figura 2.10.
2. Llevar el grupo a la velocidad de sincronismo y generar el voltaje nominal en vacío.
3. Conectar carga puramente inductiva hasta un valor de corriente de armadura cercano a la nominal.

4. Desconectar carga en pasos y variar la corriente de campo para mantener la corriente de armadura constante, en estas condiciones tomar lecturas del voltaje terminal y la corriente de campo.

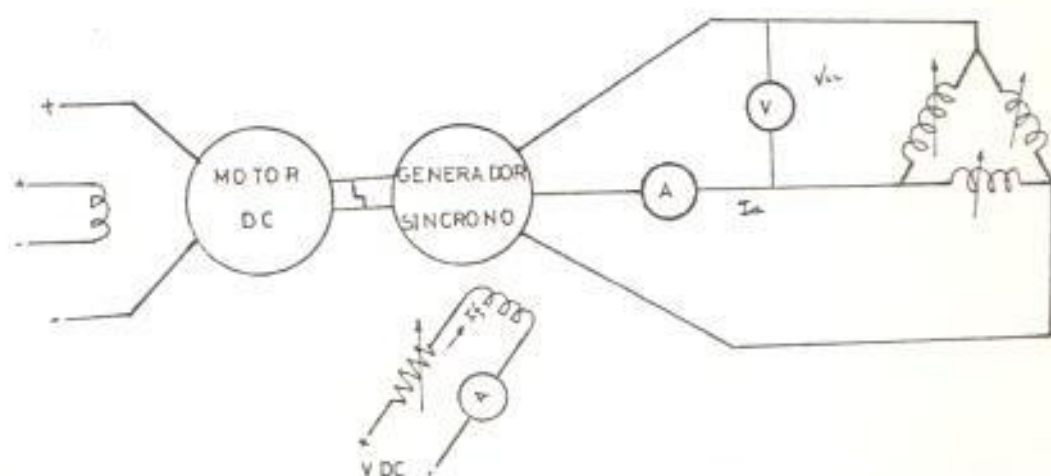


fig: # 2.10 diagrama de conexiones prueba de factor de potencia cero.

2.8.5. Prueba de Deslizamiento

Esta prueba se realiza para determinar las reactancias sincronicas de eje directo y eje en cuadratura. El procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente:

1. Realizar las conexiones correspondientes al esquema de la figura 2.11.
2. Manteniendo el circuito de excitación del

generador abierto hacer girar a la máquina a una velocidad ligeramente diferente a la nominal.

3. En estas condiciones aplicar una tensión cuyo valor se encuentre en el punto donde se separan la recta del entrehierro y la curva de saturación en la característica de vacío de la máquina.
4. Con ayuda del osciloscopio obtener el oscilograma de las ondas de voltaje y corriente del inducido.

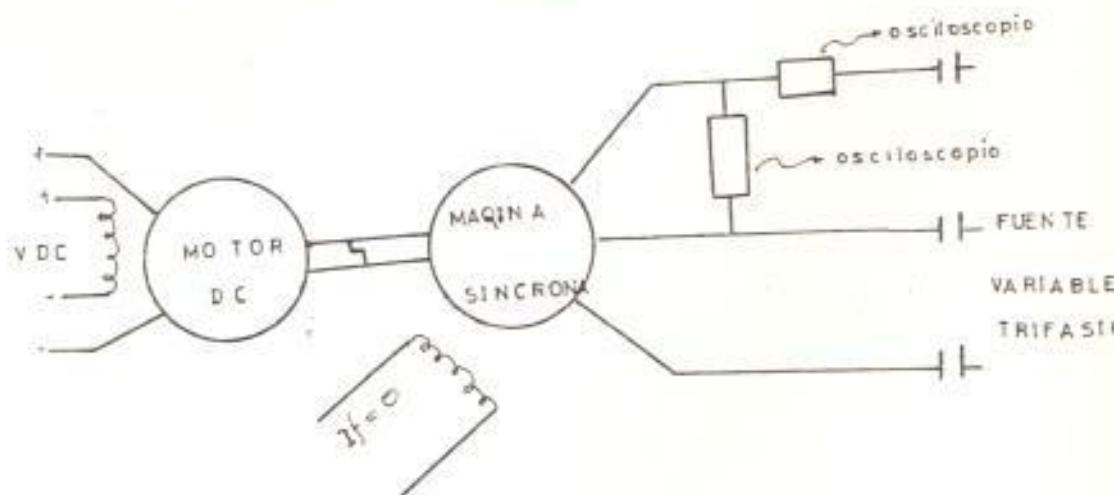


fig: # 2.11 diagrama conexiones para la prueba de deslizamiento

Con los valores de voltaje y corriente obtenidos en el osciloscopio se procede a calcular las reactancias utilizando las ecuaciones 2.28 y 2.29 .

$$X_D = \frac{V_{\max}/1.732}{I_{\min}} \quad (2.28)$$

$$X_Q = \frac{V_{\min}/1.732}{I_{\max}} \quad (2.29)$$

donde:

X_D = reactancia de eje directo en

X_Q = reactancia de eje en cuadratura en

2.8.6. Prueba de Cortocircuito Repentino

Con esta prueba se determina la reactancia de eje directo, la reactancia transiente y subtransiente de la máquina síncrona. El procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente:

1. Llevar el grupo a la velocidad de sincronismo y generar el voltaje nominal.
2. En estas condiciones aplicar un cortocircuito repentino.
3. Con ayuda del osciloscopio obtener el oscilograma de corriente y tomar lecturas de las corrientes subtransitoria (I'') transitoria (I') y de estado estable (I).

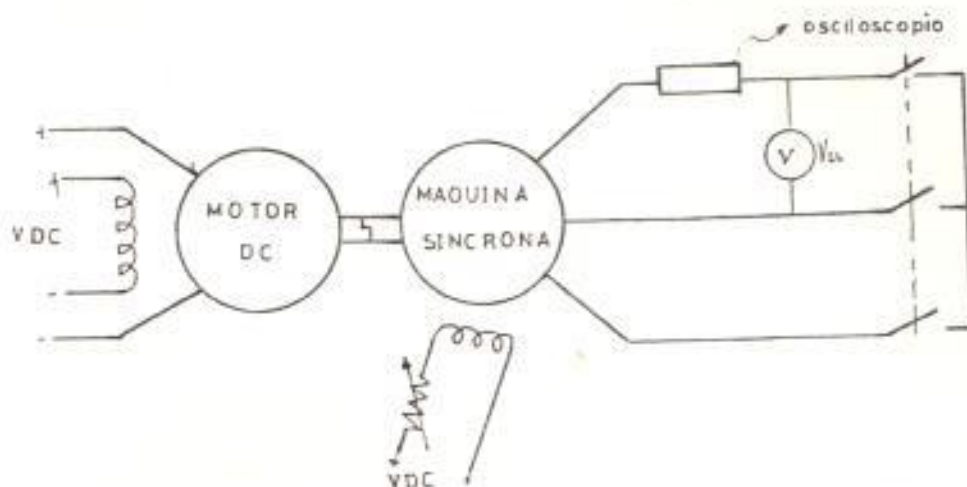


fig: # 2.12 diagrama de conexiones para la prueba de cortocircuito repentino

Con los resultados que se toman en el oscilograma de corriente se determinan con las ecuaciones 2.30, 2.31 y 2.32 las reactancias subtransiente (X_D'') transiente (X_D') y de eje directo (X_D).

$$X_D'' = \frac{V_{LL}/1.732}{I''/1.414} \quad (2.30)$$

$$X_D' = \frac{V_{LL}/1.732}{I'/1.414} \quad (2.31)$$

$$X_D = \frac{V_{LL}/1.732}{I/1.414} \quad (2.32)$$

2.8.7. Prueba para Determinar la Reactancia de Secuencia Negativa

El esquema para determinar la reactancia de

secuencia negativa es el que se muestra en la figura 2.9 . El procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente:

Trabajando la máquina síncrona a su velocidad nominal se procede a la aplicación de un cortocircuito entre dos de sus terminales. En estas condiciones tomar lectura de la corriente de armadura I_a , voltaje terminal entre la fase libre y cualquiera de las fases cortocircuitadas E y la lectura de potencia . La reactancia de secuencia negativa está dada por la siguiente ecuación :

$$X_2 = \frac{E \times \cos\phi}{1.732 \times I} \quad (2.33)$$

X_2 = reactancia de secuencia negativa en Ω
 ϕ = factor de potencia durante la prueba .

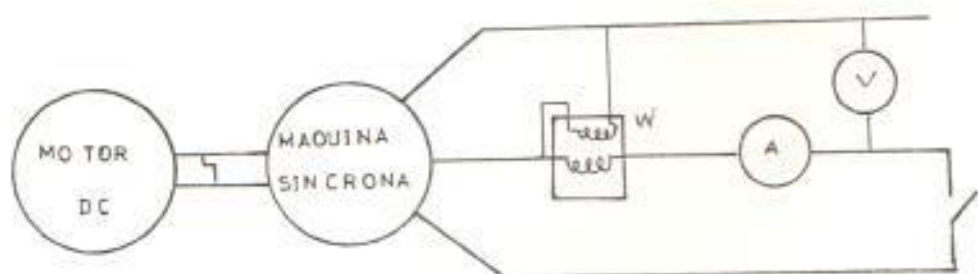


fig: # 2.13 diagrama de conexiones para determinar la reactancia de secuencia negativa

2.6.6. Prueba para medir la Reactancia de Secuencia

Cero

El diagrama de conexiones para determinar la reactancia de secuencia cero es el que se muestra en la figura 2.14 . El procedimiento para realizar esta prueba es el que se especifica a continuación .

Impulsar la máquina hasta la velocidad de sincronismo con su arrollamiento de excitación en cortocircuito . Si se conectan las fases del estator en paralelo , circulará una corriente monofásica al aplicar una tensión a los bornes del inducido. La reactancia de secuencia cero se calcula utilizando la ecuación 2.34 .

$$X_0 = Z_0 \operatorname{sen} \phi \quad (2.34)$$

$$Z_0 = 3 \times E / I \quad (2.35)$$

donde:

X_0 = reactancia de secuencia cero en

I = corriente de armadura durante la prueba
en amperios.

E = voltaje monofásico aplicado a los
terminales del estator durante la prueba
en voltios.

ϕ = ángulo de factor de potencia durante la prueba.

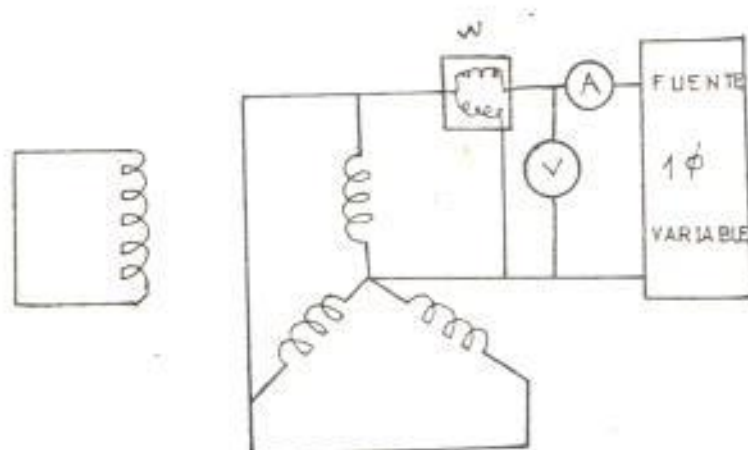


fig: # 2.14 diagrama de conexiones para medir la reactancia de secuencia cero

2.8.9. Característica Externa

La característica externa expresa la variación del voltaje terminal en función de la corriente de campo, el diagrama de conexiones para esta prueba se muestra en la figura 2.15 y el procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente :

1. Arrancar la máquina DC y llevar el grupo a la velocidad de sincronismo.
2. Generar el voltaje nominal de la máquina y tomar lectura de la corriente de

excitación y voltaje terminal VLL.

3. Manteniendo constante la corriente de campo I_f en el valor antes mencionado, variar la carga, simultaneamente tomar lectura de la corriente de armadura I_a y voltaje terminal VLL. Este procedimiento se realizará para carga con factor de potencia la unidad, 0.8 en atraso y 0.8 en adelanto.

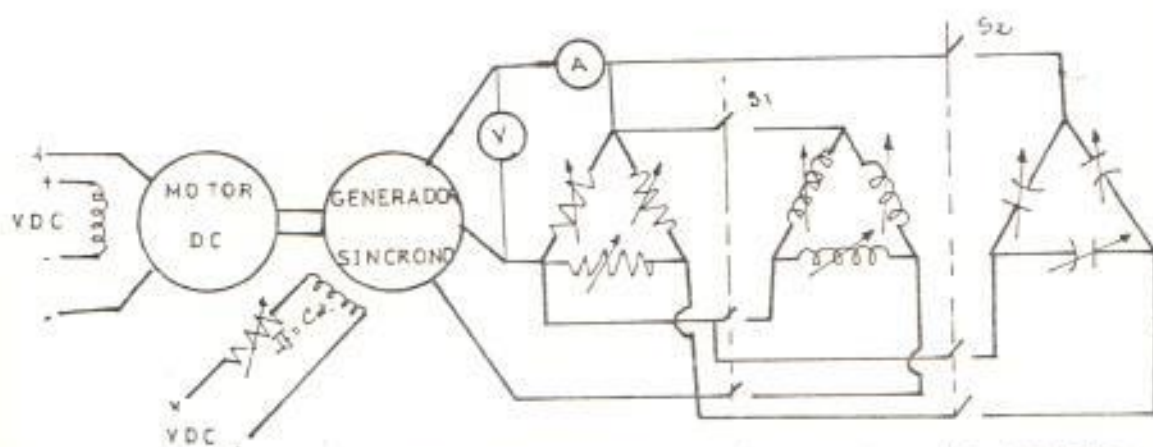


fig: # 2.15 diagrama de conexiones de la prueba característica externa

2.8.10. Característica de Regulación

La característica de regulación expresa la variación de la corriente de campo en función de la corriente de armadura trabajando la máquina con voltaje nominal constante. El procedimiento para realizar

esta prueba se describe a continuación y el diagrama de conexiones es el que se muestra en la figura 2.16 .

1. Arrancar el grupo y llevar a la velocidad de sincronismo , en estas condiciones generar el voltage nominal .
2. Conectar carga en pasos , simultaneamente tomar lecturas de corriente de armadura I_a y corriente de campo I_f manteniendo el voltaje terminal V_{LL} constante . Este procedimiento debe ser realizado para las condiciones de carga con factor de potencia la unidad. 0.8 atrazado y 0.8 en adelante.

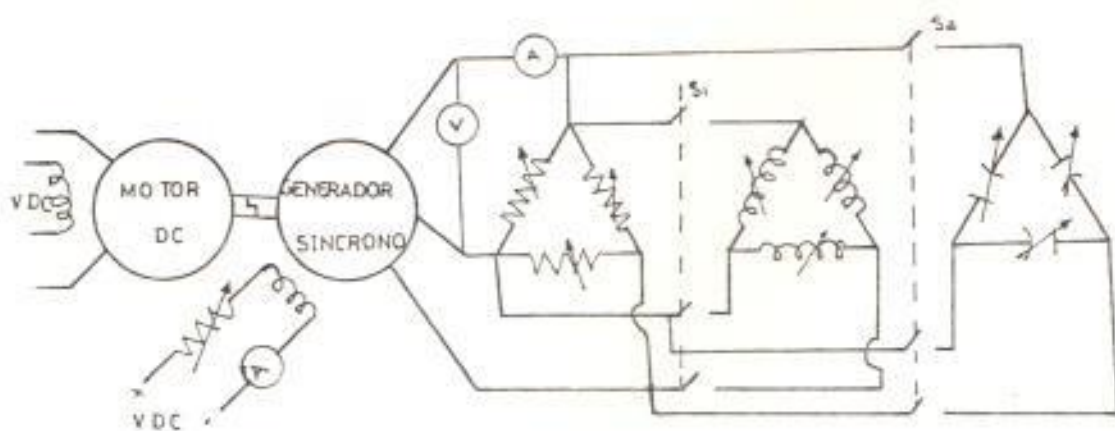


fig: # 2.16 diagrama de conecciones para la prueba característica de regulación

2.8.11. Curvas "V" del Motor sincrónico

La característica de corriente de armadura en función de la corriente del campo del motor sincrónico con carga constante es semejante a una acurva "V".

El procedimiento para realizar esta prueba se describe a continuación .

1. Realizar las conexiones que se muestran en la figura 2.17.
2. Llevar el grupo cerca de la velocidad de sincronismo con la corriente de excitación igual a cero.
3. En estas condiciones desenergizar completamente la máquina DC y simultaneamente aplicar el voltaje nominal a los terminales del estator.
4. Sincronizar la máquina incrementando la corriente de campo.

5. En estas condiciones aplicar carga al generador DC. Manteniendo la carga constante incrementar la corriente de campo I_f hasta un cierto valor.

6. Disminuir la corriente de campo en pasos y tomar lectura de la corriente de armadura I_a y la corriente de campo I_f .

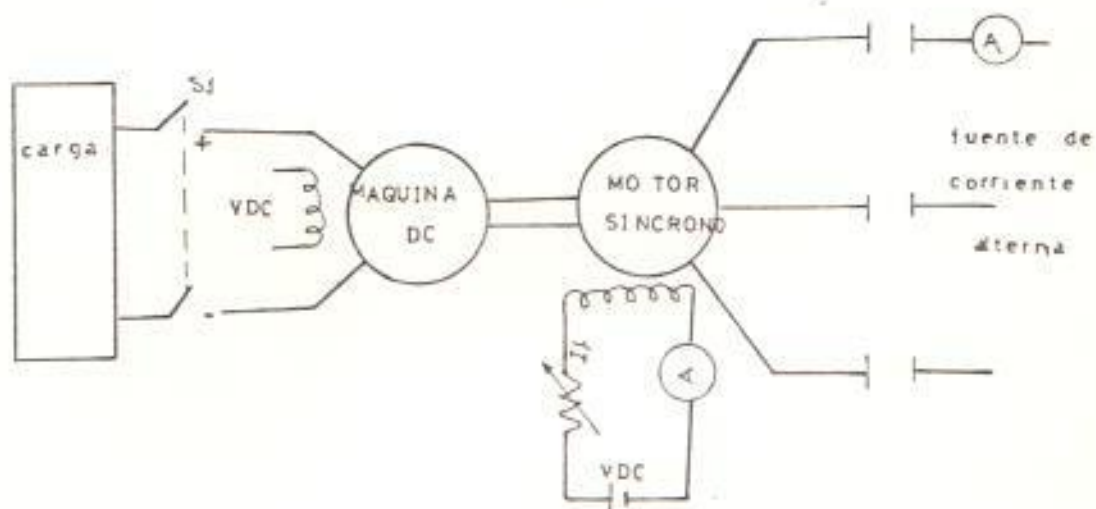


fig: # 2.17 esquema de conexiones de la prueba curvas "V" del motor sincrónico

CAPITULO III

METODO COMPUTACIONAL PARA EL REDISEÑO

En el presente capítulo se describe el programa para el cálculo de los devanados denominado "RMS" y escrito en lenguaje fortran y grabado en librería común en el sistema 43/41 de la ESPOL.

3.1. PROGRAMA GENERAL

3.1.1. Objetivos

El objetivo de este programa es efectuar el cálculo del devanado trifásico imbricado de dos capas con conexión estrella en el estator, cálculo del devanado del campo, parámetros de la máquina, y características de funcionamiento a partir de las dimensiones del núcleo magnético y condiciones de operación asumidas tales como voltaje, potencia, frecuencia, factor de potencia.

3.1.2. Procedimiento

El programa "RMS" presenta un método de cálculo para el devanado del inducido en base al criterio de la densidad de flujo asumida en los dientes cuyo valor máximo no debe superar a los 18000 gauss.

Con el objetivo de calcular el calibre del alambre del inducido y del campo se utiliza el criterio de densidad de corriente y para calcular las características de funcionamiento se utiliza el diagrama fasorial simplificado. A continuación se describen los puntos principales que se consideran en el desarrollo del programa.

a). Las principales verificaciones son:

a.1) Verifica que la potencia asumida como dato de entrada esté acorde con las dimensiones del núcleo magnético de la máquina.

a.2) Verifica que el valor asumido para la densidad de flujo en los dientes no sea mayor al valor máximo

permisible en caso contrario el programa asignará el valor máximo permisible para los cálculos.

a.3) Previo a la selección del calibre de alambre para el devanado del inducido se verifica lo siguiente:

1. Que el diámetro del alambre sea menor a la entalladura de la ranura.
2. Que el diámetro del alambre esté comprendido dentro del rango en la tabla de calibres de conductores, en caso contrario se incrementará el número de hilos en paralelo.
3. Que todos los conductores por ranura calculados se alojen en la ranura en caso contrario se incrementará la densidad de corriente.

a.4) Previo a la selección del conductor del devanado del campo se debe

verificar que el diámetro del conductor se encuentre dentro del rango en la tabla de calibres.

b) La forma como se imprimen los resultados

b.1) Densidades de flujo magnético

b.2) Características del devanado del inducido.

b.3) Características del devanado del campo.

b.4) Parámetros de la máquina síncrona

b.5) Características de funcionamiento

En el programa se introducen las variables de corrección (FCXD) y (FCXQ) que tienen la finalidad de ajustar los valores de reactancias teóricas con respecto a los experimentales.

3.2. ARCHIVOS DEL PROGRAMA

El programa utiliza los archivos "DTABLA COBRE" y "DRMS MAQUI" como datos de entrada y el archivo "DRMS RESULT" como archivo de datos de salida.

3.2.1. Archivo de Datos "DTABLA COBRE"

Este archivo contiene los valores correspondientes a especificaciones de las características de los alambres de cobre circular desde el # 10 hasta el # 30 , según clasificación AWG.

3.2.2. Archivo de Datos "DRMS MAQUI"

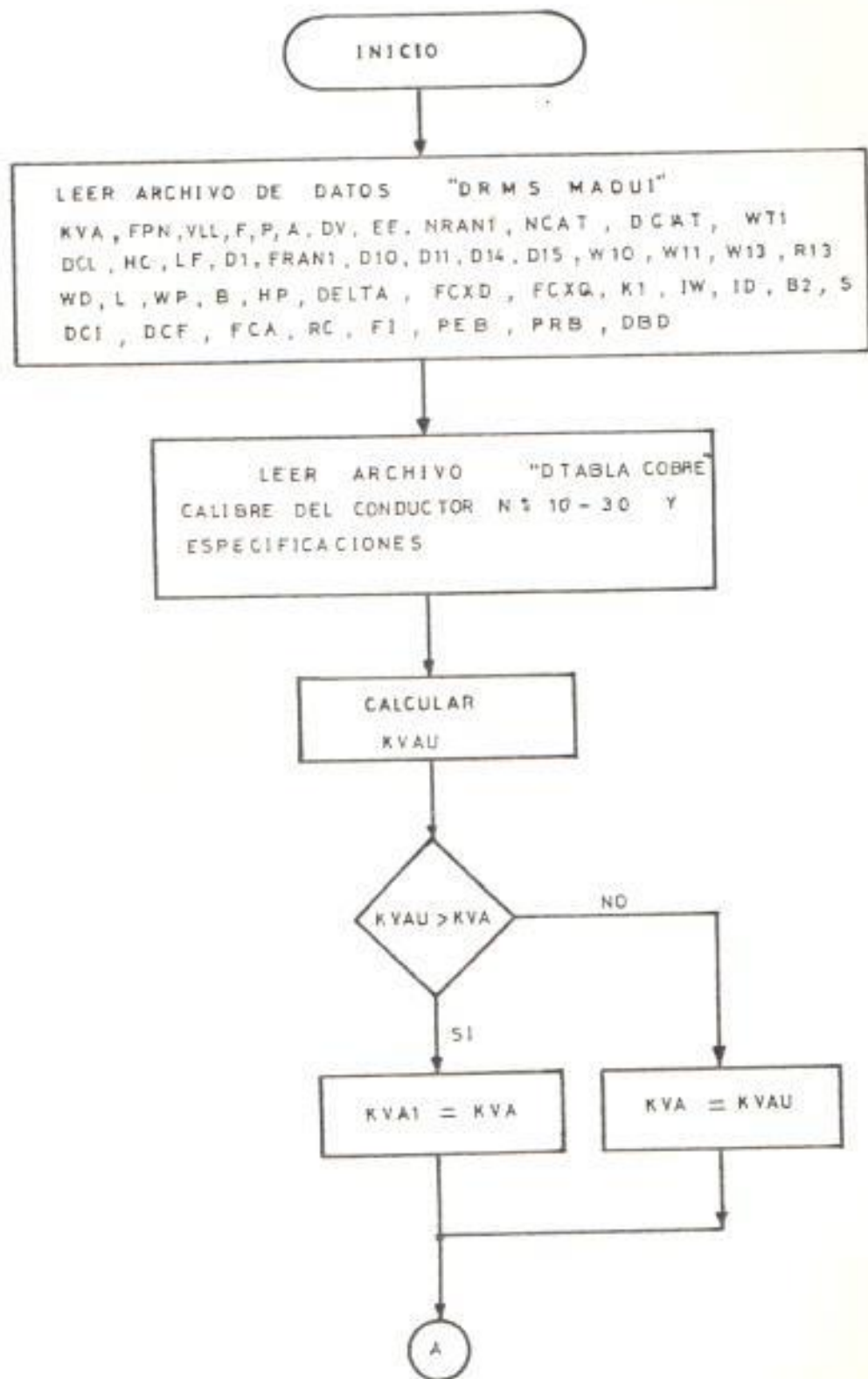
En este archivo se introducen los datos necesarios para efectuar el rediseño de los devanados de la máquina, el orden de entrada para los datos está de acuerdo a como se escribe en el diagrama de flujo.

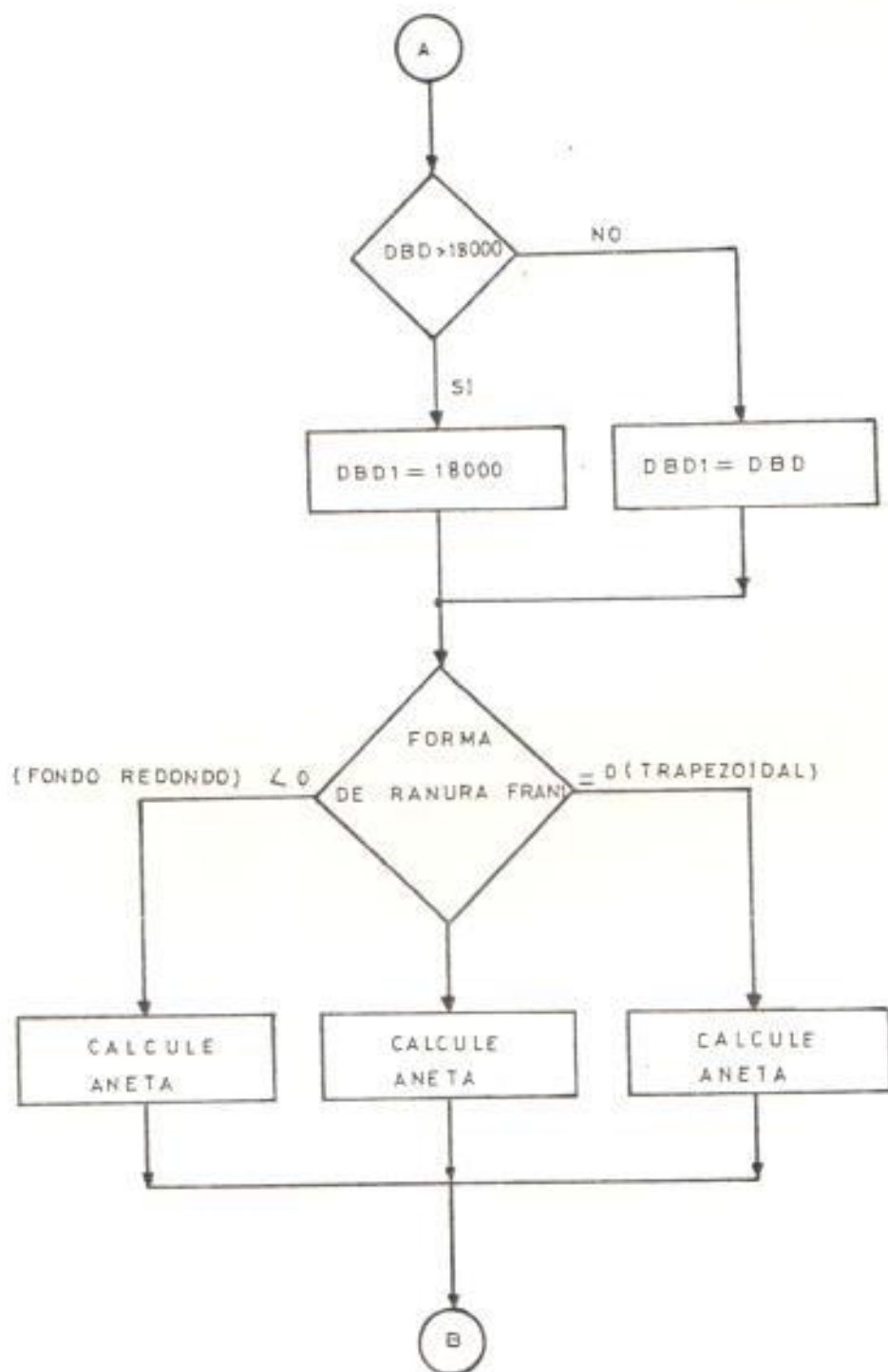
3.2.3. Archivo de Resultados "RESULT RMS"

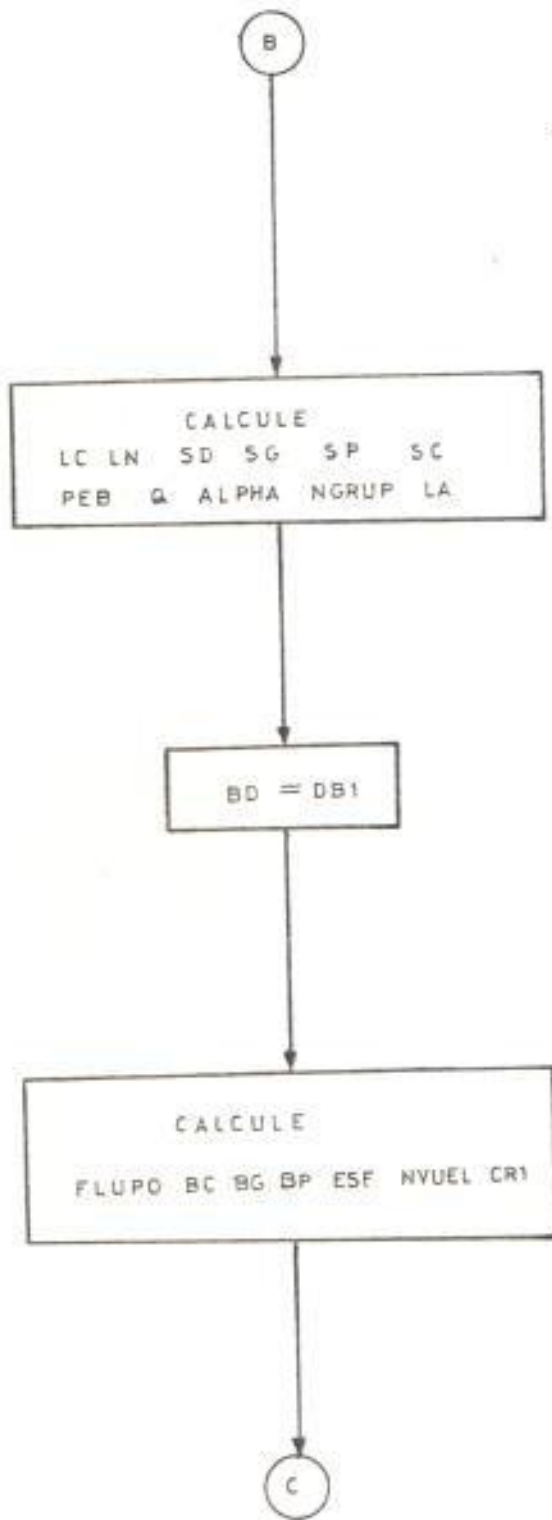
En este archivo el programa almacena los resultados de la ejecución , el cual pasa al poder del usuario una vez ejecutado el programa.

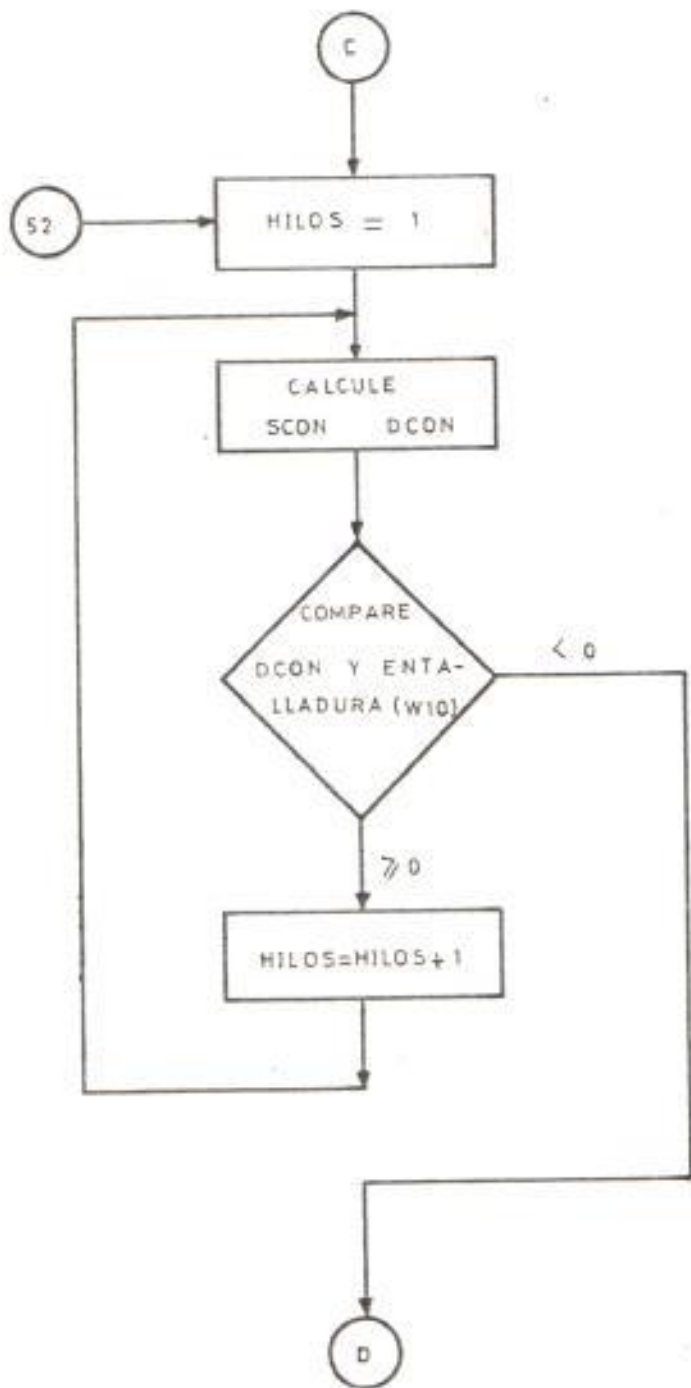
3.3. DIAGRAMA DE FLUJO

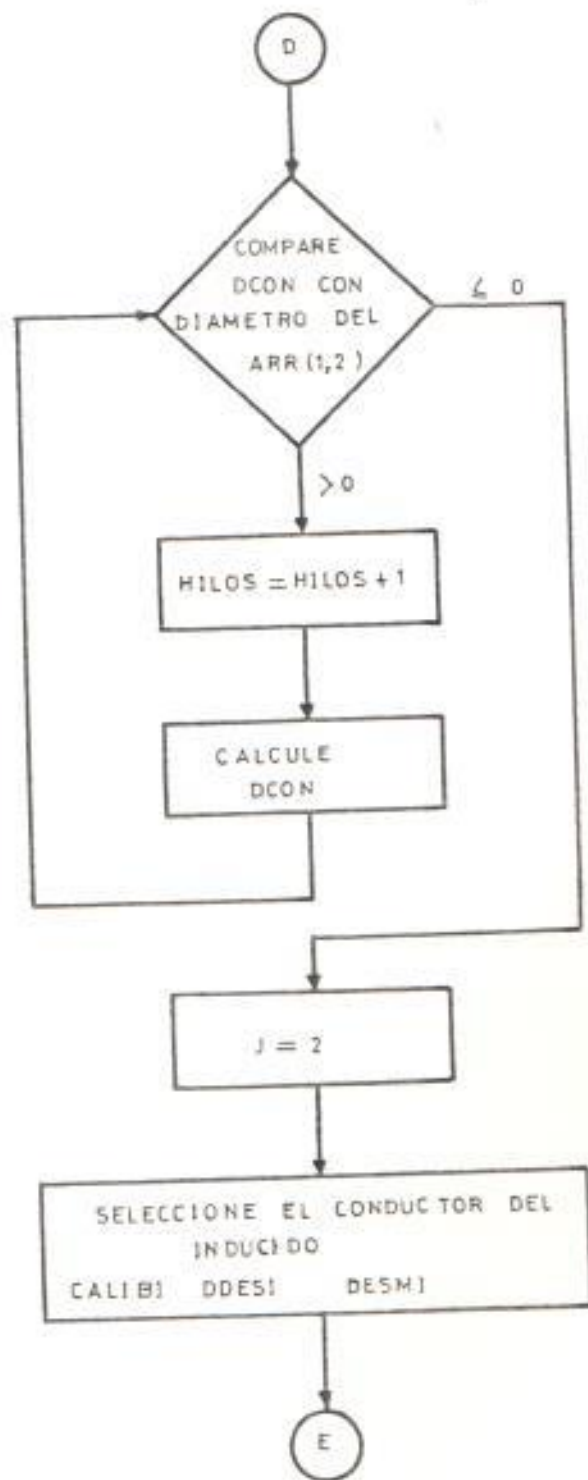
El diagrama de flujo es el siguiente:

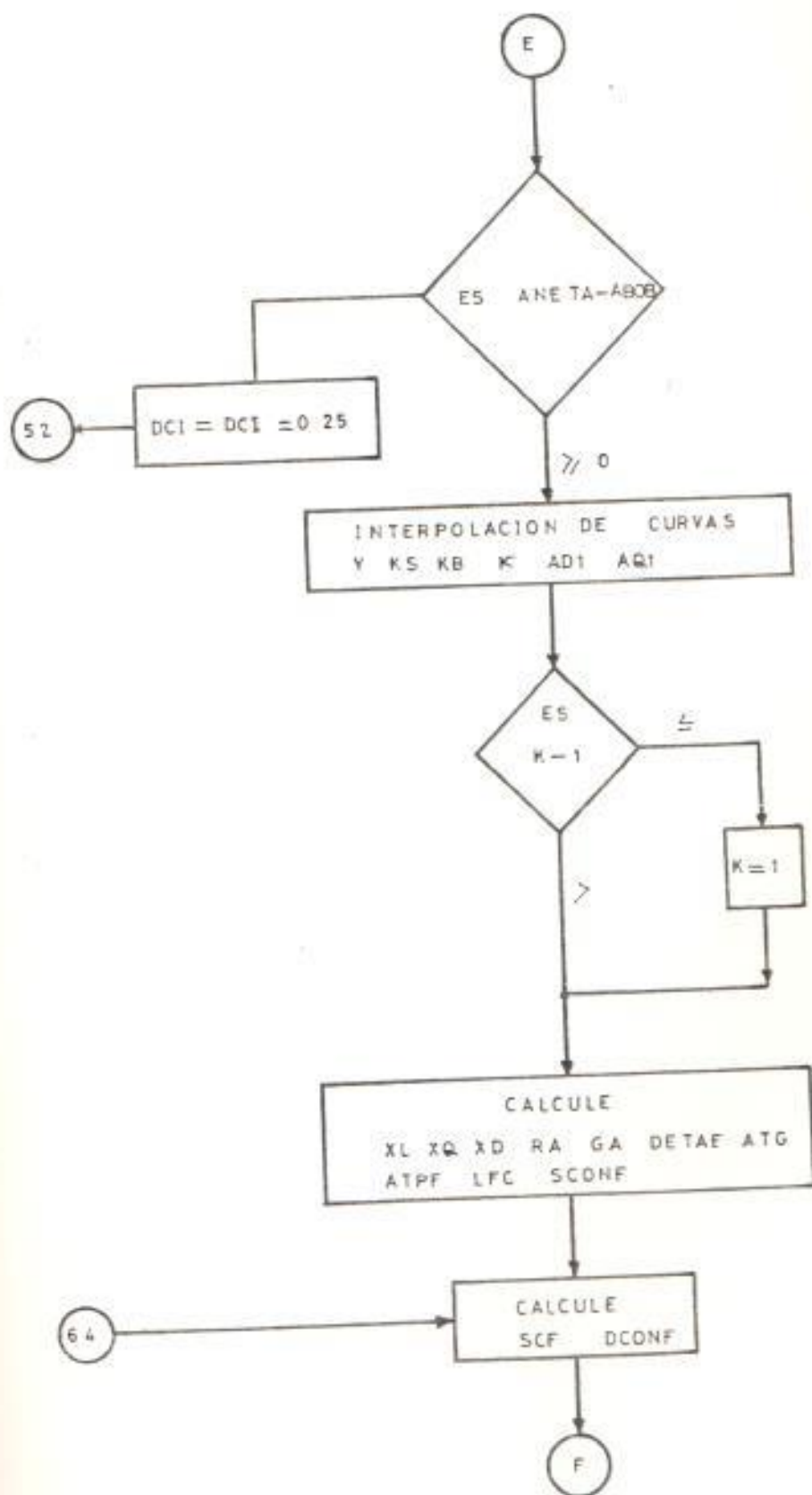












3.4. MANUAL DEL USUARIO

3.4.1. Nomenclatura

DATOS DE ENTRADA

SIMBOLO	DESCRIPCION
KVA	potencia de la máquina (kva)
FPN	factor de potencia nominal
VLL	voltaje terminal en voltios
F	frecuencia en hz
P	número de polos
A	número de circuitos en paralelo
DV	si hay devanado de jaula en las caras polares DV = 1 en caso contrario DV = 0
EF	voltaje de campo en voltios
NRA1	número de ranuras del estator
NCAT	número de canales transversales
DCAT	diámetro de canales transversales
NCL	número de canales longitudinales
DCL	diámetro de canales longitudinales

WT1	anchura del diente en la superficie del entrehierro en cm
HC	altura de la corona del estator en cm
LF	longitud del paquete de chapas
D1	diámetro interior del estator en cm
FRAN1	forma de ranura del estator = 1 si es rectangular = 0 si es trapezoidal y es = -1 si es trapezoidal con fondo redondo
D10,D11,D14	dimensiones de la ranura en cm
D15,W10,W11	dimensiones de la ranura cm
W13,R13,WD	dimensiones de la ranura en cm
L	longitud axial del polo en cm
WP	ancho del polo en dirección de la flecha en cm
HP	altura del polo en cm
DELTA	longitud mínima del entrehierro en cm

FCXD	factor de corrección de eje directo = 1 al inicio
FCXD	factor de corrección de eje en cuadratura = 1 al inicio
K1	factor de utilización obtener de la tabla 1.1
1W, ID	espacios para aislamiento de ranuras obtener de tabla 1.2 en cm
B2	extensión de la bobina de armadura obtener de la tabla 1.2 como 2B en cm
S	claros entre las bobinas obtener de la tabla 1.2 en cm
DCI	densidad de corriente asumida para el inducido en amp/mm ²
DCF	densidad de corriente asumida para el campo en amp/mm ²
FCA	factor de corriente alterna asumido = 1.15 a 1.30
RC	resistividad del cobre a 75°C igual a 2.11

FI	longitud de la cara polar en cm
PEB	paso entero de bobina (7,8, 9,10, etc)
PRB	paso recortado de bobina (4,5,6,7, etc)
DBD	densidad de flujo asumida en los dientes en gauss

3.4.2. Ejecución del Programa "RMS" en el Sistema 43/41

Para hacer uso de este programa es necesario realizar los siguientes pasos:

1) Entrar al sistema digitando el USER ID el PASSWORD asignado y definir memoria digitando los siguientes comandos:

- a) DEF STOR 2M
- b) Presionar la tecla ENTER
- c) I CMS
- d) Presionar la tecla ENTER
- c) PROFILE
- d) Presionar la tecla ENTER

2. Con el sistema listo para operar .

ingresar los datos de entrada de la siguiente manera:

a) Digitar X DRMS MAQUI

b) Presionar la tecla ENTER

c) Al realizar el paso "b" aparecerá en la pantalla el archivo de datos en el cual el usuario puede ingresar sus nuevos datos usando la modalidad del formato libre.

d) Digitar la palabra FILE y presionar ENTER

e) Al realizar el paso "d" los nuevos datos quedan grabados en el archivo DRMS MAQUI

3. Para ejecutar el programa RMS realizar los siguientes pasos

a) Compilar el programa digitando el comando COMPFOR RMS

b) Presionar la tecla ENTER

c) Al realizar el paso "3b" aparecerá en la pantalla un mensaje en el que se indica que se definan los archivos de

entrada y salida y el formato como realizar esto.

d) Digitar la palabra RMS y luego presionar ENTER.

e) Esperar hasta que termine la ejecución del programa la cual estará lista cuando salgan en la pantalla los resultados.

f) Para correr pantalla teclar ALPFB

4. Para lograr la impresión de los resultados realizar los siguientes pasos:

a) Llamar al archivo del directorio digitando el comando FLIST .

b) Buscar en el archivo RESULT RMS.

c) Digitar al lado derecho el comando PRINT y presionar ENTER.

CAPITULO IV

REDISEÑO DE UNA MÁQUINA SINCRONA

En el presente capítulo se realiza una aplicación práctica a la teoría descrita en los capítulos anteriores .

Con el propósito de verificar el método de cálculo empleado se realizan las respectivas pruebas en las que se determinan las características y parámetros de la máquina rediseñada . con los resultados obtenidos se procederá al reajuste de los valores teóricos respecto a los experimentales si el caso lo requiere.

4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA

4.1.1. Dimensiones del Circuito Magnético del Estator

Número de ranuras del estator (NRAN1) = 24

Forma de ranura (FRAN1) = trapezoidal

Número de canales transversales (NCAT) = 0

Número de canales longitudinales (NCL) = 0

Altura de la corona (HC) = 2.87 cm

Longitud del paquete de chapas (LF) = 6.54
cm.

Diámetro interior del estator (D1) = 12.18
cm

Longitud del entrehierro ($\frac{r}{\delta}$) = 0.08 cm

DIMENSIONES DE LA RANURA

W10 = 0.47 cm

D11 = 0.095 cm

D14 = 0.95 cm

W10 = 0.47 cm

W11 = 1.1 cm

W13 = 1.225 cm

D15 = 1.185 cm

W10 = 0.59 cm

4.1.2. Dimensiones del Circuito Magnético del Rotor

Ancho del polo (WP) = 5.47 cm

Longitud axial del polo (L) = 6 cm

Altura del polo desde el yugo (HP) = 2.38 cm

Anchura circular de la cara polar en la superficie del entrehierro = 11.78 cm.

Anchura recta de la cara polar (B) = 9.9 cm

4.1.3. Especificaciones Eléctricas de la Máquina

Voltaje terminal (VLL) = 220 voltios

Frecuencia (F) = 60 hz
Número de polos (P) = 2
Factor de potencia (FP) = 0.8
Voltaje del campo (EF) = 48 voltios
Potencia (KVA) = 2.5 kva
Número de fases (M) = 3

4.1.4. Especificaciones de los Devanados

Tipo de conexión de los devanados = estrella
serie
Paso entero de bobina (PE) = 12
Paso recortado de bobina (PR) = 8
Tipo de aislamiento = clase F
Número de circuitos en paralelo (A) = 1

4.1.5. Curvas y Tablas

Los datos obtenidos de tablas para el rediseño son:
Espacio del aislante ancho (IW) = 0.152 cm
Espacio que ocupa el aislante en profundidad (ID) = 0.81 cm
Factor de corrección entre laminas (K1) = 0.93
Densidad de corriente asumida en el estator (DCI) = 5 amp/mm²

Densidad de corriente asumida en el campo
(DCF) = 4.75 amp/mm^2

Factor de corriente alterna (FCA) = 1.15

Densidad de flujo en los dientes (DBD) =
15500 gauss.

Los datos descritos en los numerales 4.1.1., 4.1.2., 4.1.3., 4.1.4., 4.1.5. se almacenan en un archivo de datos denominado "DRMS MAQUI" en el orden que indica el diagrama de flujo y siguiendo el manual del usuario.

4.2. CALCULO EXPERIMENTAL DE PARAMETROS Y PERDIDAS DE LA MAQUINA REDISENADA

4.2.1. Resistencia de los Devanados

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.1.1 y 2.8.1.2 se obtienen los resultados tabulados en la tabla 4.1 .

Tabla 4.1

RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

temperatura T	resistencia del inducido (ohmios/fase)	resistencia del campo (ohmios)
30	0.99	18.35
75	1.16	21.47

4.2.2. Prueba de Vacío

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.2 se obtienen los resultados que se resumen en la tabla 4.2. Graficando estos resultados se obtiene la característica de vacío y la característica de pérdidas en el núcleo cuyos gráficos se ilustran en las figuras 4.1, 4.2 y el oscilograma de voltaje en el anexo B, figura B.1

Tabla 4.2

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VACÍO

I _f (amperios)	VLL (volts)	Potencia de entrada a la MDC durante la prueba (vatios)	Potencia de entrada a la MDC antes de la prueba en (vatios)	Pérdidas en el núcleo (vatios)
0	7.25	523.39	523.39	0
0.1	42.28	523.39		0
0.2	78.19	524.81		1.42
0.3	111.4	526.69		3.7
0.4	141.9	530.99		7.0
0.5	172	533.87		10.5
0.6	201.3	538.64		15.25
0.7	223	546.3		22.91
0.8	240	551.35		27.97
1	266	563.26		39

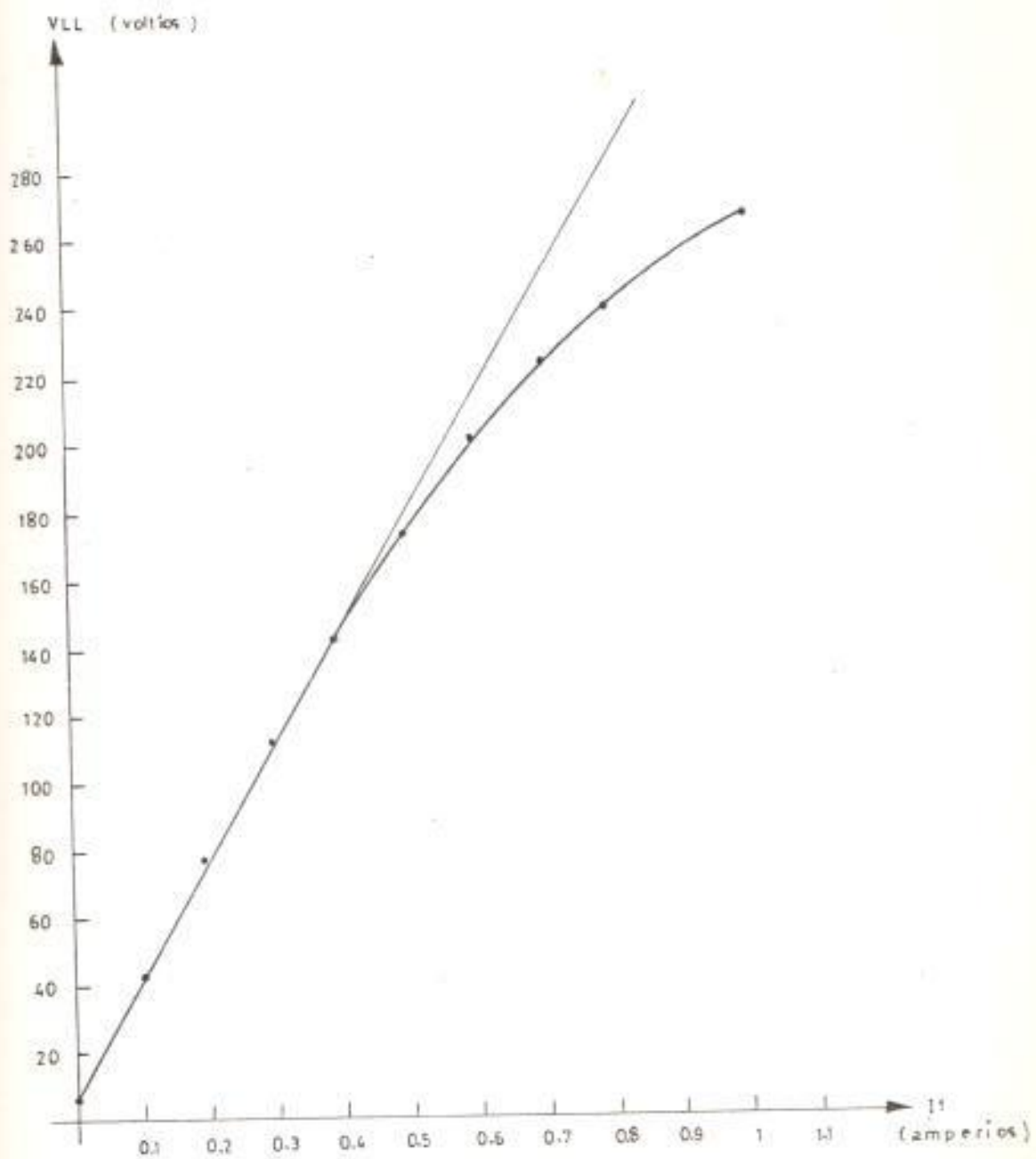


Fig: 4.1 CARACTERISTICA DE VACIO

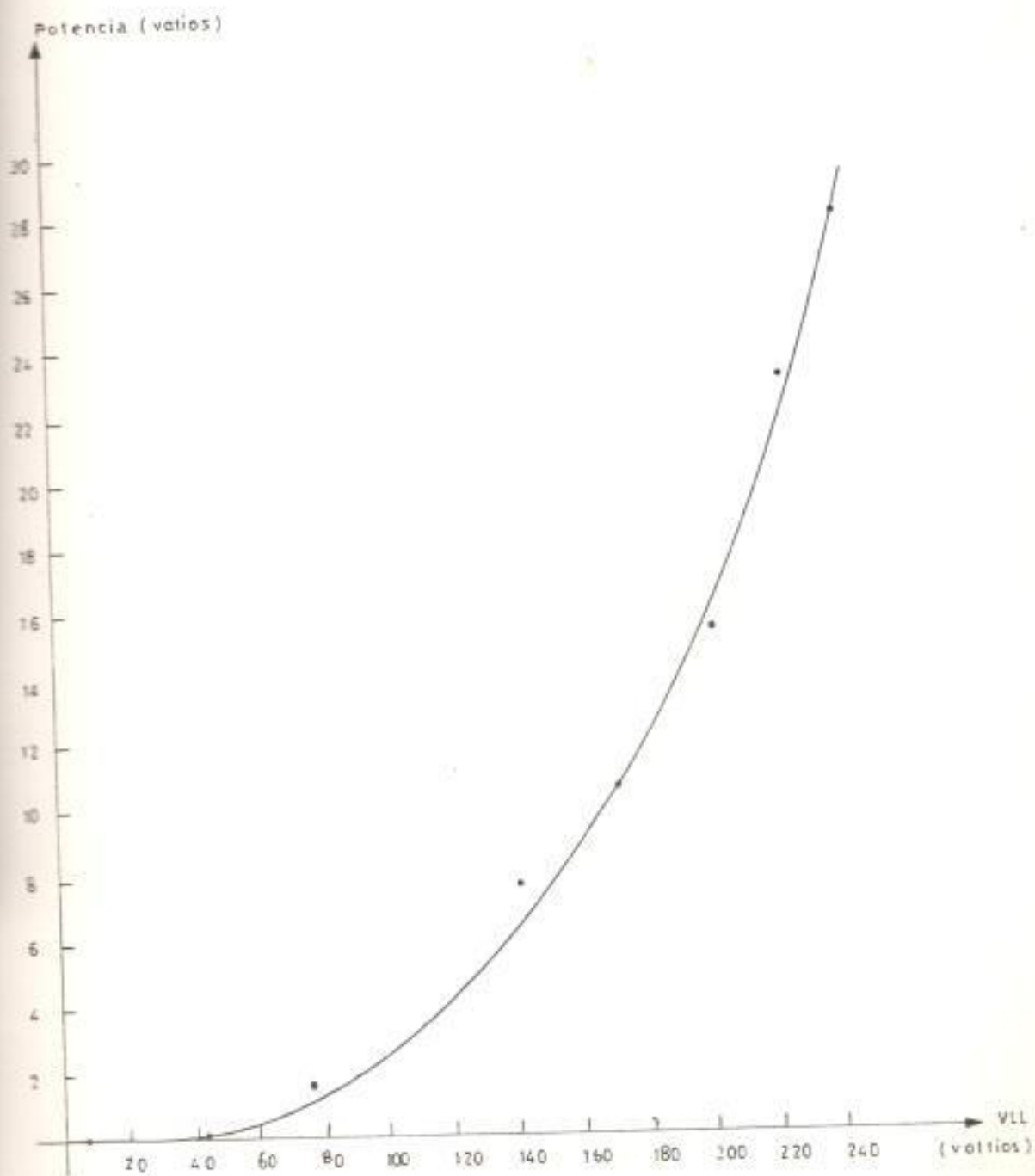


Fig: 4.2 PERDIDAS DEL NUCLEO EN VACIO

la corriente de campo I_f necesaria para generar 220 voltios , en la recta del entrehierro $I_f = 0.61$ y en la curva de saturación $I_f = 0.69$ amperios.

4.2.3. Prueba de Cortocircuito

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.3. se obtienen los resultados que se tabulan en la tabla # 4.3 .

Tabla 4.3

RESULTADOS DE LA CARACTERISTICA DE CORTOCIRCUITO

I_f (amperios)	I_a (amperios)	potencia de entrada a la MDC durante la prueba (vatios)	potencia de entrada a la MDC antes de la prueba (vatios)	perdidas en carga (vatios)
0	0	524.91	523.39	1.52
0.2	1.2	529.33		5.94
0.4	2.1	538.48		15.09
0.6	3.2	557.39		34
0.8	4.1	579.29		55.9
1	5	607.71		84.32
1.2	6	661.39		122
1.4	7	691.3		168
1.6	7.8	733.39		210
2	10	856		333

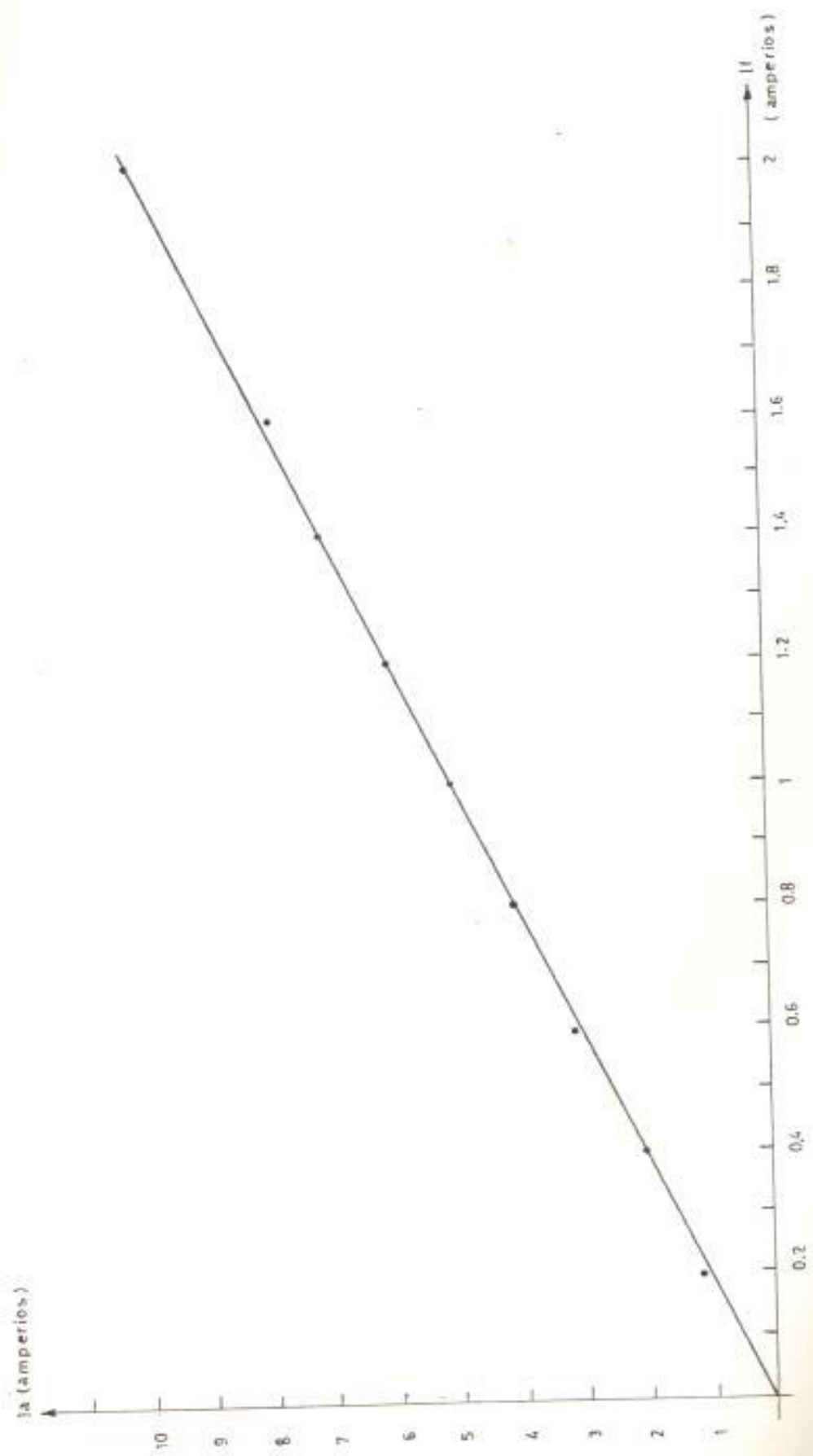


Fig: .43 CARACTERISTICA DE CORTOCIRCUITO

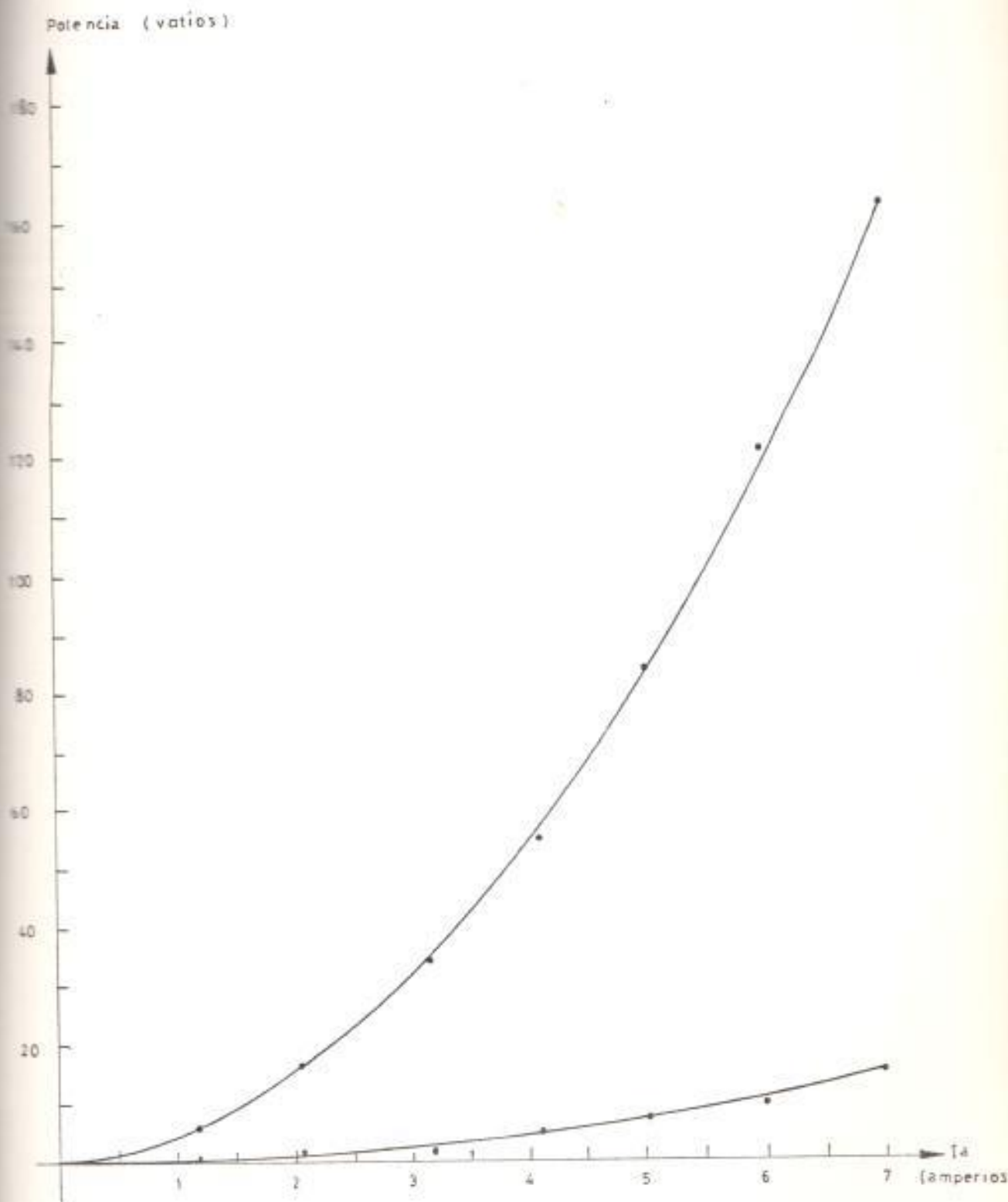


Fig. 4.4 PERDIDAS EN CARGA

Con los datos que se ilustran en la tabla 4.3 se obtiene la característica de cortocircuito y las pérdidas de la máquina en carga. Los gráficos correspondientes a esta prueba se muestran en las figuras 4.3 y 4.4.

En el gráfico de la figura 4.3, se determina que la corriente de campo $I_f = 0.69$ amperios produce una corriente de armadura $I_a = 3.5$ amperios.

Con los datos obtenidos en la característica de vacío y cortocircuito se calcula la reactancia de eje directo (X_D).

$$X_D = \frac{220/1.732}{3.5} = 36.29 \text{ ohms/fase.}$$

4.2.4. Característica de Factor de Potencia Cero

Con el procedimiento descrito el numeral 2.8.4, se realiza la prueba de factor potencia cero cuyos resultados se muestran en la tabla 4.4. Al graficar estos resultados se obtiene el gráfico de la figura 4.5 sobre la cual se muestra la

construcción para determinar la reactancia de dispersión .

Para efectos de construcción es necesario graficar sobre el mismo papel la característica de vacío y factor de potencia cero.

Tabla 4.4

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA CERO

I_4 (amperios)	V_{LI} (voltios)	I_a (amperios)
0.69	34	3.2
0.72	44	
0.76	60	
0.88	90	
0.97	120	
1.07	151	
1.24	200	
1.37	223	

Al realizar la construcción del triángulo de Potier en la figura 4.5 se obtiene el valor de voltaje con el cual se determina la

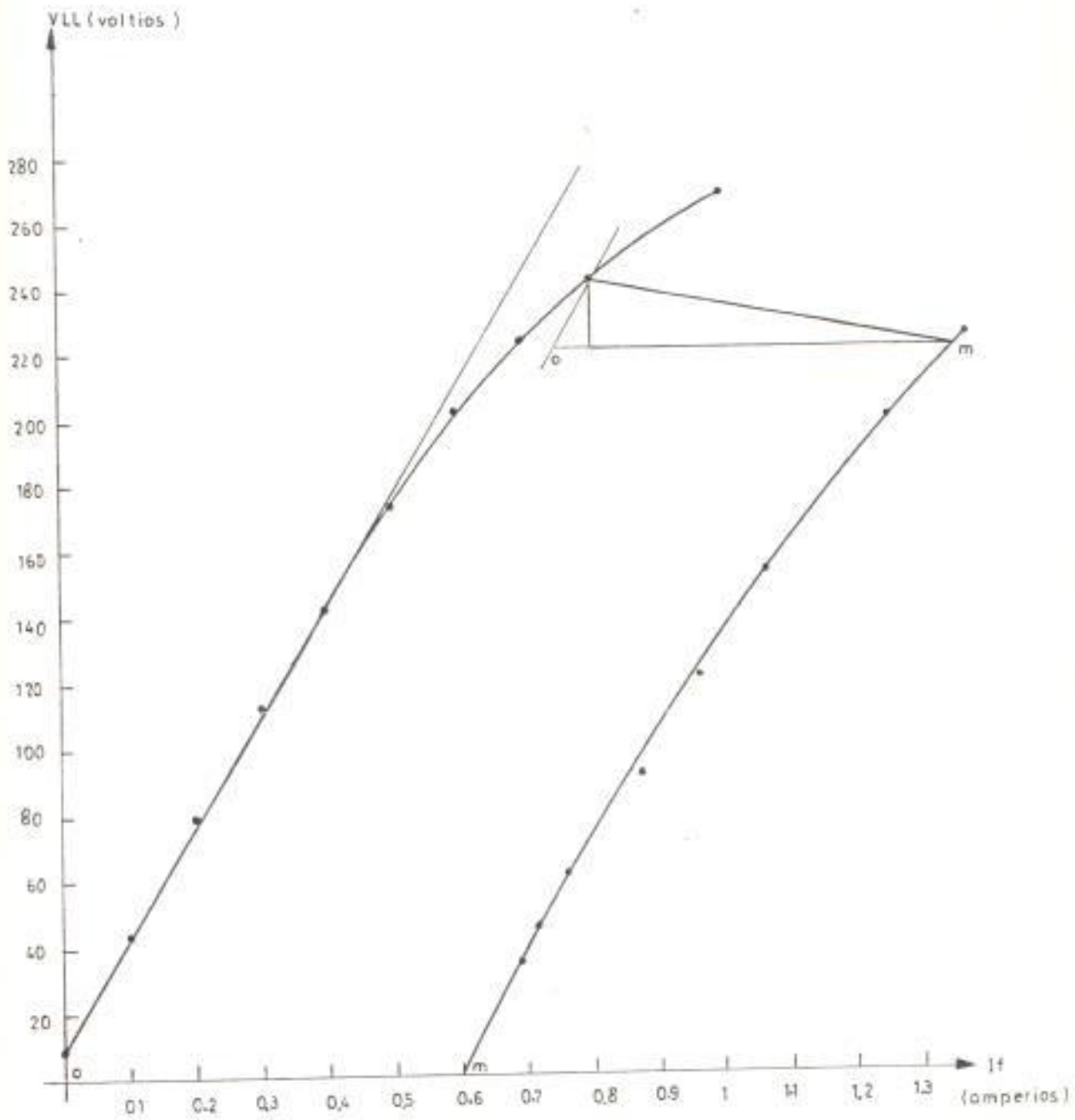


Fig: 4.5 CARACTERISTICA DE FACTOR DE POTENCIA CERO Y TRIANGULO DE POTIER

reactancia de dispersión.

$$X_L = \frac{20/1.732}{3.2} = 3.6 \text{ ohmios/fase}$$

4.2.5. Prueba de Deslizamiento

Realizando la prueba con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.5. se obtienen los oscilogramas de voltaje y corriente los mismos que se muestran en el anexo B figura B.2 de los cuales se extrae los siguientes datos con los que se calcula la reactancia de eje directo y eje en cuadratura.

$$\begin{aligned} V_{\max} &= 220 \text{ voltios} & V_{\minimo} &= 220 \text{ voltios} \\ I_{\max} &= 8.5 \text{ amperios} & I_{\minimo} &= 3.6 \text{ amperios} \end{aligned}$$

$$X_D = \frac{220/1.732}{3.6} = 35.26 \text{ ohmios/fase}$$

$$X_Q = \frac{220/1.732}{8.5} = 15 \text{ ohmios/fase}$$

4.2.6. Prueba de Corto Circuito Repentino

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.6 se obtienen los resultados que se requieren para calcular la reactancia transiente X_d' , reactancia subtransiente

X_d'' y reactancia de eje directo X_D .

estado subtransitorio $I'' = 86$ amperios

estado transitorio $I' = 40$ amp

estado estable $I = 3.6$ amperios

$$220/1.732$$

$$X_d'' = \frac{220/1.732}{86/1.41} = 2.08 \text{ ohmios /fase}$$

$$X_d' = \frac{220/1.732}{40/1.41} = 4.49 \text{ ohmios/fase}$$

$$X_D = \frac{220/1.732}{3.6} = 35.28 \text{ ohmios/fase}$$

El oscilograma de corriente de esta prueba se ilustra en el anexo B, figura B.3

4.2.7. Reactancia de Secuencia Negativa

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.7 se obtienen los resultados para el cálculo de la reactancia de secuencia negativa (X_2).

$$P = 415 \text{ vatios}$$

$$E = 115.35 \text{ voltios}$$

$$I = 4.6 \text{ amperios}$$

$$\cos\theta = 0.7712$$

$$X_2 = \frac{116.35/1.732}{4.6} \times 0.7712 = 11.20 \text{ ohmios}$$

4.2.8. Reactancia de Secuencia Cero

Realizada la prueba siguiendo las instrucciones del numeral 2.8.8 se obtienen los siguientes resultados :

$$P = 86.33 \text{ vatios}$$

$$E = 6.16 \text{ voltios}$$

$$\text{sen}\theta = 0.4649$$

$$X_0 = \frac{3 \times 6.16}{15.83} \times 0.4649 = 0.54 \text{ ohmios/fase}$$

4.2.9. CARACTERISTICA EXTERNA

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.9, se procede a realizar la prueba para obtener la característica externa. Los resultados obtenidos son tabulados en la tabla # 4.5. El gráfico correspondiente a esta prueba es el que se ilustra en la figura # 4.6. Con la finalidad de analizar el comportamiento de esta característica se dibujan sobre el mismo plano para las tres diferentes condiciones de carga.

Tabla 4.5

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA
CARACTERISTICA EXTERNA

factor de potencia (FP) = 1		factor de potencia (FP) = 0.8 adelantado		factor de potencia (FP) = 0.8 atrasado	
Ia (amperios)	VLL (voltios)	Ia (amperios)	VLL (voltios)	Ia (amperios)	VLL (voltios)
0	220	0	220	0	220
0.9	213	1.12	235	1.12	204
1.7	202	2.12	245.4	2.12	125
2.2	186.7	2.75	230	2.75	74.6
2.8	167.9	3.5	200.9	3.5	33.9
3.1	151	4.12	158.2		
3.4	120.3	4.38	105		

4.2.10. Característica de Regulación

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.10. se realiza la prueba para obtener la característica de regulación de la máquina rediseñada, los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 4.6.

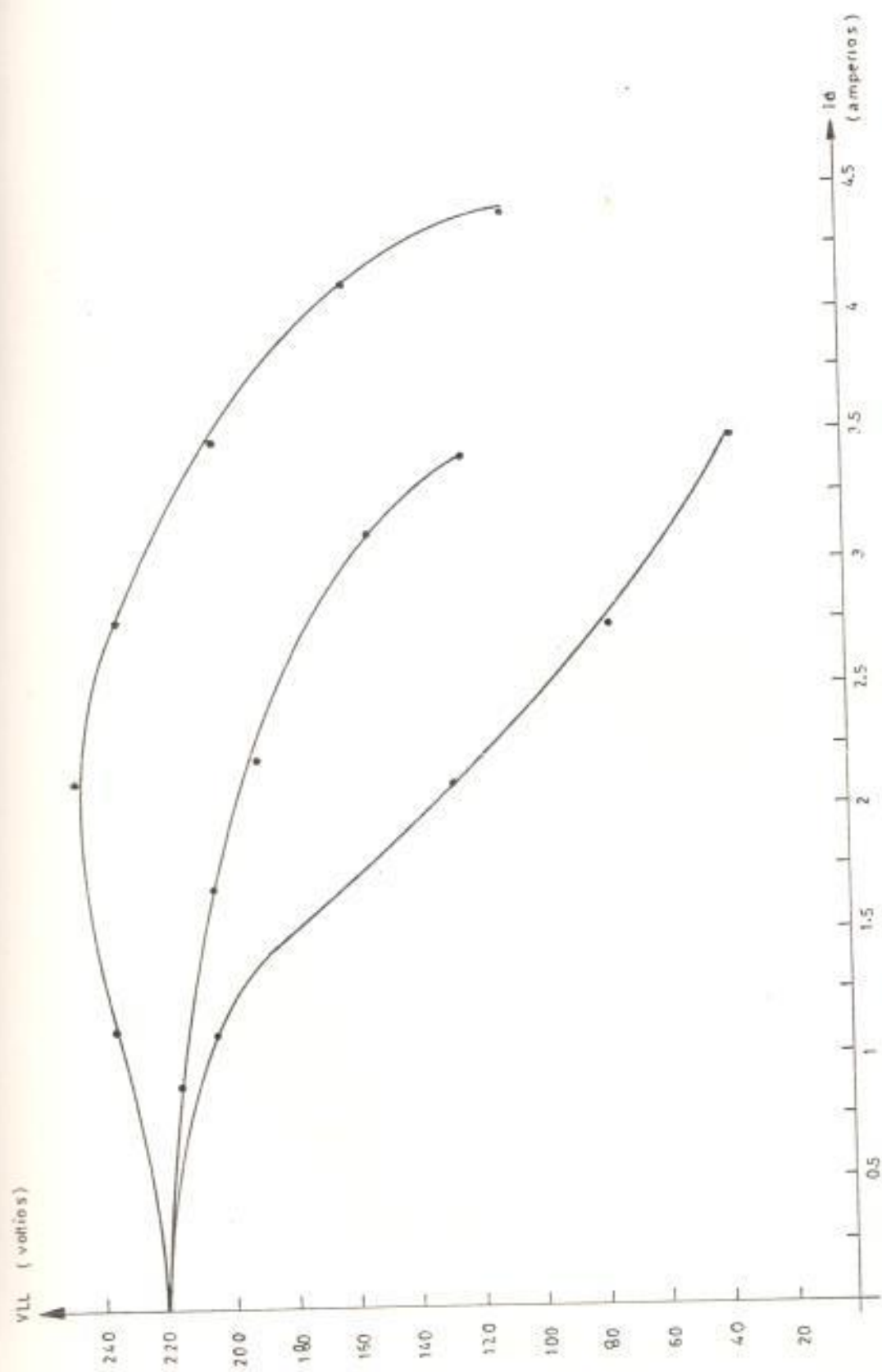


Fig: 4.5 CARACTERISTICA EXTERNA

Tabla 4.6

RESULTADOS OBTENIDOS AL REALIZAR LA PRUEBA
CARACTERISTICA DE REGULACION

factor de potencia = 1		factor de potencia = 0.8 atrasado		factor de potencia 0.8 adelantado	
Ia (amperios)	If (amperios)	Ia (amperios)	If (amperios)	Ia (amperios)	If (amperios)
0	0.69	0	0.69	0	0.69
0.9	0.73	1.12	1	1.12	0.51
1.8	0.73	2.25	1.49	2.25	0.53
2.5	0.86	3.13	1.79	3.13	0.57
3.4	0.97	4.25	2.24	4.25	0.65
4	1.1	5.2	2.5	5.2	0.72
5	1.23	6.25	3	6.13	0.81
6.3	1.38			7.88	0.91
7	1.5				

El gráfico correspondiente a la característica de regulación para las tres condiciones de carga se ilustra en la figura 4.7 .

4.2.11. Curvas "V" del Motor Sincrónico

Con el procedimiento descrito en el numeral 2.8.11 se realiza la prueba y se obtienen

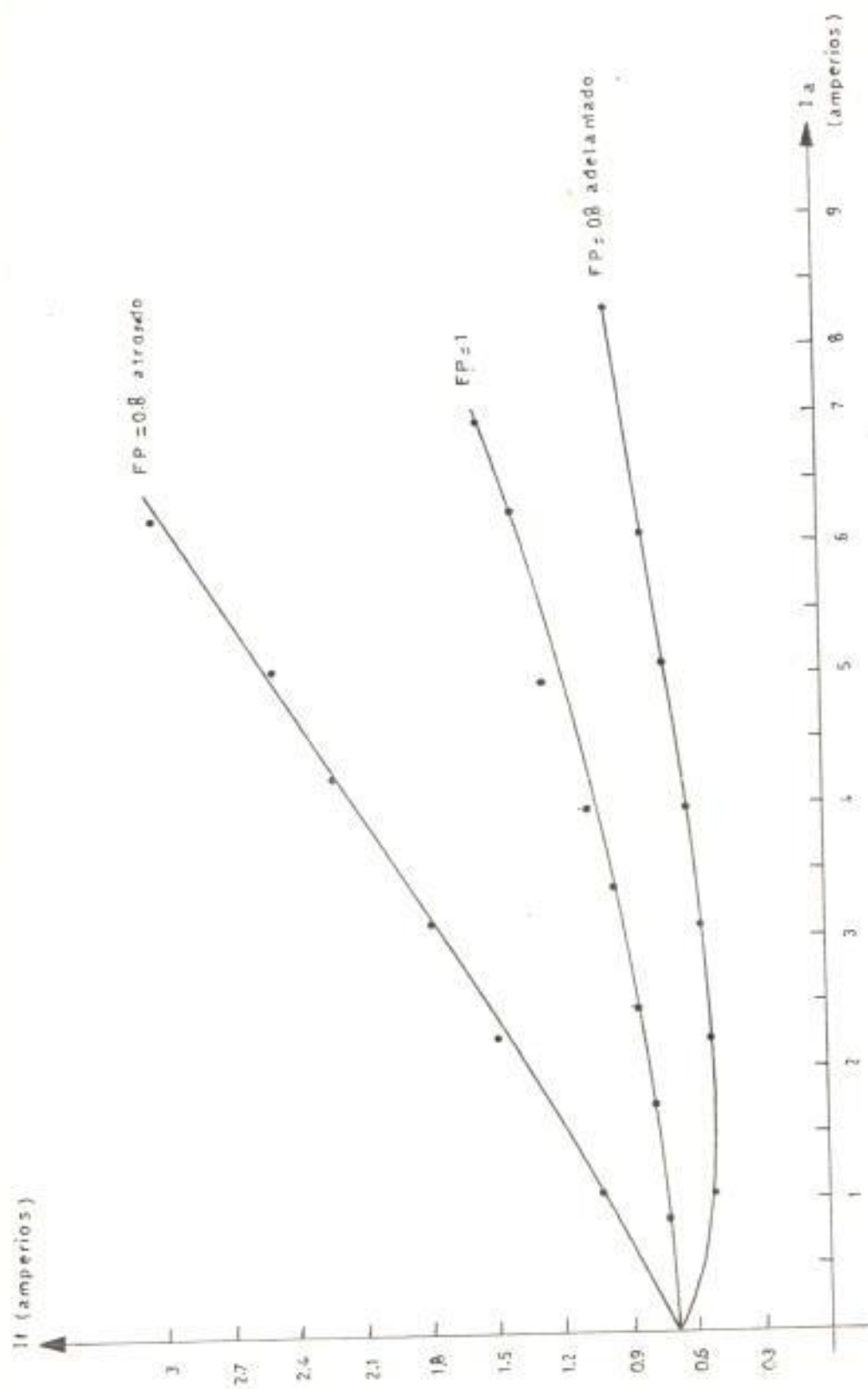


Fig: 4.7 CARACTERÍSTICA DE REGULACION

los datos que se tabulan en la tabla 4.7 .

Tabla 4.7
 RESULTADOS AL REALIZAR LAS PRUEBAS PARA
 OBTENER LAS CURVAS "V" DEL MOTOR SINCRONO

primera condicion de carga		segunda condicion de carga	
corriente de campo If (amperios)	corriente de armadura Ia (amperios)	corriente de campo If (amperios)	corriente de armadura Ia (amperios)
2	5.2	3.13	11
1.85	2.88	2.88	10.2
1.57	4.3	2.71	9.6
1.37	3.4	2.36	8
1.07	2.36	1.75	6
0.85	1.8	1.28	4.7
0.54	2	0.86	4.8
0.41	2.4	0.71	5.4
0.2	3.2	0.68	5.5
0.16	3.5	0.60	6.5

El comportamiento de la máquina al realizar esta prueba se ilustra en la figura 4.8 .

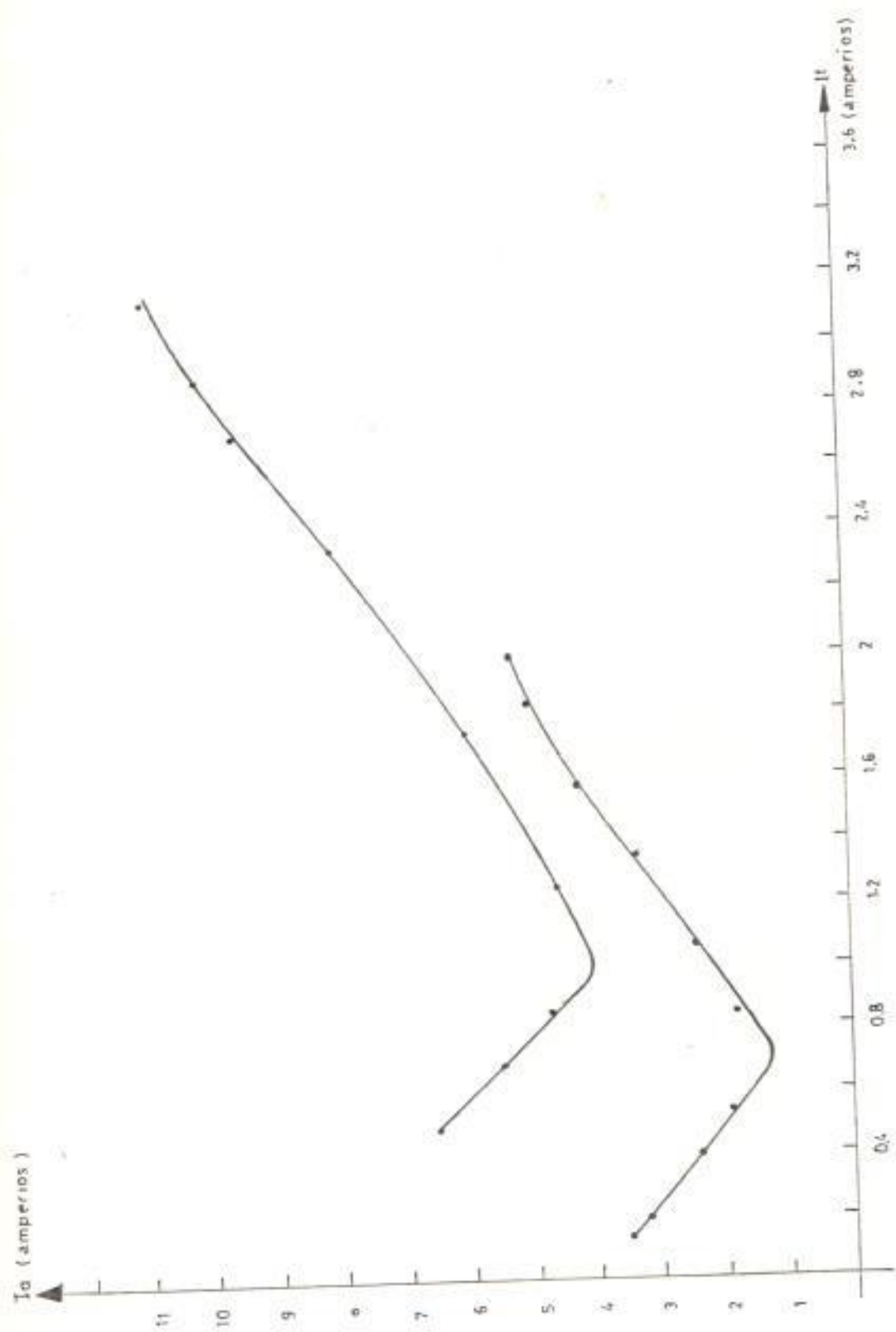


Fig: 4-8 CURVAS "V" DEL MOTOR SINCRONICO

4.2.12. Pérdidas y eficiencia

Las pérdidas de la máquina síncrona en vacío y con carga se determinan siguiendo el procedimiento descrito en los numerales 2.8.2 , 2.8.3 y midiendo la potencia de entrada al primomotor antes del acople con la máquina rediseñada. Siguiendo este procedimiento y utilizando los gráficos 4.2, 4.4 junto con la característica de regulación se procede a calcular las pérdidas y la eficiencia de la máquina rediseñada.

Potencia de entrada a la máquina DC sin acoplar a la máquina rediseñada $PMDC = 470$ vatios.

Potencia de entrada a la máquina DC acoplada a la máquina rediseñada $PMDCA = 523.39$ vatios.

Las pérdidas por ventilación y fricción serán:

$$P_f + v = PMDCA - PMDC = 523.39 - 470 = 53.39 \text{ vatios.}$$

Pérdidas totales 247 vatios
Potencia de salida 1981.4 vatios
Eficiencia = 89 %

FACTOR DE POTENCIA 0.8 EN ATRASO

De la curva de regulación $I_f = 2$ amperios
 $I_a = 4$ amperios , 220 voltios
Pérdidas por cargas dispersas = 5 vatios
Pérdidas en el cobre del inducido = 55.8
vatios
Pérdidas en el cobre del devanado del campo
= 85.88
Pérdidas totales = 220.57 vatios
Potencia de salida 1219.32
eficiencia 85 % .

4.3. CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Con los datos obtenidos al realizar las pruebas a la máquina rediseñada se elabora la tabla 4.8 la misma que proporciona los datos de funcionamiento de la máquina para las condiciones de carga: factor de potencia 0.8 atrasado, factor de potencia unitario y 0.8 adelantado.

Tabla 4.8

DATOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA REDISENADA

FP	VLL (vol- tios)	Ia (ampe- rios)	If (ampe- rios)	potencia (vatios)	eficiencia %
unitario	220	6.5	1.41	2476	90
0.8 atraza- do	220	4	2	1219	85
0.8 ade-	220	6.5	0.81	1980	89

4.4. PARAMETROS DE LA MAQUINA REDISENADA

Los parámetros obtenidos al realizar los cálculos experimentales se tabulan en la tabla 4.9 .

Tabla 4.9

PARAMETROS DE LA MAQUINA REDISENADA

parámetros	ohmios/fase
XD	35.28
XQ	15
X2	11.20
Xd"	2.08
Xd'	4.49
X0	0.54

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. La aplicación práctica de este trabajo se realizó en los talleres y laboratorios de la ESPOL, lo que permitió un acabado completo en la parte eléctrica y mecánica de la máquina rediseñada. Con el trabajo realizado en esta tesis se demuestra que es posible realizar en la ESPOL y en la Industria en nuestro medio trabajos de rediseño de devanados para máquinas de este tipo.
2. El criterio de rediseño basado en la densidad de flujo en los dientes del estator de la máquina para calcular el número de espiras y densidad de corriente para calcular la sección del alambre ha permitido obtener un buen rediseño de los devanados cuando la máquina trabaja con factor de potencia unitario y 0.8 adelantado. Para factor de potencia 0.8 atrasado la máquina no presenta las características para la cual fue rediseñada, se puede corregir este inconveniente incrementando la densidad de flujo asumida en los dientes.

3. La máquina rediseñada después de haber sido sometida a pruebas experimentales se han obtenido los siguientes resultados.

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

FACTOR DE POTENCIA UNITARIO

- Voltaje terminal (VLL) = 220 voltios
- Corriente de campo (I_f) = 1.41 amperios
- Corriente de armadura (I_a) = 6.5 amperios
- Potencia de salida = 2476 vatios
- Eficiencia = 90 %

FACTOR DE POTENCIA 0.8 ADELANTADO

- Voltaje terminal (VLL) = 220 voltios
- Corriente de campo (I_f) = 0.81 amperios
- Corriente de armadura (I_a) = 6.5 amperios
- Potencia de salida = 1980 vatios
- Eficiencia = 89 %

PARAMETROS DE LA MAQUINA REDISEÑADA

- Reactancia en eje directo (X_D) = 35.28 ohmios/fase
- Reactancia de eje en cuadratura (X_Q) = 15 ohmios/fase
- Resistencia del campo (R_f) = 21.47 ohmios
- Resistencia de armadura (R_a) = 1.15 ohmios/fase
- Reactancia de secuencia negativa (X_2) = 11.20 ohmios/fase.

4. El trabajo de rediseño se aplicó a un núcleo

magnético de una máquina síncrona de polos salientes monofásica la misma que se rediseñó como trifásica dando buenos resultados cuando la máquina trabaja con factor de potencia la unidad y factor de potencia en adelanto.

Se muestran los elementos constitutivos de la máquina sin los devanados, en la figura A.1, en la figura A.2 se muestra ya con los devanados confeccionados y en la figura A.3 se muestra acoplada a un dinamómetro lista para ser sometida a pruebas.

RECOMENDACIONES

1. Cuando se realiza un trabajo de rediseño primero es necesario verificar que las partes que conforman la estructura de la máquina se encuentren en perfecto estado, principalmente los núcleos magnéticos.
2. Para efectos de exactitud en el cálculo de parámetros y características de funcionamiento, se recomienda tomar las dimensiones del núcleo de la máquina con equipo de medición de alta precisión.
3. Para verificar si la máquina rediseñada cumple satisfactoriamente las características para la cual fué rediseñada el equipo de medición durante las pruebas de laboratorio debe estar correctamente calibrado y en perfectas condiciones.
4. Se recomienda seguir el presente trabajo para poder aplicar a máquinas síncronas trifásicas de rotor cilíndrico.
5. Los efectos causados por el movimiento del rotor en máquinas que giran a alta velocidad tales como ruido y vibración pueden ser resueltos verificando balanceamiento, alineamiento del eje y el tipo del rodamiento así como el estado del mismo.

BIBLIOGRAFIA

1. KULMAN J., "DISEÑO DE APARATOS ELECTRICOS", CONTINENTAL, MEXICO, 1980, 151 pag.
2. LANGSDORF A., "THEORY OF ALTERNATING CURRENT MACHINERY", MCGRAW-HILL, NEW YORK, 1955, 388 pag.
3. LIWSCHITZ Y WHIPPLE C., "MADUINAS DE CORRIENTE ALTERNA", CONTINENTAL, MEXICO, 342 pag.
4. RAMIREZ J., "ESQUEMA DE ROBINADOS DE CORRIENTE ALTERNA", CEAC, ESPANA, 66 pag.
5. STILL A. Y SISKIND C., "ELEMENTOS DE DISEÑO DE MAQUINAS ELECTRICAS", CONTINENTAL, MEXICO, 1972, 445 pag.
6. "TEST PROCEDURES FOR SYNCHRONOUS MACHINES", IEEE, N 115, MAR. 1965
7. TORO G. "REDISENO DEL DEVANADO DEL ESTATOR EN MOTORES DE INDUCCION TRIFASICA JAULA DE ARDILLA" (Tesis Facultad de Ingenieria Eléctrica, ESPOL, 1986)