

Liliana O
16/12/17

NOMBRE

03 SEP 2018

Liliana O.



19/11/2015

Ing. María José Alvarado
DEPARTAMENTO DE ACTIVOS FIJOS - CIB



T
621.3132
T693

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GENERADOR MODELO
PARA SER USADO CON ENERGIA EOLICA".

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR :

SIXTO TORRES CEPEDA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1983



A G R A D E C I M I E N T O

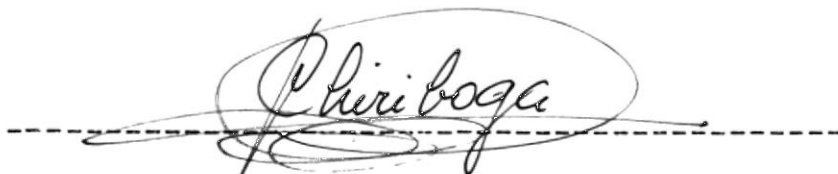
AL ING. JORGE CHIRIBOGA V.,
DIRECTOR DE TESIS, POR SU
AYUDA Y COLABORACION PARA
LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

AL ING. MARCO PAZMIÑO B., -
POR SU AYUDA PRESTADA .-

D E D I C A T O R I A

- A MIS PADRES

- A MIS HERMANOS



ING. JORGE CHIRIBOGA V.

DIRECTOR DE TESIS

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 EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).

Sixto Torres C.

SIXTO TORRES CEPEDA

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto el diseño y - construcción de un generador de corriente directa, a partir de un generador convencional de fácil adquisición, en el mercado.

Las características de operación de dicho generador, serán previamente determinadas, de modo tal que sea posible su utilización mediante la conversión de - energía eólica a eléctrica.

Con el propósito de comprobar experimentalmente las características para las cuales será diseñado, se - realizarán pruebas de laboratorio y se determinarán las principales características de su funcionamiento.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VII
INDICE DE ABREVIATURAS -----	XI
INTRODUCCION -----	17
CAPITULO I	
GENERALIDADES -----	20
1.1. INTRODUCCION -----	20
1.2. LEY DEL CIRCUITO DE CAMPO MAGNETICO --	20
1.2.1. El circuito magnético del gene- rador -----	24
1.3. LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA-----	27
1.3.1. La fuerza electromotriz del ge- nerador -----	30
CAPITULO II	
DEVANADOS -----	35
2.1. INTRODUCCION -----	35
2.2. DEVANADOS DE CAMPO -----	35
2.3. DEVANADO DE INDUCIDO (ARMADURA)-----	36

VIII

PAGS

2.3.1. Devanado imbricado -----	37
2.3.1.1. Pasos del devanado imbricado -----	38
2.3.1.2. Condiciones de simetría del devanado imbricado--	41
2.3.2. Devanado Ondulado -----	44
2.3.2.1. Pasos del devanado ondulado -----	44
2.3.2.2. Condiciones de simetría del devanado ondulado---	46
CAPITULO III	
DISEÑO DEL GENERADOR -----	47
3.1. INTRODUCCION -----	47
3.2. DISEÑO DEL DEVANADO DE INDUCIDO -----	48
3.2.1. Pasos del devanado -----	48
3.2.2. Longitud de la espira media -----	54
3.2.3. Sección del conductor -----	56
3.2.4. Flujo por polo -----	58
3.2.5. Número total de conductores -----	61
3.2.6. Número de conductores por ranura-----	63
3.2.7. Resistencia del devanado de inducido -----	64
3.2.8. Peso del devanado de inducido-----	65

3.3. DISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO--	66
3.3.1. Longitud de la espira media ----	67
3.3.2. Sección del conductor -----	69
3.3.3. Número de espiras por polo -----	73
3.3.4. Resistencia del devanado de cam <u>p</u> po derivado -----	74
3.3.5. Peso del devanado de campo deri- vado -----	75
3.4. DISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO SERIE ----	77
3.4.1. Longitud del espira media -----	77
3.4.2. Sección del conductor -----	78
3.4.3. Número de espiras por polo -----	80
3.4.4. Resistencia del devanado de cam <u>p</u> po serie -----	81
3.4.5. Peso del devanado de campo serie	82
CAPITULO IV	
CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO -----	84
4.1. INTRODUCCION -----	84
4.2. CARACTERISTICA EN VACIO -----	84
4.3. CARACTERISTICA EN CARGA -----	89
4.3.1. Característica externa -----	93
4.3.2. Curva de regulación -----	98

	<u>PAGS.</u>
4.4. PERDIDAS Y RENDIMIENTO -----	101
4.4.1. Pérdidas por rozamiento de los <u>co</u> <u>jinetes</u> -----	101
4.4.2. Pérdidas por rozamiento de las <u>es</u> <u>cobillas</u> -----	104
4.4.3. Pérdidas por histéresis -----	106
4.4.4. Pérdidas por corrientes de Eddy -	108
4.4.5. Pérdidas por efecto Joule en el - devanado de inducido -----	110
4.4.6. Pérdidas por efecto Joule en el circuito de campo derivado -----	111
4.4.7. Pérdidas por efecto Joule en el devanado de campo serie -----	112
4.4.8. Pérdidas por contacto de las <u>esco</u> <u>billas</u> -----	113
4.4.9. Rendimiento -----	115
4.5. LA REGULACION AUTOMATICA DEL VOLTAJE ---	116
4.5.1. Oscilogramas -----	122
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	 125
APENDICES-----	127
ANEXOS -----	144
BIBLIOGRAFIA -----	146

INDICE DE ABREVIATURAS

a	:	Número de circuitos en paralelo
A	:	Sección transversal
A_f	:	Densidad de corriente del campo derivado
A_g	:	Area del entrehierro
A_i	:	Densidad de corriente en el conductor del inducido
A_s	:	Densidad de corriente del campo serie
A_v	:	Amperio - vueltas
ATP_f	:	Amperio - vueltas por polo del devanado de campo derivado
ATP_s	:	Amperio - vueltas por polo del devanado de campo serie
b	:	Extensión de la bobina
B	:	Número de elementos
B	:	Densidad de flujo
$B_{m\acute{a}x}$:	Densidad de flujo máxima
C	:	Número de delgas del colector
C_1	:	Constante de diseño
d_c	:	Diámetro del muñón
d_l	:	Elemento de longitud
d_s	:	Profundidad de la ranura
D	:	Diámetro del núcleo del inducido



D_f	:	Ancho de la bobina de campo derivado
D_k	:	Diámetro del colector
D_s	:	Ancho de la bobina de campo serie
e	:	Fuerza electromotriz inducida
E	:	Fuerza electromotriz inducida en el devanado de inducido
E_o	:	Tensión terminal en vacío
E_f	:	Valor eficaz de la fuerza electromotriz inducida
f	:	Frecuencia
F_e	:	Presión específica de las escobillas
H	:	Intensidad de campo magnético
I	:	Corriente de carga nominal
I_f	:	Corriente de campo derivado
I_i	:	Corriente de inducido
I_L	:	Corriente de carga
I_s	:	Corriente de campo serie
K	:	Número de ranuras
K_e	:	Coefficiente de Eddy
K_h	:	Coefficiente de histéresis
K_s	:	Factor de corrección del paso de bobinas
l_c	:	Longitud del cojinete
l_g	:	Longitud del entrehierro
L	:	Longitud del núcleo del inducido
L_1	:	Longitud axial del polo

XIII

LMF :	Longitud de la espira media de una bobina de campo derivado.
LMI :	Longitud de la mitad de la espira media de una bobina de inducido.
LMS :	Longitud de la espira media de una bobina de campo serie.
n :	Velocidad de rotación
N :	Número de espiras en serie entre escobillas de distinta polaridad
NI :	Amperio - vueltas
P :	Número de polos
P _{ce} :	Pérdidas por contacto de las escobillas
P _e :	Pérdidas por corrientes de Eddy
P _h :	Pérdidas por histéresis
P _{jc} :	Pérdidas por efecto Joule en el circuito de campo derivado
P _{ji} :	Pérdidas por efecto Joule en el devanado de inducido.
P _{js} :	Pérdidas por efecto Joule en el devanado de campo serie
P _{rc} :	Pérdidas por rozamiento de los cojinetes
P _{re} :	Pérdidas por rozamiento de las escobillas
P _{salida} :	Potencia de salida
r :	Resistividad del cobre
R :	Radio del núcleo del inducido
R _c :	Reluctancia de la carcaza
R _d :	Reluctancia de los dientes del inducido

XIV

R_e	:	Resistencia de contacto entre las escobillas y el colector
R_{ex}	:	Resistencia del reóstato de campo
R_f	:	Reluctancia del hierro
R_{fd}	:	Resistencia del devanado de campo derivado
R_{fs}	:	Resistencia del devanado de campo serie
R_g	:	Reluctancia del entrehierro
R_i	:	Resistencia del devanado de inducido
R_m	:	Reluctancia del circuito magnético
R_n	:	Reluctancia del núcleo del inducido
R_p	:	Reluctancia del polo
RPM	:	Revoluciones por minuto
S_e	:	Superficie total de contacto de las escobillas
S_f	:	Sección del conductor de campo derivado
S_i	:	Sección del conductor del inducido
S_s	:	Sección del conductor de campo serie
t	:	Tiempo
T_f	:	Número de espiras por polo del devanado de campo derivado
T_s	:	Número de espiras por polo del devanado de campo serie
u	:	Número de elementos por ranura
u_e	:	Caída de tensión por escobilla
u_0	:	Permeabilidad del vacío
u_r	:	Permeabilidad relativa

U_e	:	Coeficiente de rozamiento entre las escobillas y el colector
ΔU	:	Caída de voltaje entre la F.E.M. inducida y el voltaje terminal
V	:	Voltaje terminal
V	:	Velocidad del viento
\bar{V}	:	Promedio anual de la velocidad del viento
V_c	:	Velocidad lineal del muñón
V_{f1}	:	Voltaje terminal a corriente de carga nominal
V_k	:	Velocidad periférica del colector
V_n	:	Voltaje nominal
V_{sal}	:	Voltaje de salida
W	:	Velocidad angular
W_d	:	Distancia de separación entre polo y bobina
W_f	:	Peso del devanado de campo derivado
W_i	:	Peso del devanado de inducido
W_n	:	Peso del núcleo del inducido
W_p	:	Ancho del polo
W_{pm}	:	Peso del conductor en Kg/m.
W_s	:	Peso del devanado de campo serie
Y	:	Paso Total
Y_r	:	Paso de ranuras
Y_1	:	Paso de bobinas
Y_2	:	Paso de conexión
Z	:	Número total de conductores en la periferia del inducido

XVI

Z_r	:	Número de Conductores por ranura
α	:	Angulo entre eje magnético de campo principal y eje magnético de la bobina a-b.
Δ	:	Espesor de las chapas del inducido
ϵ	:	Regulación del voltaje
η	:	Rendimiento
λ	:	Enlaces de flujo
λ_{max}	:	Enlaces de flujo máximos
ρ	:	Densidad del aire
τ	:	Paso Polar
ϕ	:	Flujo magnético
ϕ_d	:	Flujo por polo
ψ	:	Angulo de inclinación

INTRODUCCION

Hasta este siglo el viento ha servido desde las más antiguas civilizaciones para moler granos, mover barcos, bombear agua y generar alguna electricidad.

Con la introducción de la máquina a vapor, los molinos se estrellaron en esta competencia y su apresurada declinación comenzó en el siglo XIX.

Ya con la introducción de la electricidad y sus beneficios ampliamente reconocidos, la demanda de ésta aumentó en zonas apartadas donde aún existían pocas perspectivas de suministrar electricidad y por consiguiente la solución del problema estaba dada por los molinos de viento. Especialmente en las zonas donde los vientos son apreciables, la demanda de electricidad se resolvió, en parte, con la instalación de pequeños generadores de 3 kilovatios movidos por el viento operando con una batería para almacenamiento y proveedora de electricidad en períodos de calma.

Hubo un gran interés en muchos países en desarrollar aérogeneradores a gran escala. Muchos fueron construidos y operados satisfactoriamente, pero ninguno pudo competir con el costo de la energía suministrada por el carbón y el petróleo quemados en las plantas de vapor y por las plantas hidroeléctricas.

En base de estas consideraciones, el presente trabajo tiene por objeto el diseño y construcción de - un generador de corriente directa, de excitación - compuesta acumulativa.

Las características de operación de este generador, han sido determinadas previamente de modo tal que - sea posible su utilización mediante la conversión - de energía eólica a eléctrica.

Para el diseño de este generador se utiliza un generador de características convencionales, el método utilizado para el diseño estará hecho en base de las dimensiones del generador convencional.

Con el afán de comprobar las características para las cuales fue diseñado, se realizaron pruebas ex

perimentales usando el Laboratorio de Maquinaria Eléctrica de la ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral) y se determinaron las principales características de su funcionamiento.

Para permitir que este generador pueda operar a velocidades superiores de la velocidad nominal del mismo, este generador se acopló a un regulador automático de voltaje.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION

Los generadores son convertidores de energía, reciben energía mecánica en su eje y entregan energía eléctrica en sus terminales.

El presente capítulo tiene por objeto exponer - los principios básicos del funcionamiento de los generadores de corriente directa.

Estos principios básicos se fundamentan en las siguientes leyes:

Ley del circuito de campo magnético

Ley de Inducción de Faraday.

1.2. LEY DEL CIRCUITO DE CAMPO MAGNETICO

El circuito de campo magnético, es un circuito -

cerrado por el cual circula determinado flujo magnético.

La ley de Ampere establece la siguiente relación:

$$\oint H \, dl = NI \quad (1.1)$$

Donde:

H es la intensidad de campo magnético, dl es el elemento de longitud y NI amperio-vueltas.

De acuerdo con esta ecuación, la integral curvilínea de la intensidad de campo magnético a lo largo de un camino cerrado es igual a la suma de los amperio-vueltas con los cuales este camino está concatenado.

Para la densidad de flujo, la relación que se establece es:

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot H \quad (1.2)$$

Donde:

μ_0 es la permeabilidad del vacío, que es de valor constante, μ_r la permeabilidad relativa del material, es decir, la relación entre su permeabilidad y la del vacío, H la intensidad de campo magnético y B la densidad de flujo.

Para el aire $\mu_r = 1$, mientras que para el hierro μ_r es una variable que depende del grado de saturación. En la figura 1.1., se muestran los valores de μ_r en función de la intensidad de campo H para un acero laminado eléctrico (1% de silicio), los valores de la densidad de flujo también se aprecian en este gráfico.

La curva B-H se denomina curva de magnetización y es usada en el cálculo de los circuitos magnéticos, la saturación de un material ocurre cuando a pesar de aumentar la intensidad de campo, la densidad de flujo no es aumentada, en este caso se dice que el material está saturado.

La relación entre el flujo magnético Φ , la sección transversal A y la densidad de flujo B , viene dada por la siguiente expresión:



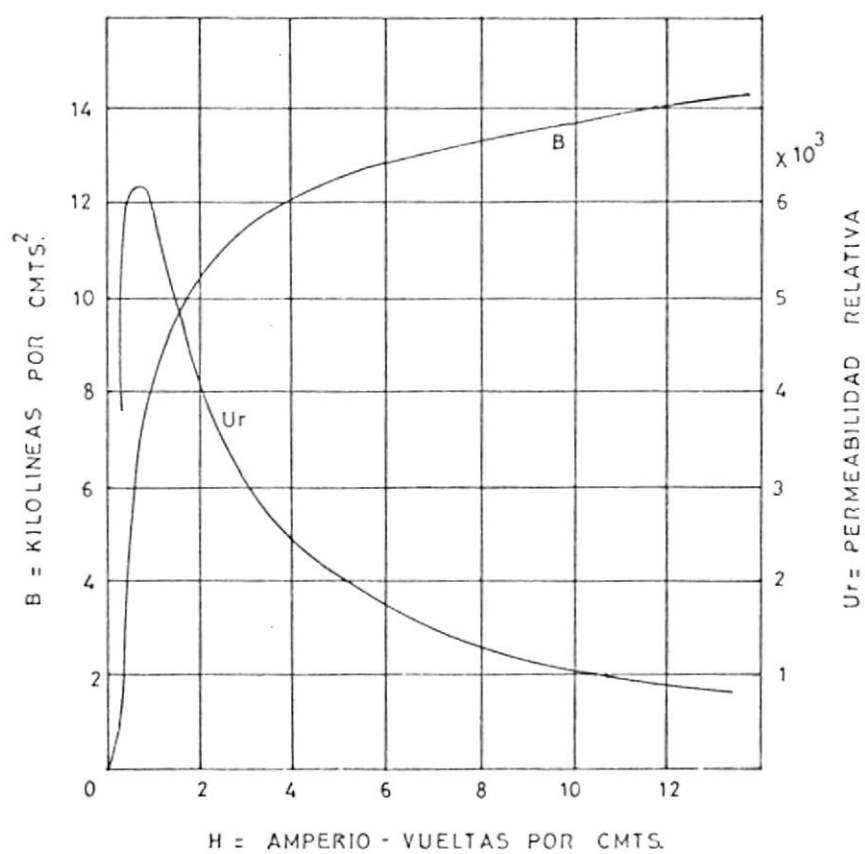


FIGURA 1.1.

Densidad de flujo B y permeabilidad relativa u_r en función de la intensidad de campo H , para un acero laminado eléctrico (1% de silicio).

$$\Phi = BA \quad (1.3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.2) y (1.3) en la ecuación inicial se obtiene la siguiente relación:

$$\Phi R_m = NI \quad (1.4)$$

Esta ecuación es conocida como la ley de Ohm del circuito magnético, donde el valor de R_m está dado por:

$$R_m = \int \frac{dl}{\mu_0 \mu_r A} \quad (1.5)$$

El valor de NI es la fuerza magnetizante y R_m es la reluctancia del circuito magnético.

1.2.1. El Circuito magnético del generador

Para producir un flujo determinado Φ_d en el circuito magnético del generador, es necesaria cierta fuerza magnetizante, el valor de esta F.M.M., depende de la reluctancia

tancia que tenga el generador.

La reluctancia de un generador está compuesta a su vez de dos tipos de reluctancias de distinta naturaleza, el valor de esta reluctancia, está dada por:

$$R = R_f + 2 R_g \quad (1.6)$$

Donde R_f es la reluctancia del hierro y R_g la reluctancia del entrehierro, el factor de dos se debe a que el flujo magnético atraviesa dos veces el entrehierro.

La reluctancia del hierro depende de la fuerza magnetizante y se la expresa mediante la siguiente relación:

$$R_f = R_c + 2R_p + R_n + R_d. \quad (1.7)$$

Donde:

R_c es la reluctancia de la carcasa, R_p

la reluctancia del polo, R_n la reluctancia del núcleo del inducido y R_d la reluctancia de los dientes del inducido.

La reluctancia del entrehierro depende del dimensionamiento de la máquina y de acuerdo con la ecuación (1.5), está dada por:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \mu_r A_g} \quad (1.8)$$

Donde:

l_g es la longitud efectiva del entrehierro, μ_0 la permeabilidad del vacío, μ_r la permeabilidad relativa del aire que es de valor unitario, A_g el área del entrehierro.

De acuerdo con las ecuaciones (1.4) y (1.6) para el caso del generador, se tiene:

$$\phi_d (R_f + 2R_g) = NI \quad (1.9)$$

Los generadores son diseñados de modo que su reluctancia tenga el menor valor posible, de esta forma para cierta fuerza magnetizante el flujo obtenido será máximo.

Los valores de la reluctancia del entrehierro y la reluctancia del hierro pueden ser determinados experimentalmente de la característica en vacío o curva de magnetización.

1.3. LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

La ley de inducción de Faraday establece que si los enlaces de flujo en un circuito conductor cerrado varían con respecto al tiempo, se induce una fuerza electromotriz en dicho circuito, el valor de ésta F.E.M., será proporcional a la variación de estos enlaces con respecto al tiempo, de este modo se tiene la siguiente relación:

$$e = - \frac{d \lambda}{dt} \quad (1.10)$$

Donde:

λ son enlaces de flujo en webers, t el tiempo en segundos y e la fuerza electromotriz inducida expresada en voltios, el signo negativo se debe a - que cuando existe una disminución de estos enlaces la F.E.M., inducida es de signo positivo.

Considerando una máquina elemental como se muestra en la figura 1.2., una bobina de dos conductores - a-b montada sobre un núcleo de hierro gira con velocidad angular W (radianes/segundos), los enlaces de flujo de esta bobina están dados por:

$$\lambda = \lambda_{\text{máx}} \text{COS} \alpha \quad (1.11)$$

Donde:

α es el ángulo que existe entre el eje magnético de la bobina a-b y el eje magnético de campo principal, a su vez $\alpha = Wt$ y $W = 2\pi f$, f es la frecuencia en hertz.

Cuando $\alpha = 0^\circ$ los enlaces de flujo son máximos y cuando $\alpha = 90^\circ$ los enlaces de flujo máximos están dados por:

$$\lambda_{\text{max}} = N \phi_d \quad (1.12)$$

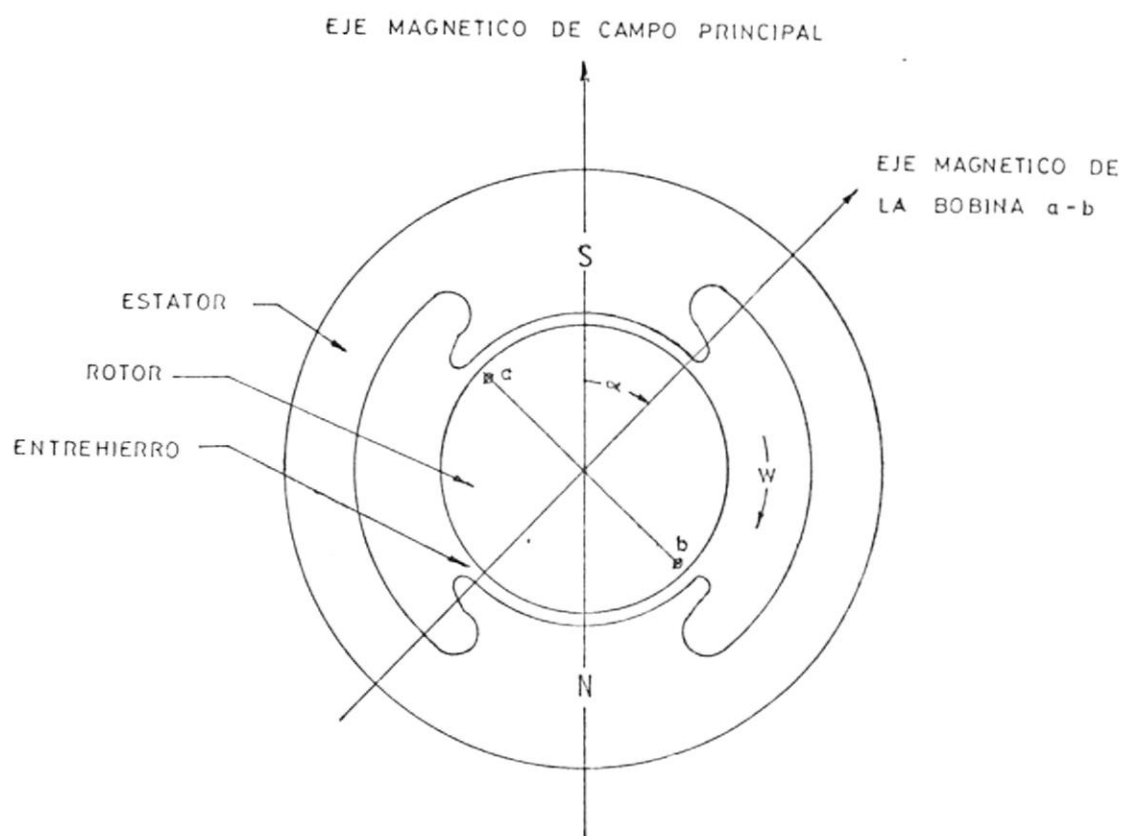


FIGURA 1.2.

Una bobina a-b montada sobre un núcleo de hierro, gira con velocidad angular W dentro de un campo magnético.

Donde:

ϕ_d en el flujo por polo, el valor de la F.E.M., inducida en función del ángulo α , está dado por:

$$e = 2\pi f N \phi_d \text{ Sen } \alpha \quad (1.13)$$

El valor eficaz de esta F.E.M., inducida, es:

$$E_f = 4.44 f N \phi_d \quad (1.14)$$

1.3.1. La fuerza electromotriz del generador

La fuerza electromotriz producida por el generador es de tipo alterna, mediante un dispositivo llamado colector se tiene corriente directa.

La F.E.M., generada en el devanado de inducido, puede obtenerse a partir de la ecuación anterior.

$$E = 4.44 f N \phi_d \quad (1.15)$$

Donde:

E es el valor eficaz de la fuerza electromotriz inducida, N el número de espiras en serie entre dos escobillas de distinta polaridad, f la frecuencia y ϕ_D del flujo - por polo.

Si Z es el número total de conductores en la periferia del inducido y a el número de circuitos en paralelo, el número de espiras en serie entre dos escobillas de distinta polaridad, está dado por:

$$N = Z/2a \quad (1.16)$$

En la ecuación (1.14) se ha supuesto que - las N espiras estaban concentradas de tal manera que todas estaban enlazadas con el mismo flujo en cualquier instante de tiempo, pero las $Z/2a$ espiras del circuito están dispuestas unas detrás de otras de manera que las F.E.M., inducidas en ellas no están en fase.

Consideremos el polígono de tensiones (figura 1.3), las escobillas toman una tensión correspondiente al diámetro del círculo, mientras que la suma algebraica de las tensiones de todos los elementos del devanado entre escobillas se aproximan a un valor igual a la mitad de la circunferencia del círculo, debido al retraso de los elementos del devanado entre sí, el valor de la F.E.M., inducida se reduce en la siguiente relación:

$$\frac{\text{DIAMETRO}}{\text{MITAD DE LA CIRCUNFERENCIA}} = \frac{2}{\pi}$$

La ecuación (1.15) debe multiplicarse por este factor, además las escobillas están colocadas en posición tal que toman el valor máximo de la F.E.M., de corriente alterna, esta ecuación debe multiplicarse por $\sqrt{2}$, la ecuación resultante es:

$$E = 4f N \phi_d \quad (1.17)$$

La frecuencia se la expresa mediante la siguiente relación:

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (1.18)$$

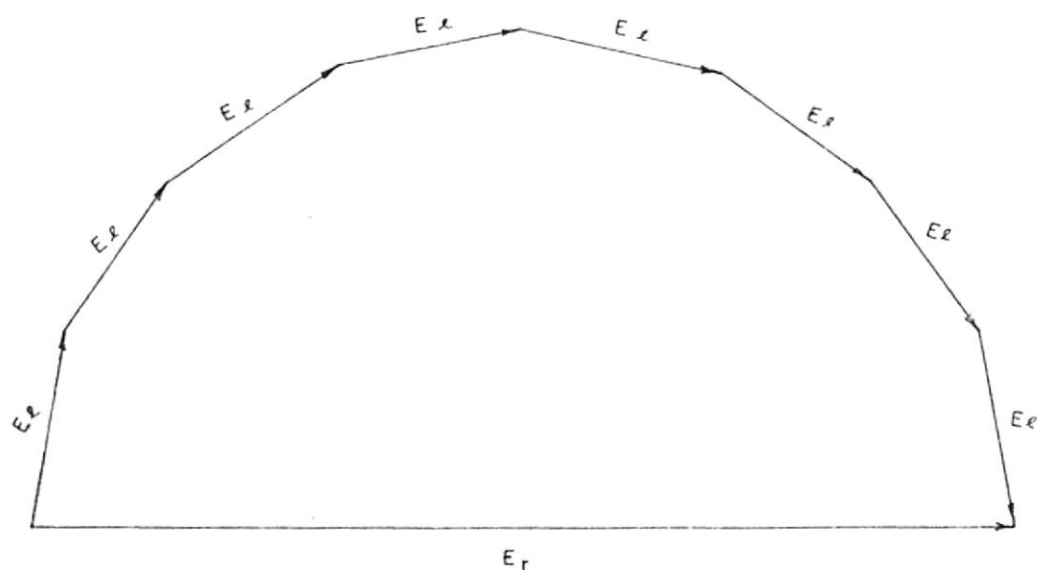


FIGURA 1.3.

Polígono de tensiones de las F.E.M., inducidas en un devanado de ocho elementos, el valor de E_e representa la F.E.M., inducida en cada elemento y E_r el valor de la F.E.M., resultante.

Donde:

n es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto y P el número de polos.

Nosotros sabemos que $N = Z/2a$ y la ecuación resultante para la F.E.M., producida por el generador, es:

$$E = \frac{Z P n \phi_d}{a \times 60} = C_1 n \phi_d \quad (1.19)$$

Donde:

$Z P/a \times 60 = C_1$ es constante de diseño del generador, y la F.E.M., inducida depende de la velocidad de rotación y del flujo por polo.

CAPITULO II

DEVANADOS

2.1. INTRODUCCION

Los generadores de corriente directa poseen básicamente dos tipos de devanados: los devanados de campo o de excitación y el devanado de inducido.

El objetivo de este capítulo es establecer las normas principales para el trazado de los mismos haciendo énfasis en el devanado de inducido, ya que este devanado debe ser diseñado bajo ciertas condiciones que exigen simetría tanto del punto de vista eléctrico como mecánico, las cuales deben cumplirse necesariamente para el funcionamiento adecuado del mismo.

2.2. DEVANADOS DE CAMPO ✓

Los devanados de campo o de excitación proporcio

nan la fuerza magnetizante que produce el flujo por polo del generador.

Estos devanados están formados por bobinas, llamadas bobinas de campo o de excitación, estas bobinas están situadas en los polos y para la elaboración de las mismas se utilizan conductores de cobre con aislamiento de esmalte.

2.3. DEVANADO DE INDUCIDO (ARMADURA)

El devanado de inducido es llamado también devanado de armadura, y está formado por bobinas, las cuales poseen una o más bobinas elementales llamadas elementos.

Cada elemento del devanado debe conectarse a una delga del colector, de este modo existirán tantos elementos como delgas tenga el colector, estos elementos están compuestos a su vez de un número determinado de espiras.

El devanado de inducido es generalmente de dos capas por ranura, teniendo cada bobina un lado en la parte superior de la ranura y el otro la

do en la parte inferior de otra ranura.

Las bobinas que forman este devanado pueden conectarse de diferentes maneras, según las condiciones eléctricas exigidas, esto da origen a dos tipos de devanados: el devanado imbricado y el devanado ondulado.

2.3.1. Devanado Imbricado

El devanado imbricado es el más antiguo de los devanados utilizados en los generadores de corriente directa.

Una bobina elemental de este devanado, está constituida por lo menos de dos conductores que se sitúan en el campo de acción de polos de nombre contrario.

Las bobinas elementales progresan alternativamente hacia adelante y hacia atrás formando bucles o lazos.

El devanado imbricado es realizable para cualquier número de ranuras y delgas del co

lector, siempre que las condiciones de simetría lo permitan.

Esta caracterizado por tener igual número de circuitos en paralelo que número de polos, debido a esto es llamado también devanado paralelo, y se lo usa para condiciones de corrientes elevadas y voltajes de pequeña magnitud.

2.3.1.1. Pasos del devanado Imbricado:

Se denomina paso polar, a la distancia que existe entre los centros geométricos de dos polos consecutivos, este paso polar medio en número de ranuras se lo expresa mediante la siguiente relación:

$$\tau = \frac{K}{P} \quad (2.1)$$

Donde:

K = número de ranuras

P = número de polos

El primer paso parcial Y_1 , llamado también paso de bobinas, es la distancia que existe entre dos lados de una bobina de un mismo elemento, expresado en delgas del colector se lo obtiene de la siguiente expresión:

$$Y_1 = \frac{C + b}{p} \quad (2.2)$$

Donde:

C es el número de delgas del colector y b es un número entero que expresa su diferencia con el paso polar, para valores de $b = 0$ el paso de bobinas es igual al paso polar y el paso de bobinas es de paso entero.

Cuando b es positivo $Y_1 > \tau$ y el paso es alargado, cuando b es negativo $Y_1 < \tau$ y el paso es acortado, el paso de bobinas tendrá

un valor cercano o igual al paso polar, de esta forma los enlaces de flujo son mayores y la F.E.M. inducida será de mayor magnitud.

El segundo paso parcial Y_2 , llamado también paso de conexión, es la distancia entre dos lados de bobina conectados entre si pero pertenecientes a dos elementos - distintos.

El paso total Y , llamado también paso del devanado, es la distancia entre las entradas de dos elementos consecutivos, para el devanado imbricado sencillo este paso total es:

$$Y = Y_1 - Y_2 = \pm 1 \quad (2.3)$$

Cuando $Y = +1$ se tiene un devanado no cruzado, y si $Y = -1$ se tiene un devanado cruzado, es

te devanado cruzado debe evitarse debido a que utiliza mayor cantidad de conductor sin ventaja alguna.

El paso de ranuras Y_r , o paso según ranuras es la distancia que hay expresada en número de ranuras, entre dos lados de una bobina elemental, el paso de ranuras está dado por:

$$Y_r = \frac{Y_1}{u} \quad (2.4)$$

Donde:

Y_1 = paso de bobinas

u = número de elementos por ranura

2.3.1.2. Condiciones de simetría del devanado imbricado

Para que exista una adecuada comu-

tación, es necesario que el devanado imbricado cumpla con ciertas condiciones llamadas de simetría.

La primera condición de simetría, exige que todos sus circuitos en paralelo deben ser eléctricamente iguales, luego:

$$\frac{2 \times B}{a} = \text{número entero}$$

Donde:

B : número de elementos

a : número de circuitos en paralelo.

La segunda condición de simetría, exige que el número de ranuras debe ser múltiplo entero del número de pares de circuitos en paralelo, de este modo:

$$\frac{2 \times K}{a} = \text{número entero.}$$

Donde:

K : número de ranuras

a : número de circuitos en paralelo

La tercera condición de simetría, exige que el número de polos debe ser múltiplo entero del número de pares de circuitos en paralelo, - así:

$$\frac{2 \times P}{a} = \text{número entero}$$

Donde:

P : número de polos

a : número de circuitos en paralelo.

2.3.2. Devanado Ondulado

El devanado ondulado se utiliza cuando se requiere una tensión elevada con respecto a su potencia o velocidad, en este caso se conectan en serie el mayor número posible de bobinas, de este modo la tensión resultante de sus F.E.M. individuales tendrá un valor elevado.

Este devanado tiene siempre un par de circuitos en paralelo, es llamado también devanado serie y dada la característica de conexión que exige este devanado, solo es realizable para un número mayor o igual a cuatro polos.

2.3.2.1. Pasos del devanado ondulado:

El paso total del devanado ondulado, está dado por la siguiente relación:

$$Y = \frac{2B \pm a}{P} \quad (2.5)$$

Donde:

B : número de bobinas elementales

a : número de circuitos en paralelo

P : número de polos

Este tipo de devanado solamente se puede realizar cuando el paso total es un número entero.

Para el devanado ondulado se tiene que el paso total es la suma del - paso de bobinas más el paso de conexión, luego:

$$Y = Y_1 + Y_2. \quad (2.6)$$

Además, se dispone de la siguiente relación:

$$Y_1 \approx Y_2 \approx Y/2 \quad (2.7)$$

Donde, tanto Y_1 como Y_2 deben ser números enteros, los demás pasos se hallan en base de las relaciones establecidas anteriormente.

2.3.2.2. Condiciones de simetría del devanado ondulado:

Las condiciones de simetría han sido deducidas en forma generalizada para ambos tipos de devanados, de este modo las condiciones de simetría de este devanado son las mismas que las del devanado imbricado.

CAPITULO III

DISEÑO DEL GENERADOR

3.1. INTRODUCCION

Puesto que se trata de diseñar y construir un generador con características que hagan factible la conversión de energía eólica a eléctrica, las características de este generador son:

Voltaje : 50 voltios

Velocidad: 1140 - 1800 RPM

Potencia : 470 vatios

Corriente : 9.40 amperios

Para este propósito se utilizó un generador de características convencionales, esto es:

Voltaje : 115 voltios

Velocidad: 1750 RPM

Potencia : 746 vatios

Corriente: 6.49 amperios

3.2. DISEÑO DEL DEVANADO DE INDUCIDO

En el devanado de inducido se induce la F.E.M., producida por el generador, para el diseño de este devanado se realizaron los siguientes cálculos.

3.2.1. Pasos del Devanado

El voltaje de este generador fue fijado previamente, por ser este voltaje de pequeña magnitud se utilizó un devanado de tipo imbricado.

Para determinar la relación del paso de bobinas con el paso polar, el paso de bobinas se lo halla de la siguiente relación:

$$Y_1 = \frac{3.1416 (D - ds)}{p} \quad (3.1)$$

Donde:

D : Diámetro del núcleo del inducido

ds : profundidad de la ranura

P : número de polos

Siendo:

D : 10.20 cmts.

ds : 1.50 cmts.

P : 2

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, tenemos:

$$Y_1 = \frac{3.1416(10.20 - 1.50)}{2}$$

Luego:

$$Y_1 = 13.66 \text{ cmts.}$$

El paso polar se lo calcula de la siguiente relación (4)

$$\tau = \frac{3.1416 \times D}{P} \quad (3.2)$$

Luego:

$$\tau = \frac{3.1416 \times 10.20}{2}$$

$$\tau = 16.02 \text{ cmts.}$$

Por ser el paso de bobinas menor que el paso polar, se tiene un devanado de paso acortado.

Las características del núcleo del inducido, son las siguientes:

Número de polos (P) = 2

Número de circuitos en paralelo (a) = 2

Número de ranuras (K) = 16

Número de bobinas elementales (B) = 48.

Número de bobinas por ranura (u) = 3.

Número de delgas del colector (C) = 48

Con estos valores se calcularon los pasos del devanado:

Paso Polar:

$$\tau = \frac{K}{P} = \frac{16}{2} = 8 \text{ ranuras}$$

Paso de bobinas:

$$Y_1 = \frac{C + b}{P} = \frac{48 - 6}{2} = 21 \text{ delgas}$$

Donde:

b = -6 por ser de paso acortado

Paso total:

Y = +1 delgas (no cruzado)



Paso de conexión:

$$Y_2 = Y_1 - Y = 21 - 1 = 20 \text{ delgas.}$$

Paso de ranuras:

$$Y_r = \frac{Y_1}{u} = \frac{21}{3} = 7 \text{ ranuras}$$

Las condiciones de simetría que deben de cumplirse:

$$\frac{2 \times B}{a} = \frac{2 \times 48}{2} = 48 \text{ (número entero)}$$

$$\frac{2 \times K}{2} = \frac{2 \times 16}{2} = 16 \text{ (número entero)}$$

$$\frac{2 \times P}{2} = \frac{2 \times 2}{2} = 2 \text{ (número entero)}$$

En base de estas relaciones, se tiene un

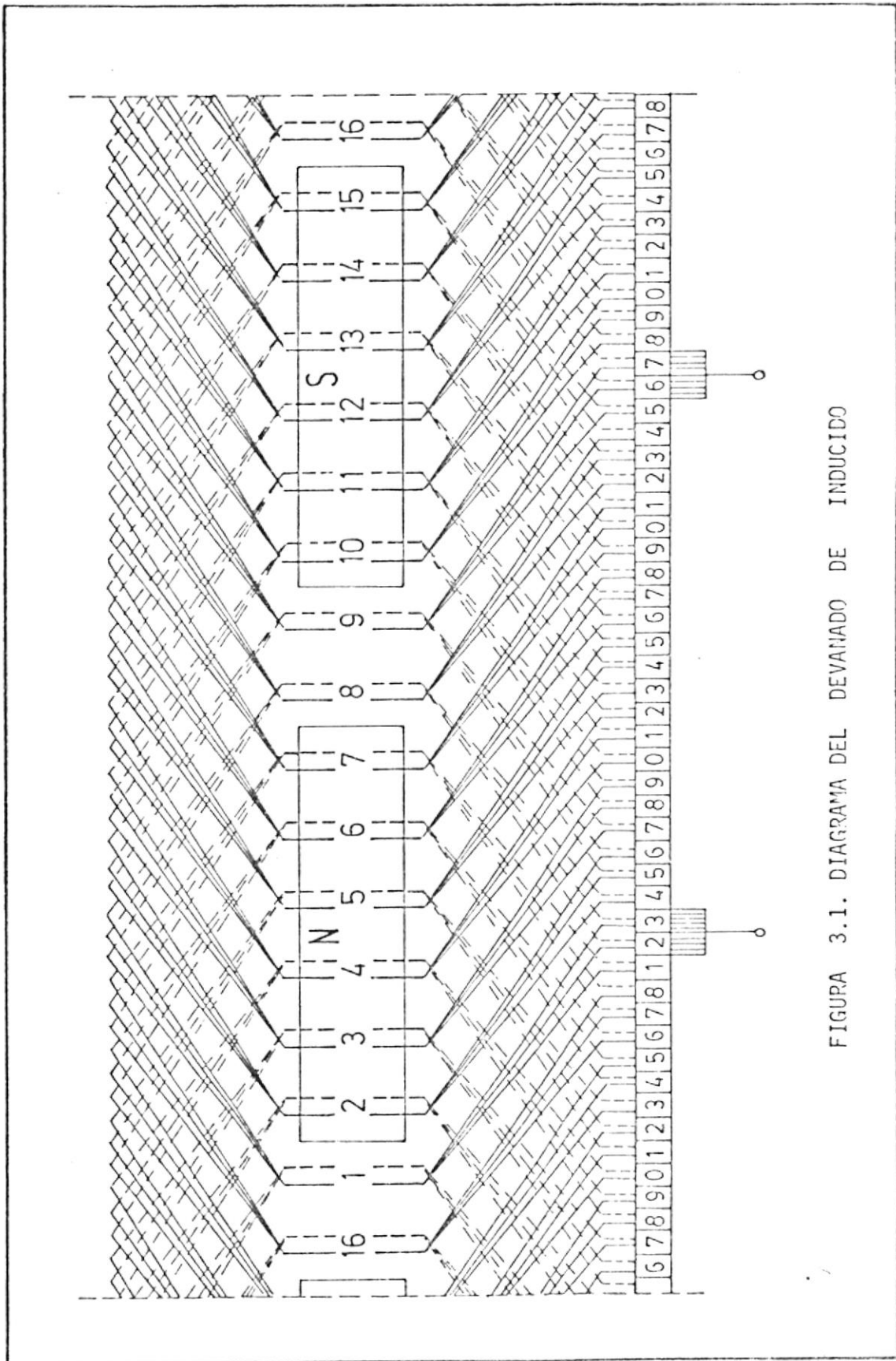


FIGURA 3.1. DIAGRAMA DEL DEVANADO DE INDUCIDO

devanado simétrico.

3.2.2. Longitud de la Espira Media

La longitud de la espira media de una bobina de inducido puede dividirse en dos partes, la parte activa sumergida en el hierro y la conexión externa o cabezal.

La longitud de la mitad de la espira media de una bobina de inducido, se la obtiene de la siguiente relación:(4)

$$LMI = \frac{K_S(D - ds)}{\cos\psi} + 2b + L \quad (3.3)$$

Donde:

K_S : factor de corrección del paso de bobinas.

D : Diámetro del núcleo del inducido

ds : Profundidad de la ranura

ψ : Angulo de inclinación

b : extensión de la bobina

L : Longitud del núcleo del inducido

Siendo:

K_S : 0.94

D : 10.20 cmts.

ds : 1.50 cmts.

ψ : 25.09°

b : 0.18 cmts.

L : 7.60 cmts.

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, tenemos:

$$LMI = \frac{0.94 (10.20 - 1.50)}{\cos 25.09^\circ} + 2 \times 0.18 \pm 7.60$$

$$LMI = 9.03 + 0.36 + 7.60$$

$$LMI = 16.99 \text{ cmts.}$$

3.2.3. Sección del Conductor

La sección del conductor del inducido, depende de la corriente que ha de circular y de la densidad de corriente permisible.

La densidad de corriente permisible en el conductor del inducido, depende del grado de refrigeración del generador, esto es, depende de la velocidad de rotación del inducido y de la relación que existe entre la longitud de la mitad de la espira media de una bobina de inducido y la longitud efectiva del núcleo del inducido.

Para determinar la sección del conductor del inducido, se utilizó la siguiente relación:

(4)

$$S_i = \frac{I + I_f}{a \times A_j} \quad (3.4)$$

Donde:

I : corriente de carga nominal

I_f : corriente de campo derivado

a : número de circuitos en paralelo

A_j : densidad de corriente en el conductor del inducido.

Siendo:

I : 9.40 amperios

I_f : 0.50 amperios

a : 2.

La densidad de corriente permisible en el conductor del inducido no puede ser predeterminada con exactitud, asumiendo

$A_j = 5.824$ amperios/mm², tenemos:

$$S_i = \frac{9.40 + 0.50}{2 \times 5.824}$$

$$S_i = 0.85 \text{ mm}^2.$$

De la tabla de las características de los conductores de cobre (Tabla I), la sección de este conductor corresponde a un alambre N° 18.

3.2.4. Flujo por Polo

El flujo magnético que atraviesa el polo del generador, se denomina flujo por polo, el valor de este flujo por polo se halla de la siguiente fórmula:

$$\phi_d = \frac{4 \times L \times R \times B_{\text{máx}}}{P} \quad (3.5)$$

Donde:

L : longitud del núcleo del inducido

R : radio del núcleo del inducido

$B_{\text{máx}}$: densidad de flujo máxima

P : número de polos

TABLA I

CARACTERISTICAS DE LOS CONDUCTORES DE COBRE

N ^o ESCALA AMERICANA BS o AWG	DIAMETRO		SECCION		P E S O			RESISTENCIA,	OHMIOS
	Plg.	mm.	Circular mils.	mm ²	Libras x1000 pies.	Kilogram x km.	por 1000 pies a 68°F (20°)	por Km. a 20°C	
0000	0,4600	11,68	211,600	107,20	640,5	953,18	0,0499	0,164	
000	0,4096	10,38	167,800	85,00	507,9	755,86	0,0618	0,203	
00	0,3648	9,36	133,100	67,42	402,8	599,45	0,0779	0,256	
0	0,3249	8,25	105,500	53,48	319,5	475,48	0,0982	0,322	
1	0,2893	7,34	83,694	42,40	253,3	376,96	0,124	0,407	
2	0,2576	6,54	66,370	33,62	200,9	297,67	0,156	0,512	
3	0,2294	5,82	52,630	26,66	159,3	237,07	0,197	0,646	
4	0,2043	5,18	41,740	21,15	126,4	188,10	0,248	0,814	
5	0,1819	4,61	33,100	16,57	100,2	149,12	0,313	1,029	
6	0,1620	4,11	26,250	13,29	79,46	118,25	0,395	1,296	
7	0,1443	3,66	20,820	10,51	63,02	93,79	0,498	1,634	
8	0,1285	3,26	16,510	8,32	49,98	74,38	0,628	2,060	
9	0,1144	2,91	13,090	6,64	36,63	54,51	0,792	2,598	
10	0,1019	2,59	10,380	5,29	31,43	46,77	0,998	3,274	
11	0,09074	2,30	8,230	4,19	24,92	37,09	1,260	4,134	
12	0,08081	2,05	6,530	3,29	19,77	29,42	1,588	5,209	
13	0,07196	1,82	5,170	2,63	15,63	23,33	2,003	6,572	
14	0,06408	1,62	4,107	2,08	12,43	18,50	2,525	8,284	
15	0,05707	1,41	3,257	1,68	9,858	14,68	3,184	10,446	
16	0,05082	1,29	2,583	1,29	7,818	11,78	4,016	13,176	
17	0,04526	1,14	2,043	1,03	6,200	9,23	5,064	16,614	
18	0,04030	1,02	1,624	0,85	4,917	7,32	6,385	20,948	
19	0,03589	0,90	1,288	0,65	3,899	5,80	8,051	26,414	
20	0,03196	0,81	1,022	0,52	3,092	4,60	10,150	33,201	
21	0,02846	0,72	810,1	0,41	2,452	3,649	12,80	42,00	
22	0,02535	0,64	642,4	0,33	1,945	2,895	16,14	52,95	
23	0,02257	0,57	509,5	0,26	1,542	2,295	20,36	66,80	
24	0,02010	0,51	404,0	0,20	1,223	1,820	25,67	84,22	
25	0,01790	0,45	320,4	0,16	0,9699	1,443	32,37	106,20	
26	0,01594	0,41	254,1	0,13	0,7692	1,145	40,81	133,89	
27	0,01420	0,36	201,5	0,10	0,6100	0,909	51,47	168,87	
28	0,01264	0,32	126,7	0,06	0,3836	0,571	81,83	268,47	

viene...

29	0,01126	0,29	126,7	0,06	0,3836	0,571	81,83	268,47
30	0,01993	0,26	100,5	0,05	0,3042	0,453	103,20	338,59
31	0,00892	0,23	79,70	0,04	0,2413	0,359	130,1	426,8
32	0,00795	0,20	63,21	0,03	0,1913	0,285	164,1	583,4
33	0,00708	0,18	50,13	0,03	0,1517	0,226	206,9	687,8
34	0,00630	0,16	39,75	0,02	0,1203	0,179	260,9	856,0
35	0,00561	0,14	31,52	0,02	0,09542	0,142	329,0	1.079,4
36	0,00500	0,13	25,00	0,01	0,07568	0,113	414,8	1.361
37	0,00445	0,11	19,83	0,01	0,06010	0,089	523,1	1.716
38	0,00396	0,10	15,72	0,01	0,04759	0,071	659,6	2.164
39	0,00363	0,09	12,47	0,01	0,03774	0,056	831,8	2.729
40	0,00314	0,08	9,888	0,00	0,02990	0,044	1.049,0	3.442

Siendo:

L : 7.60 cmts.

R : 5.10 cmts.

$B_{\text{máx}}$: 4.42×10^{-5} webers/cmts².

P : 2

El flujo por polo del generador, es:

$$\phi_d = \frac{4 \times 7.60 \times 5.10 \times 4.42 \times 10^{-5}}{2}$$

$$\phi_d = 0.003427 \text{ webers.}$$

3.2.5. Número total de conductores

El número total de conductores en la periferia del inducido, se determina a través de la siguiente relación:

$$Z = \frac{E \times a \times 60}{P \times n \times \phi_d} \quad (3.6)$$

Donde:

- E : fuerza electromotriz inducida
- a : número de circuitos en paralelo
- P : número de polos
- n : velocidad de rotación
- ϕ_d : flujo por polo

Siendo:

- E : 50 voltios
- a : 2
- P : 2
- n : 1140 RPM
- ϕ_d : 3.427×10^{-3} webers

El número total de conductores en la periferia del inducido, es:

$$Z = \frac{50 \times 2 \times 60 \times 10^3}{2 \times 1140 \times 3.427}$$

$$Z = 768.$$

3.2.6. Número de Conductores por ranura

El número de conductores por ranura, se halla mediante la siguiente expresión:

$$Z_r = \frac{Z}{K} \quad (3.7)$$

Donde:

Z : número total de conductores en la periferia del inducido.

K : número de ranuras

Siendo:

Z : 768

K : 16.

El número de conductores por ranura, es:

$$Z_r = \frac{768}{16} = 48.$$

3.2.7. Resistencia del Devanado de Inducido

La resistencia del devanado de inducido, se la calcula a partir de la siguiente fórmula: (4)

$$R_i = \frac{LMI \times Z \times r}{a^2 \times S_j} \quad (3.8)$$

Donde:

- LMI : longitud de la mitad de la espira media de una bobina de inducido.
- Z : número total de conductores en la periferia del inducido.
- r : resistividad del cobre
- a : número de circuitos en paralelo
- S_j : sección del conductor del inducido.

La resistividad del cobre depende de la tem

peratura, su valor a 25°centígrados es de 1.76×10^{-4} ohmios \times $\text{mm}^2/\text{cmts.}$, luego:

$$R_i(25^\circ) = \frac{16.99 \times 768 \times 1.76}{4 \times 0.85 \times 10^4}$$

$$R_i(25^\circ) = 0.675 \text{ ohmios}$$

La resistencia a una temperatura (t_2) si se conoce su valor a una temperatura (t_1), puede calcularse utilizando la siguiente relación:

$$R(t_2) = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \times R(t_1) \quad (3.9)$$

3.2.8. Peso del devanado de inducido

El peso del devanado de inducido sin considerar el peso de su aislamiento, se halla de la siguiente ecuación: (4)

$$W_i = \frac{LMI \times Z \times W_{pm}}{100} \quad (3.10)$$

Donde:

LMI : longitud de la mitad de la espira media de una bobina de inducido.

Z : número total de conductores en la periferia del inducido.

W_{pm} : peso del conductor en Kg/m.

EL peso del devanado de inducido en base de la ecuación anterior, es:

$$W_i = \frac{16.99 \times 768 \times 7.32}{10^2 \times 10^3}$$

$$W_i = 0.955 \text{ Kg.}$$

3.3. DISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO DERIVADO

El devanado de campo derivado proporciona parte de la F.M.M., que produce el flujo por polo del generador, para el diseño de este devanado se realizaron los siguientes cálculos:

3.3.1. Longitud de la Espira Media

La longitud de la espira media de una bobina de campo derivado, es la relación que existe entre la longitud total del conductor de la bobina y el número de espiras de esta bobina, la longitud de la espira media de una bobina de campo derivado se la obtiene de la siguiente relación:(4)

$$LMF = \frac{2(L_1 + W_p - 2W_d) + 2\pi(W_d + 0.24) + D_f}{D_f} \quad (3.11)$$

Donde:

L_1 : longitud axial del polo

W_p : ancho del polo

W_d : distancia de separación entre polo y bobina

D_f : ancho de la bobina de campo derivado.

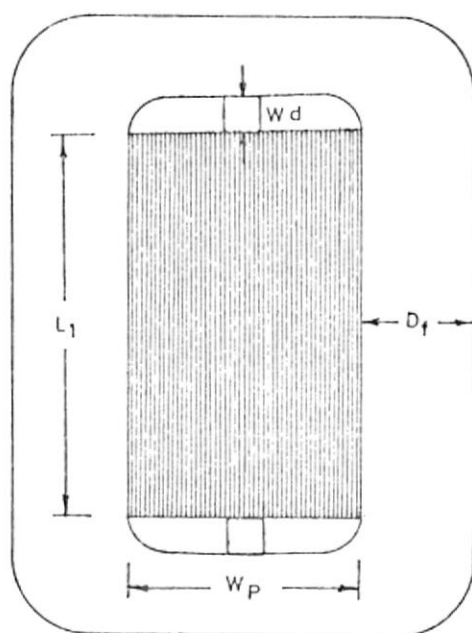


FIGURA N^o 3.2.
DIMENSIONAMIENTO DE UNA BOBINA DE CAMPO DERIVADO

El factor 0,24 es el valor de la tolerancia para el aislamiento entre el hierro del polo y la bobina.

Siendo:

L_1 : 9.60 cmts.

W_p : 7.01 cmts.

W_d : 0.43 cmts.

D_f : 1.521 cmts.

La longitud de la espira media de una bobina de campo derivado, es:

$$\text{LMF} : 2(9.60 + 7.01 - 2(0.43)) + 6.2832 \\ (0.43 + 0.24) + 1.521.$$

$$\text{LMF} : 31.50 + 4.21 + 1.521$$

$$\text{LMF} : 37.231 \text{ cmts.}$$

3.3.2. Sección del conductor

Para determinar la sección del conductor del campo derivado es necesario conocer los amperio-vueltas por polo del devanado de campo derivado, estos amperio-vueltas son determinados de la característica en vacío al voltaje nominal del generador.

La sección del conductor del campo derivado, se halla de la siguiente relación:(4)

$$S_f = \frac{ATP_f \times \text{LMF} \times P \times r}{V_n(0.7 \text{ a } 0.8)} \quad (3.12)$$

Donde:

ATP_f : amperio-vueltas por polo del devanado de campo derivado.

LMF : longitud de la espira media de una bobina de campo derivado.

P : Número de polos

r : resistividad del cobre

V_n : voltaje nominal

El voltaje del devanado de campo derivado se diseña usualmente, de 20 a 30 % menor que el voltaje nominal, de esta forma la regulación del voltaje puede hacerse mediante un reóstato en serie con este devanado.

Siendo:

ATP_f : 650 A_v .

LMF : 37.231 cmts.

P : 2.

$$r : 1.76 \times 10^{-4} \text{ohmios} \times \text{mm}^2/\text{cmts.}$$

$$V_n : 50 \text{ voltios}$$

La sección del conductor del devanado de campo derivado en base de la ecuación anterior, es:

$$S_f = \frac{650 \times 37.231 \times 2 \times 1.76}{50 \times 0.741 \times 10^4}$$

$$S_f = 0.23 \text{ mm}^2.$$

La sección de este conductor no se encuentra en la tabla de las características de los conductores de cobre, luego se realizó la mitad de la bobina con alambre N°24 (0.20 mm² de sección) y la otra mitad con alambre N° 23 (0.26 mm² de sección). La sección equivalente de ambos conductores, está dada por:

$$S_f = \frac{S_{f1} \times T_{f1} + S_{f2} \times T_{f2}}{T_{f1} + T_{f2}} \quad (3.13)$$

Donde:

S_{f1} : sección del conductor menor

S_{f2} : sección del conductor mayor

T_{f1} : número de espiras del conductor menor

T_{f2} : número de espiras del conductor mayor.

Siendo:

S_{f1} : 0.20 mm².

S_{f2} : 0.26 mm².

T_{f1} : T_{f2}

La sección equivalente de ambos conductores es:

$$S_f = \frac{0.20 \times T_{f1} + 0.26 \times T_{f2}}{T_{f1} + T_{f2}}$$

$$S_f = 0.23 \text{ mm}^2.$$

3.3.3. Número de Espiras por polo

El número de espiras por polo del devanado de campo derivado, está dado por:(4)

$$T_f = \frac{ATP_f}{S_f \times A_f} \quad (3.14)$$

Donde:

ATP_f : número de amperio-vueltas por polo del devanado de campo derivado.

S_f : sección del conductor del campo derivado

A_f : densidad de corriente del campo derivado.

Los valores usuales de la densidad de corriente del devanado de campo derivado fluctúan entre 1.68 y 3.50 amperios/mm²., dependiendo del enfriamiento de las bobinas de campo derivado.

Siendo:

$$ATP_f : 650 A_v$$

$$S_f : 0.23 \text{ mm}^2.$$

$$A_f : 2.174 \text{ amperios/mm}^2.$$

El número de espiras por polo del devanado de campo derivado, es:

$$T_f = \frac{650}{0.23 \times 2.174}$$

$$T_f = 1300 \text{ espiras}$$

3.3.4. Resistencia del devanado de campo derivado

La resistencia del devanado de campo derivado, se la determina de la siguiente ecuación:

(4)

$$R_{fd} = \frac{LMF \times T_f \times P \times r}{S_f} \quad (3.15)$$

Donde:

LMF : longitud de la espira media de una bobina de campo derivado

T_f : número de espiras por polo del devanado de campo derivado

P : número de polos

r : resistividad del cobre

S_f : sección del conductor del campo derivado.

La resistencia del devanado de campo derivado a la temperatura de 25 °centígrados, es:

$$R_{fd}(25^\circ) = \frac{37.231 \times 1300 \times 2 \times 1.76}{0.23 \times 10^4}$$

$$R_{fd}(25^\circ) = 74.074 \text{ ohmios}$$

3.3.5. Peso del devanado de campo derivado

El peso del devanado de campo derivado sin considerar el peso de su aislamiento, se

halla de la siguiente expresión:(4)

$$W_f = \frac{LMF \times T_f \times P \times W_{pm}}{100} \quad (3.16)$$

Donde:

LMF : longitud de la espira media de una bobina de campo derivado

T_f : número de espiras por polo del devanado de campo derivado.

P : número de polos

W_{pm} : peso del conductor en Kg/m.

El peso del devanado de campo derivado en base de la ecuación anterior, es:

$$W_f = \frac{37.231 \times 1300 \times 2 \times 2.058}{10^2 \times 10^3}$$

$$W_f = 1.992 \text{ Kg.}$$

3.4. DISEÑO DEL DEVANADO DE CAMPO SERIE

El devanado de campo serie proporciona la F.M.M., necesaria para compensar gran parte de la caída de tensión en el devanado de inducido y la reacción del inducido, para el diseño de este devanado se realizaron los siguientes cálculos:

3.4.1. Longitud de la espira media

La longitud de la espira media de una bobina de campo serie se halla de modo similar al que se utilizó para la bobina de campo derivado, la longitud de esta espira se halla de la siguiente relación: (4)

$$LMS = 2(L_1 + W_p - 2W_d) + 2\pi (W_d + D_s/2 + 0.24) + D_f. \quad (3.17)$$

Donde:

D_s : ancho de la bobina de campo serie.

Siendo:

$$L_1 : 9.60 \text{ cmts.}$$

$$W_p : 7.01 \text{ cmts.}$$

$$W_d : 0.43 \text{ cmts.}$$

$$D_f : 1.521 \text{ cmts.}$$

$$D_s : 0.878 \text{ cmts.}$$

La longitud de la espira media de una bobina de campo serie en base de la ecuación anterior, es:

$$LMS = 2(9.60 + 7.01 - 2(0.43)) + 6.2832$$

$$(0.43 + 0.878/2 + 0.24) + 1.521.$$

$$LMS = 31.50 + 6.969 + 1.521$$

$$LMS = 39.99 \text{ cmts.}$$

3.4.2. Sección del conductor

La sección del conductor del campo serie, se

determina mediante la siguiente expresión:

(4)

$$S_s = \frac{I_s}{A_s} \quad (3.18)$$

Donde:

I_s : corriente de campo serie

A_s : densidad de corriente del campo serie

La densidad de corriente del devanado de campo serie, no siempre puede escogerse tan alta como la elevación de temperatura lo puede permitir, debido a que la eficiencia es en muchos casos el factor del límite. Los valores usuales para A_s son un poco mayores que los de A_f .

Siendo:

I_s : 9.40 amperios

A_s : 4.519 amperios/mm².

La sección del conductor del devanado de campo serie, es:

$$S_s = \frac{9.40}{4.519}$$

$$S_s = 2.08 \text{ mm}^2.$$

De acuerdo con la tabla I, la sección de este conductor corresponde a un alambre N° 14.

3.4.3. Número de espiras por polo

El número de espiras por polo del devanado de campo serie, se halla de la siguiente fórmula: (4)

$$T_s = \frac{ATP_s}{I_s} \quad (3.19)$$

Donde:

ATP_s : número de amperio-vueltas por polo del devanado de campo serie.

I_S : corriente de campo serie

Siendo:

ATP_S : 488.8 A_V

I_S : 9.40 amperios

El número de espiras por polo del devanado de campo serie, es:

$$T_S = \frac{488.8}{9.40}$$

$T_S = 52$ espiras.

3.4.4. Resistencia del devanado de campo serie

La resistencia del devanado de campo serie, se la obtiene de la siguiente expresión:(4)

$$R_{fs} = \frac{LMS \times T_S \times P \times r}{S_S} \quad (3.20)$$

Donde:

- LMS : longitud de la espira media de una bobina de campo serie.
- T_s : número de espiras por polo del devanado de campo serie.
- P : número de polos.
- r : resistividad del cobre.
- S_s : sección del conductor del campo serie.

La resistencia del devanado de campo serie a la temperatura de 25°centígrados, es:

$$R_{fs}(25^\circ) = \frac{39.99 \times 52 \times 2 \times 1.76}{2.08 \times 10^4}$$

$$R_{fs}(25^\circ) = 0.352 \text{ ohmios}$$


3.4.5. Peso del devanado de campo serie

El peso del devanado de campo serie sin considerar el peso de su aislamiento, se halla

de la siguiente relación: (4)

$$W_s = \frac{LMS \times T_s \times P \times W_{pm}}{100} \quad (3.21)$$

Donde:

LMS : longitud de la espira media de una bobina de campo serie.

T_s : número de espiras por polo del devanado de campo serie.

P : número de polos

W_{pm} : peso del conductor en Kg/m.

El peso del devanado de campo serie en base de la ecuación anterior es:

$$W_s = \frac{39.99 \times 52 \times 2 \times 18.5}{10^2 \times 10^3}$$

$$W_s = 0.769 \text{ Kg.}$$

CAPITULO IV

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. INTRODUCCION

Con el propósito de comprobar experimentalmente las características para las cuales fue diseñado, se realizaron pruebas de laboratorio y se determinaron - las principales características de su funcionamiento.

Con la finalidad de conocer las distintas pérdidas, fueron calculadas éstas, así como el rendimiento - del generador.

Para obtener una buena regulación del voltaje, así como permitir el funcionamiento dentro de un rango de velocidades, este generador fue acoplado a un regulador automático de voltaje.

4.2. CARACTERISTICA EN VACIO

La F.E.M., inducida en el devanado de inducido (ar

madura), viene dada por la ecuación (1-19):

$$E = C_1 n \phi_d$$

Como no circula corriente por los terminales, el flujo por polo solo depende de la corriente de campo derivado I_f , y si la velocidad de rotación permanece constante, tenemos:

$$E_0 = C'_1 F (I_f) \quad (4.1)$$

Donde:

$C'_1 = C_1 \times n$, esta es la característica en vacío, que nos da la tensión terminal, en vacío, en función de la corriente de campo derivado, manteniéndose la velocidad de rotación constante.

PROCEDIMIENTO

Los elementos utilizados fueron:

- 1 lámpara estroboscópica

- 1 amperímetro 0-2 amperios DC.
- 1 voltímetro 0-150 voltios DC
- 2 reóstatos 0-490 ohmios

El generador fue acoplado mecánicamente a un motor de velocidad controlada, realizadas las conexiones de la figura 4.1. y una velocidad de rotación de 1140 RPM, se obtuvieron las lecturas del voltaje terminal para las distintas corrientes de campo derivado. Los valores obtenidos son tabulados en la Tabla 2 y mostrados gráficamente en la figura 4.2.

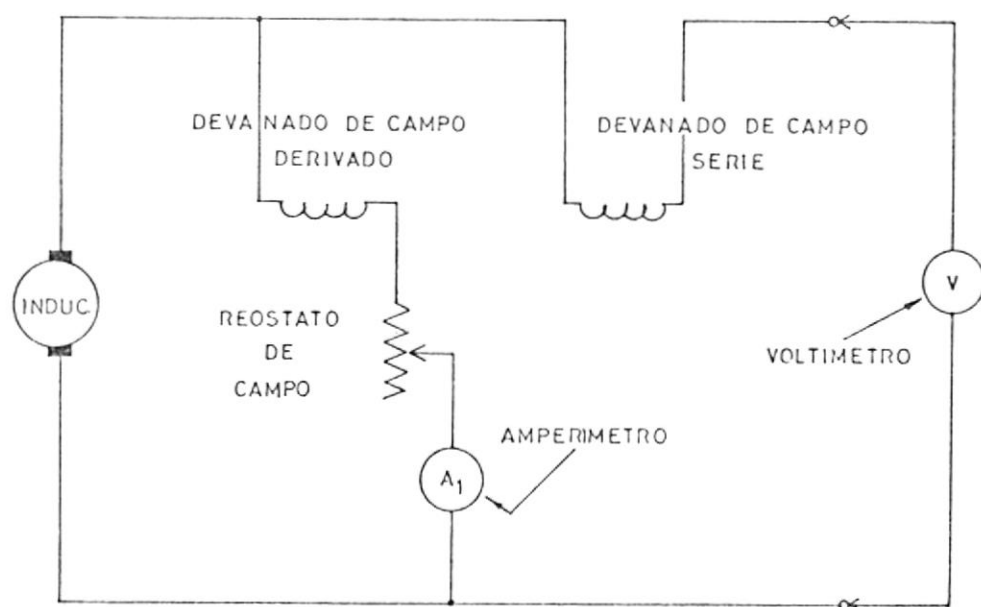


FIGURA 4.1.

DIAGRAMA DE CONEXIONES EFECTUADAS PARA DETERMINAR LA CARACTERÍSTICA EN VACÍO.

TABLA N^o 2

I_f (amps.)	E_0 (volts)
0.00	6.00
0.10	14.00
0.15	20.80
0.20	27.00
0.25	33.20
0.30	38.00
0.35	42.00
0.40	45.00
0.45	47.60
0.50	50.00
0.55	52.00
0.60	54.00
0.65	55.40
0.70	57.00
0.75	58.40
0.80	60.00

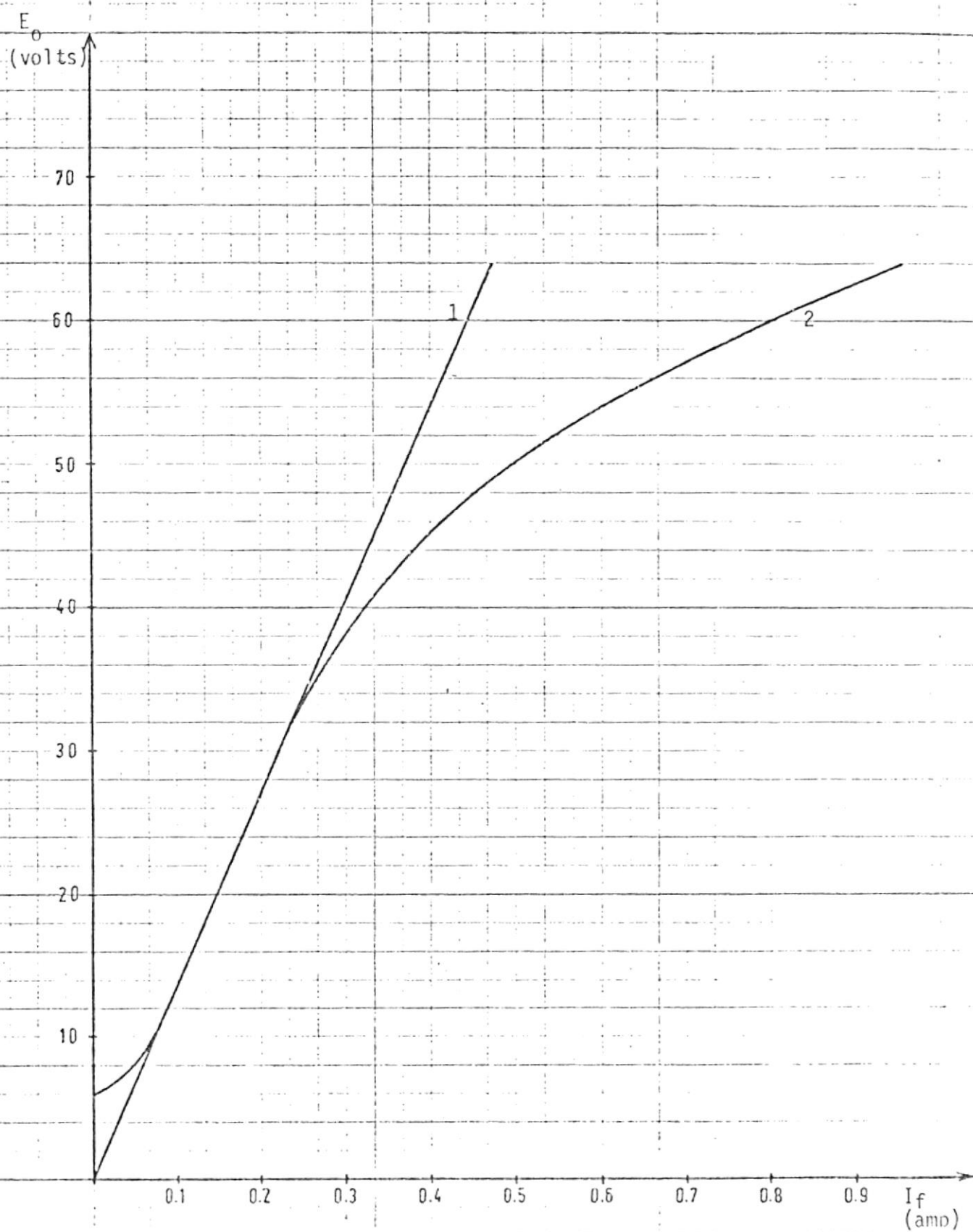


FIGURA 4.2.

CARACTERISTICA EN VACIO O CURVA DE MAGNETIZACION

En la figura 4.2., la recta 1, nos representa la línea del entrehierro y la curva 2, la característica en vacío o curva de magnetización.

4.3. CARACTERISTICA EN CARGA

La característica en carga nos representa el voltaje terminal en función de la corriente de campo derivado $V = F(I_f)$, manteniéndose la velocidad de rotación y la corriente de carga constantes.

PROCEDIMIENTO

Los elementos utilizados fueron:

- 1 lámpara estroboscopia
- 1 voltímetro 0-150 voltios DC.
- 1 amperímetro 0-2 amperios DC.
- 1 amperímetro 0-15 amperios DC.
- 2 bancos de carga resistiva
- 2 reóstatos 0-490 ohmios.

Realizadas las conexiones de la figura 4.3, y una

velocidad de rotación de 1140 RPM, se mantuvo la corriente de carga a un valor constante de 2 amperios, luego se obtuvieron las lecturas del voltaje terminal para las distintas corrientes de campo derivado. Los valores obtenidos son anotados en la tabla 3 y mostrados gráficamente en la figura 4.4.

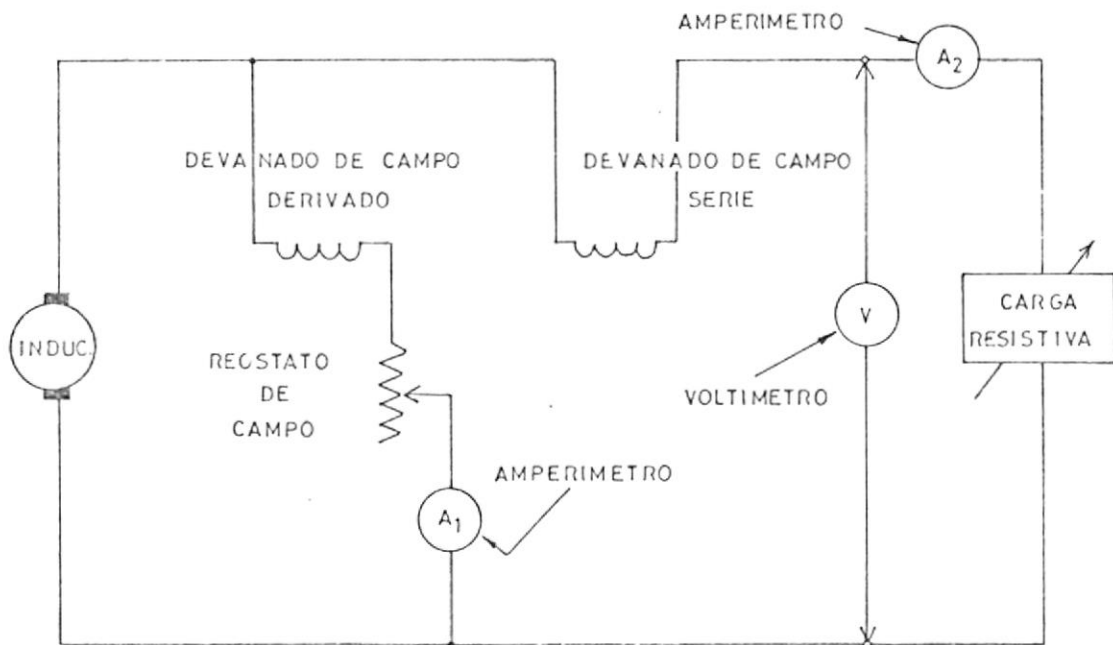


FIGURA 4.3.
DIAGRAMA DE CONEXIONES EFECTUADAS PARA DETERMINAR LA CARACTERÍSTICA EN CARGA

TABLA 3

DATOS OBTENIDOS EN LA CARACTERISTICA EN CARGA

I_f (amps.)	V (Volts)
0.00	8.00
0.10	22.00
0.15	27.20
0.20	32.00
0.25	36.00
0.30	40.00
0.35	42.80
0.40	45.60
0.45	47.60
0.50	50.00
0.55	51.40
0.60	52.80
0.65	54.00
0.70	55.00
0.75	56.00
0.80	57.00

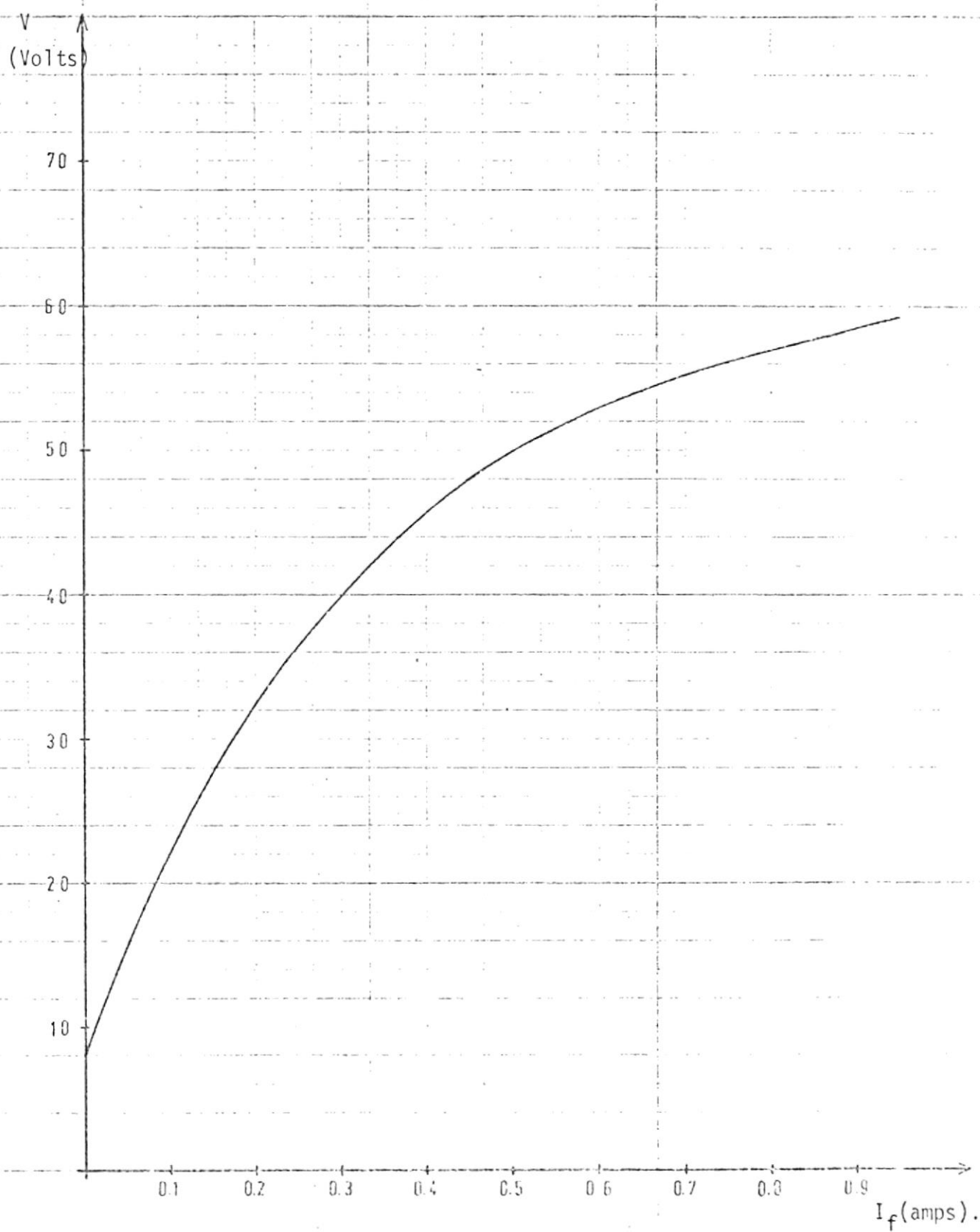


FIGURA 4.4. CARACTERISTICA EN CARGA

De acuerdo con la característica en carga obtenida (Figura 4.4.), la tensión de los terminales resulta mayor que la F.E.M., en vacío para condiciones de baja saturación y menor que la F.E.M., en vacío para condiciones de alta saturación.

4.3.1. Característica Externa

La característica externa nos da la tensión terminal en función de la corriente de carga $V = F(I_L)$, manteniéndose la velocidad de rotación y la resistencia R_{ex} en el circuito de campo derivado constantes.

PROCEDIMIENTO

Con los elementos y conexiones utilizadas para determinar la característica en carga, y una velocidad de rotación de 1140 RPM se ajustó la resistencia R_{ex} en el circuito de campo derivado en un valor constante de modo de tener el voltaje terminal en vacío de 50 voltios, se obtuvieron las lecturas de voltaje terminal para las distintas corrientes de carga.

La caída de voltaje entre la F.E.M., inducida en el devanado de inducido y el voltaje terminal, está dado por:

$$\Delta U = (R_i + R_s + R_e) I_L + (R_i + R_e) I_f \quad (4.2)$$

Donde:

R_e = resistencia de contacto entre las escobillas y el colector.

De este modo:

$$\Delta U = (0.675 + 0.352 + 0.099) I_L + (0.675 + 0.099)0.5$$

$$\Delta U = 1.126 I_L + 0.387$$

Sumando esta caída de tensión a la característica externa, se obtiene el valor de la F.E.M., inducida en el devanado de inducido.



Los valores obtenidos del voltaje terminal, la caída de tensión y la F.E.M. generada en el devanado de inducido para las distintas corrientes de carga, son anotados en la tabla 4. En la figura 4.5, la curva I, nos representa la característica externa y la curva II, el valor de la F.E.M., inducida.

Mediante la característica externa se determina la regulación del voltaje, su valor se halla de la siguiente relación:

$$\epsilon \% = \frac{E_0 - V_{f1}}{V_{f1}} \times 100 \quad (4.3)$$

Luego:

$$\epsilon \% = \frac{50 - 44.6}{44.6} \times 100$$

$$\epsilon \% = 12.10 \%$$

TABLA 4

DATOS OBTENIDOS EN LA CARACTERISTICA EXTERNA

I_b (amps)	V (Volts)	ΔU (Volts)	E (Volts)
0.00	50.00	0.387	50.387
1.00	49.96	1.513	51.473
2.00	49.90	2.639	52.539
3.00	49.85	3.765	53.615
3.50	49.80	4.328	54.128
4.00	49.75	4.891	54.641
4.50	49.50	5.454	54.954
5.00	49.40	6.017	55.417
5.50	49.00	6.580	55.580
6.00	48.50	7.143	55.643
6.50	48.25	7.706	55.956
7.00	48.00	8.269	56.269
7.50	47.50	8.832	56.332
8.00	47.00	9.395	56.395
8.50	46.25	9.958	56.208
9.00	45.50	10.521	56.021
9.50	44.50	11.084	55.584
10.00	43.50	11.647	55.147

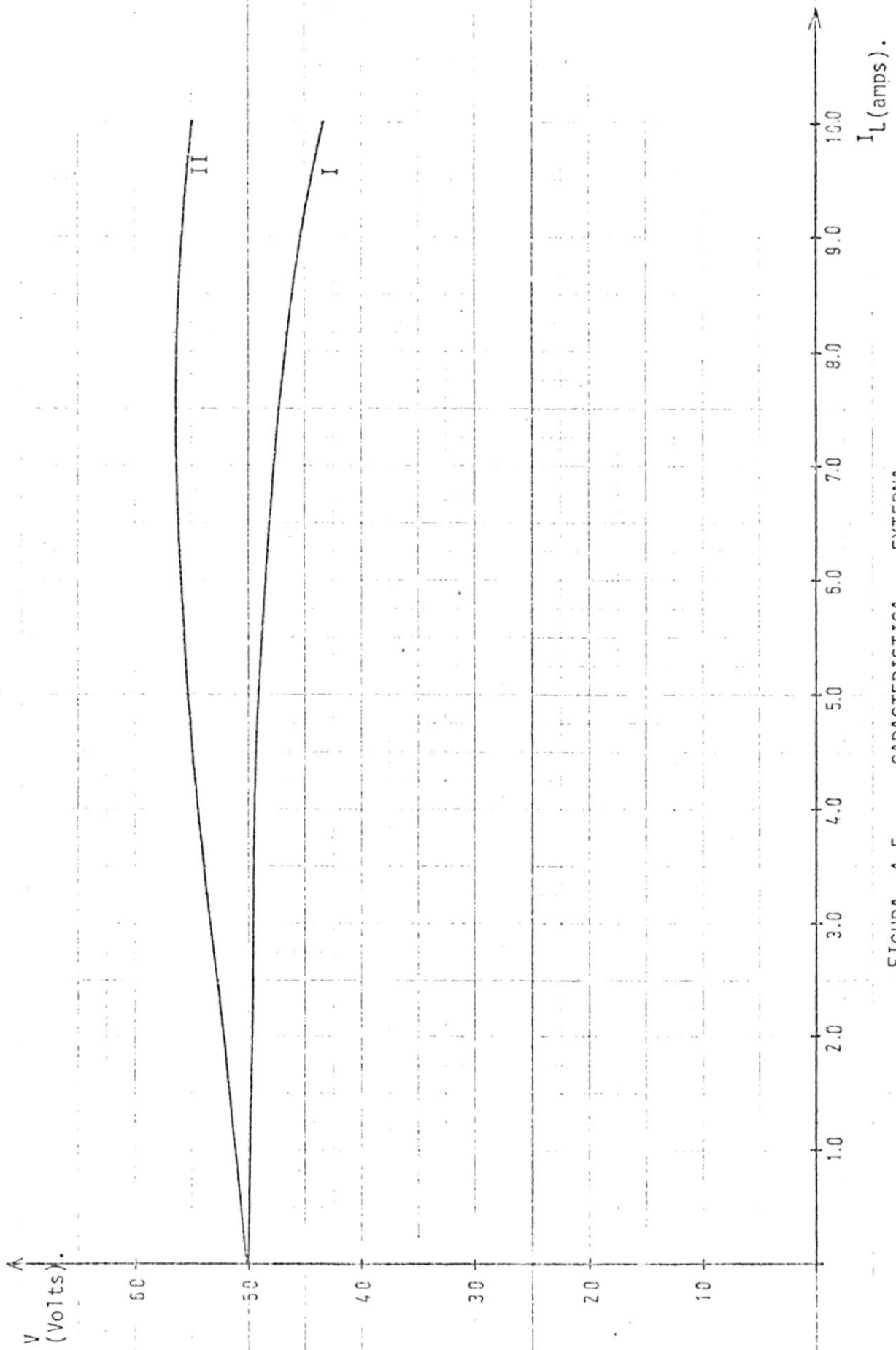


FIGURA 4.5. CARACTERISTICA EXTERNA

4.3.2. Curva de Regulación

La curva de regulación nos da la corriente de campo derivado en función de la corriente de carga $I_f = F(I_L)$, necesaria para tener el voltaje terminal constante a velocidad de rotación constante.

PROCEDIMIENTO

Con los elementos y conexiones utilizados para hallar la característica en carga, y una velocidad de rotación de 1140 RPM, se tomaron las lecturas de corriente de campo derivado para las distintas corrientes de carga, necesaria para tener el voltaje terminal a 50 voltios. Los valores obtenidos son anotados en la Tabla 5 y mostrados gráficamente en la figura 4.6.

TABLA 5

DATOS OBTENIDOS EN LA CURVA DE REGULACION

I_L (amps)	I_f (amps)
0.00	0.500
1.00	0.502
2.00	0.505
3.00	0.515
3.50	0.520
4.00	0.525
4.50	0.530
5.00	0.532
6.00	0.545
6.50	0.553
7.00	0.563
7.50	0.575
8.00	0.590
8.50	0.610
9.00	0.633
9.50	0.660
10.00	0.700

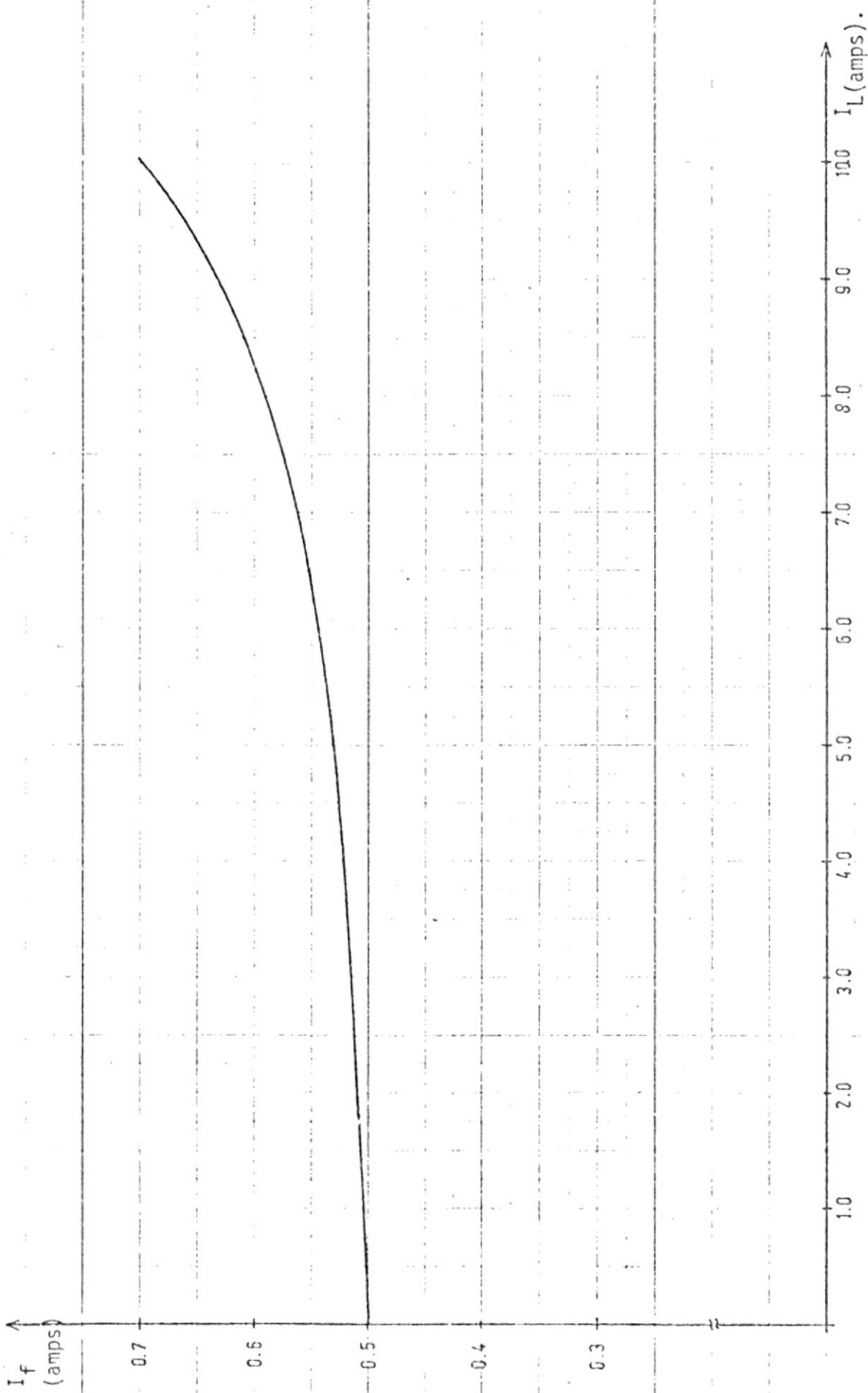


FIGURA 4.6. CURVA DE REGULACION

4.4. PERDIDAS Y RENDIMIENTO

Las pérdidas que se producen en el generador son fuentes de calentamiento que elevan la temperatura de sus diversos órganos, y constituyen por lo general la causa limitadora de la potencia que puede obtenerse del mismo.

El cálculo de las pérdidas se lo realizó considerando - que el generador está funcionando con su carga máxima.

4.4.1. Pérdidas por rozamiento de los cojinetes

Las pérdidas por rozamiento de un cojinete, se las calcula utilizando la siguiente formula: (1)

$$P_{rc} = \frac{l_c d_c \sqrt{V_c^3}}{2} \quad (4.4)$$

Donde:

l_c = longitud del cojinete

d_c = diámetro del muñón.

V_c = velocidad lineal del muñón.

Para el cojinete del lado del acoplamiento, tenemos:

$$l_c = 4.90 \text{ cmts.}$$

$$d_c = 1.72 \text{ cmts.}$$

La velocidad líneal del muñón, a su vez se halla de la siguiente relación:

$$V_c = \frac{\pi \times d_c \times n}{6000} \quad (4.5)$$

De este modo:

$$V_c = \frac{\pi \times 1.72 \times 1140}{6000}$$

$$V_c = 1.027 \text{ metros/seg.}$$

Las pérdidas por rozamiento del cojinete del lado del acoplamiento en base de la ecuación (4.4), son:

$$P_{rc} = \frac{4.90 \times 1.72 \times \sqrt{1.027^3}}{2}$$

$$P_{rc} = 4.384 \text{ vatios.}$$

Para el cojinete del lado del colector, tenemos:

$$l_c = 4.30 \text{ cmts.}$$

$$d_c = 1.85 \text{ cmts.}$$

Además, tenemos que:

$$V_c = \frac{\pi \times 1.85 \times 1140}{6000}$$

$$V_c = 1.104 \text{ metros/seg.}$$

Las pérdidas por rozamiento del cojinete del lado del colector en base de la ecuación (4.4), son:

$$P_{rc} = \frac{4.30 \times 1.85 \times \sqrt{1.104^3}}{2}$$

$$P_{rc} = 4.616 \text{ vatios.}$$

Las pérdidas por rozamiento de ambos cojinetes, son:

$$P_{rc} = 4.384 + 4.616$$

$$P_{rc} = 9.00 \text{ vatios.}$$

4.4.2. Pérdidas por rozamiento de las escobillas

Las pérdidas por rozamiento de las escobillas, se las determina a través de la siguiente ecuación:
(1)

$$P_{re} = 9.81 U_e F_e S_e V_k \quad (4.6)$$

Donde:

U_e = coeficiente de rozamiento entre las escobillas y el colector.

F_e = presión específica de las escobillas

S_e = superficie total de contacto de las escobillas.

V_k = velocidad periférica del colector

El diámetro del colector es $D_k = 5.45$ cmts. y la velocidad periférica del colector, es:

$$V_k = \frac{\pi \times D_k \times n}{6000} \quad (4.7)$$

De este modo:

$$V_k = \frac{\pi \times 5.45 \times 1140}{6000}$$

$$V_k = 3.253 \text{ metros/seg.}$$

La superficie de contacto de las escobillas -
 $S_e = 4.0 \text{ cmts.}^2$, asumiendo una presión unitaria
 de las escobillas $F_e = 0.15 \text{ Kg/cmts.}^2$ y un coeficiente de rozamiento $U_e = 0.25$, tenemos:

$$P_{re} = 9.81 \times 0.25 \times 0.15 \times 4 \times 3.253$$

$$P_{re} = 4.787 \text{ vatios}$$

4.4.3. Pérdidas por Histéresis

Las pérdidas por histéresis por unidad de peso, se las calcula mediante la siguiente relación:

(1)

$$P_h = K_h f (B_{m\acute{a}x})^2 \quad (4.8)$$

Donde:

K_h = coeficiente de histéresis

f = frecuencia

$B_{m\acute{a}x}$ = densidad de flujo máxima

La frecuencia en base de la ecuación (1.18), es:

$$f = \frac{1140 \times 2}{120}$$

$$f = 19 \text{ hertz.}$$

Siendo:

$$K_h = 1.282 \times 10^8$$

$$B_{\text{máx}} = 4.968 \times 10^{-5} \text{ webers/cm}^2.$$

Las pérdidas por histéresis por unidad de peso, son:

$$Ph = 1.282 \times 10^8 \times 19 (4.968 \times 10^{-5})^2$$

$$Ph = 6.012 \text{ vatios/Kg.}$$

El peso del núcleo del inducido es $W_n = 4.7 \text{ Kg.}$,

luego tenemos:

$$Ph = 6.012 \times 4.7$$

$$Ph = 28.256 \text{ vatios}$$

4.4.4. Pérdidas por corrientes de Eddy

Las pérdidas por corrientes parásitas de Eddy o de Foucault por unidad de peso, están dadas por:

(1)

$$Pe = K_e (\Delta f B_{\text{máx}})^2 \quad (4.9)$$

Donde:

K_e = coeficiente de Eddy.

Δ = espesor de las chapas del inducido.

f = frecuencia

$B_{\text{máx}}$ = densidad de flujo máxima

Siendo:

$$K_e = 3.776 \times 10^8$$

$$\Delta = 0.05 \text{ cmts.}$$

$$f = 19 \text{ hertz.}$$

$$B_{\text{máx}} = 4.986 \times 10^{-5} \text{ webers/ cmts.}^2$$

Las pérdidas por corrientes de Eddy por unidad de peso, son:

$$P_e = 3.776 \times 10^8 (0.05 \times 19 \times 4.968 \times 10^{-5})^2$$

$$P_e = 0.841 \text{ vatios/Kg.}$$

Multiplicando por el peso del núcleo del inducido; tenemos:

$$P_e = 0.841 \times 4.7$$

$$P_e = 3.953 \text{ vatios}$$

4.4.5. Pérdidas por efecto Joule en el devanado de inducido

Las pérdidas por efecto Joule en el devanado de inducido, se las calcula utilizando la siguiente ecuación : (1)

$$P_{ji} = I_i^2 \times R_i \quad (4.10)$$

Donde:

I_i = corriente de inducido

R_i = resistencia del devanado de inducido

De acuerdo con las normas del I.E.E.E., estas pérdidas y las pérdidas por efecto Joule en los demás devanados, son calculadas a la temperatura de 25° centígrados.

Siendo:

$$I_j = 10.05 \text{ amperios}$$

$$R_j = 0.675 \text{ Ohmios}$$

Las pérdidas por efecto Joule en el devanado de inducido, son:

$$P_{ji} = 10.05^2 \times 0.675$$

$$P_{ji} = 68.177 \text{ vatios}$$

4.4.6. Pérdidas por efecto Joule en el circuito de campo derivado

Las pérdidas por efecto Joule en el circuito de campo derivado comprenden las pérdidas por efecto Joule en el devanado de campo derivado más las pérdidas en el reóstato en serie con este devanado, de este modo:

$$P_{jc} = I_f^2 \times (R_{fd} + R_{ex}) \quad (4.11)$$

Siendo:

$$I_f = 0.655 \text{ amperios}$$

$$R_{fd} = 74.074 \text{ ohmios}$$

$$R_{ex} = 7.313 \text{ ohmios}$$

Las pérdidas por efecto Joule en el circuito de campo derivado, son:

$$P_{jc} = 0.655^2 \times (74.074 + 7.313)$$

$$P_{jc} = 34.917 \text{ vatios}$$

4.4.7. Pérdidas por efecto Joule en el devanado de campo serie

Las pérdidas por efecto Joule en el devanado de campo serie, están dadas por: (1)

$$P_{js} = I_L^2 \times R_{fs} \quad (4.12)$$

Donde:

I_L = corriente de carga

R_{fS} = resistencia del devanado de campo serie

Siendo:

I_L = 9.40 amperios

R_{fS} = 0.352 ohmios

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior,
tenemos:

$$P_{jS} = 9.40^2 \times 0.352$$

$$P_{jS} = 31.103 \text{ vatios.}$$

4.4.8. Pérdidas por contacto de las escobillas

Se produce pérdidas por efecto Joule en los con-

tactos de las escobillas, el valor de estas pérdidas está dado por: (1)

$$P_{ce} = 2 \times u_e \times I_i \quad (4.13)$$

Donde:

u_e = caída de tensión por escobilla

I_i = corriente de inducido

La caída de tensión en las escobillas depende de la calidad de las mismas.

Siendo:

$u_e = 1.00$ voltios

$I_i = 10.05$ amperios

Las pérdidas por contacto de las escobillas, son:

$$P_{ce} = 2 \times 1.0 \times 10.05$$

$$P_{ce} = 20.1 \text{ vatios}$$

4.4.9. Rendimiento

El rendimiento del generador es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, su valor se halla de la siguiente ecuación: (5)

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + \text{Pérdidas}} \times 100 \quad (4.14)$$

La potencia de salida es:

$$P_{salida} = V_{sal} \times I_L$$

De este modo:

$$P_{salida} = 50 \times 9.40$$

$$P_{salida} = 470 \text{ vatios}$$

El rendimiento en base de las pérdidas obtenidas, es:

$$\eta = \frac{470}{470 + 200.3} \times 100$$

$$\eta = 70.12 \%$$

4.5. LA REGULACION AUTOMATICA DEL VOLTAJE

La variación de la corriente de campo derivado I_f , es necesaria cuando la velocidad de funcionamiento es superior a la velocidad nominal del generador, la regulación automática de ésta corriente se logra con un dispositivo de atracción electromagnética del tipo Tirill.

La resistencia del reóstato de campo R_{ex} (figura 4.7), se ajustó en el valor necesario para obtener la corriente máxima de regulación, el proceso de regulación

tiene lugar en la forma siguiente:

La resistencia de regulación R_{reg} , intercalada en el circuito de campo derivado como lo muestra la figura 4.7, está unida con los contactos C_1 y C_2 . Cuando la armadura A_0 está en reposo, dichos contactos se tocan, quedando la resistencia R_{reg} en corto circuito. Al aumentar el voltaje debido al aumento de la velocidad, la bobina B_1 atrae a la armadura A_0 , separando los contactos C_1 y C_2 .

Así la resistencia R_{reg} queda intercalada en el circuito de campo derivado y la corriente que circula por este circuito disminuye, disminuyendo con ella el voltaje, y la bobina B_1 cesa de atraer a la armadura A_0 . En consecuencia, los contactos C_1 y C_2 vuelven a tocarse, poniendo a R_{reg} en cortocircuito, y la corriente de campo derivado y la tensión aumentan tocándose nuevamente los contactos C_1 y C_2 , y así sucesivamente.

A consecuencia de este proceso periódico que se realiza muy rápidamente, se establece una corriente de campo derivado promedio, cuya magnitud depende de la

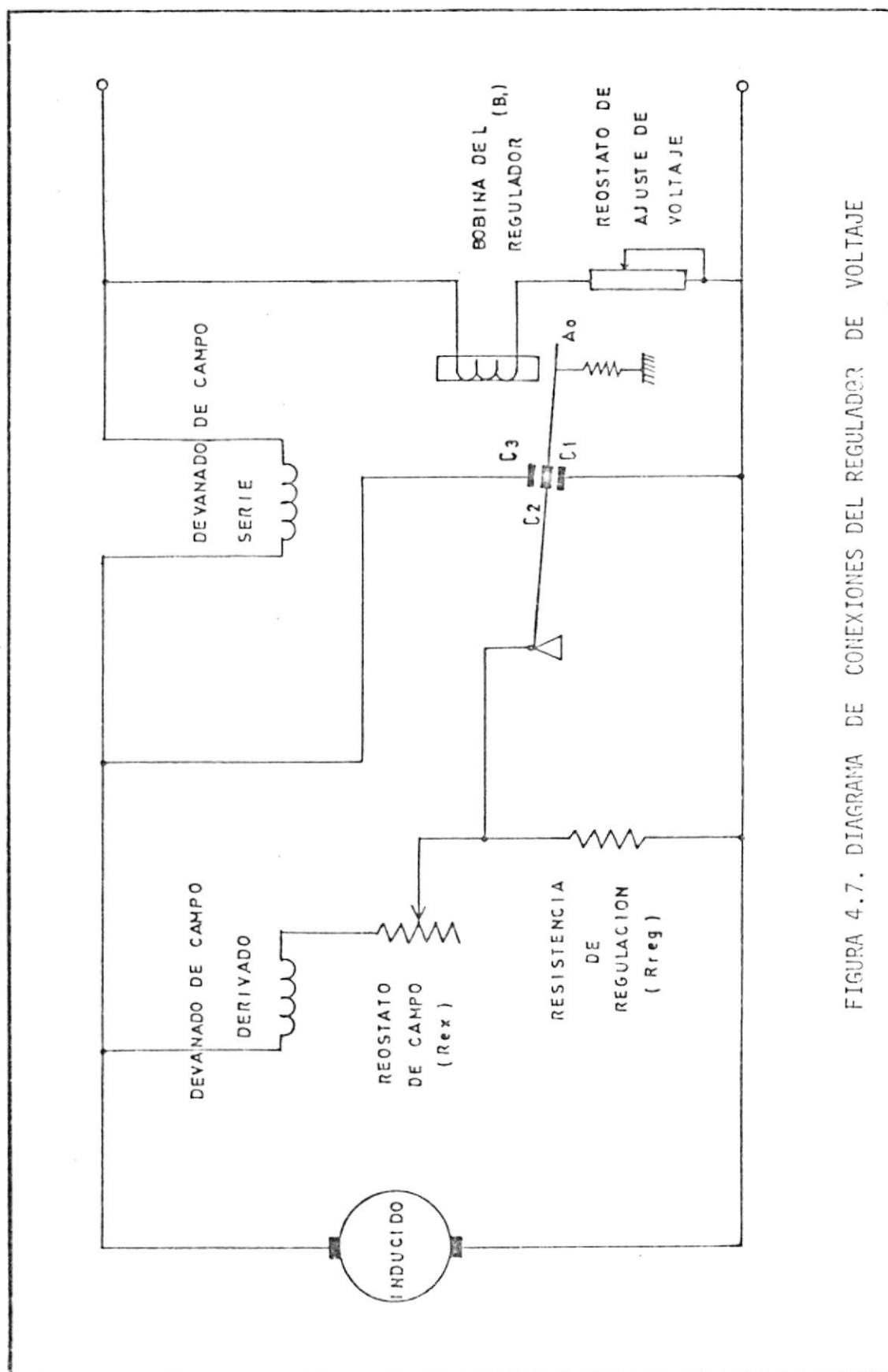


FIGURA 4.7. DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL REGULADOR DE VOLTAJE

velocidad y de la carga del generador.

En la figura 4.8, I_{f1} representa el valor de la corriente de campo derivado estando la resistencia R_{reg} en cortocircuito, e I_{f2} la misma corriente estando dicha resistencia intercalada.

Debido a la inductancia del circuito de campo derivado, la corriente de este circuito no varía súbitamente cuando los contactos C_1 y C_2 se juntan o se separan, sino que el aumento o disminución de dicha corriente tiene lugar tal como lo indican las curvas de trazos 1 y 2. Pero, sin embargo, como la velocidad con que actúan dichos contactos es muy elevada, la corriente de campo derivado sólo puede, durante el breve lapso de tiempo (b) en que los contactos C_1 y C_2 están juntos, recorrer una parte de la curva ascendente, a la cual sucede seguidamente una parte de la curva descendente correspondiente al intervalo (a) en que los contactos C_1 y C_2 están separados.

De este periódico aumento y disminución de la corriente de campo derivado se obtiene valores medios

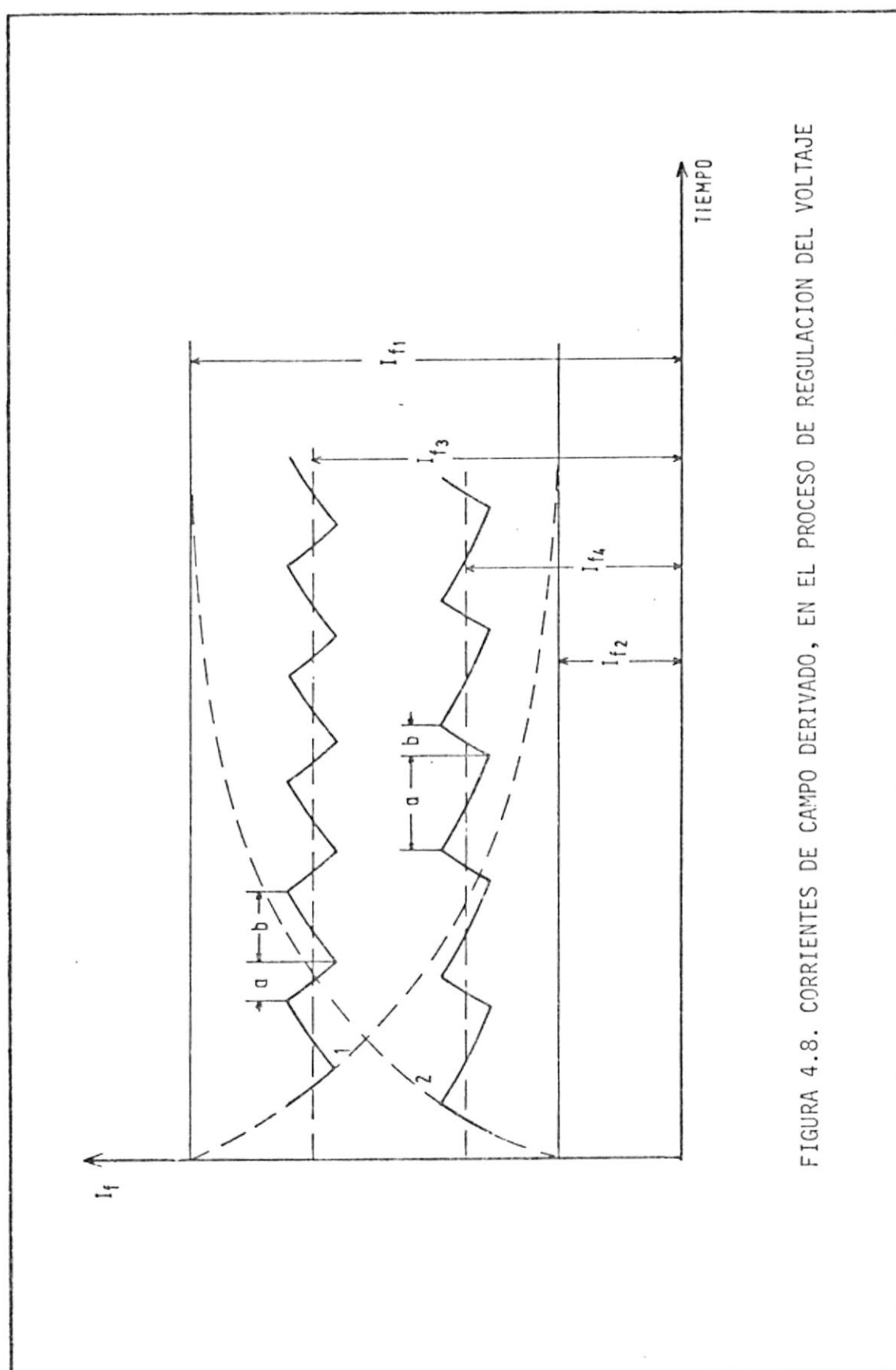


FIGURA 4.8. CORRIENTES DE CAMPO DERIVADO, EN EL PROCESO DE REGULACION DEL VOLTAJE

que designamos por I_{f3} y I_{f4} .

Los contactos se juntan y se separan en forma tal - que al aumentar la velocidad, o sea, al aumentar el voltaje, la resistencia R_{reg} queda intercalada cada vez más tiempo y desconectada cada vez menos tiempo. Si la resistencia está conectada permanentemente, es decir, si la armadura A_0 oscila en su posición me dia sin que los contactos C_1 y C_2 se toquen ya más entonces habremos agotado el margen de regulación de este par de contactos.

Al aumentar la velocidad todavía más, la fuerza de atracción de la bobina B_1 aumenta tanto que la armadura A_0 es llevada hasta el contacto C_3 . Este con tacto está unido con la otra extremidad del devanado de campo derivado en forma tal que cuando el contacto C_2 le toca, este devanado queda en cortocircuito. Con ello baja la corriente de campo derivado y el - voltaje del generador, la bobina B_1 no puede ya man tener unidos los contactos C_2 y C_3 y la armadura A_0 oscila nuevamente en su posición media, de modo que la corriente de campo derivado y el voltaje vuelven a aumentar. Este proceso se repite ahora periódicamen te para los contactos C_2 y C_3 , dando lugar a que se

establezca una corriente todavía menor.

4.5.1. Oscilogramas

En el laboratorio, utilizando un osciloscopio y a través de un sistema de fotografía Polaroid, se obtuvieron los siguientes oscilogramas.

En la foto N° 1, se observa la onda del voltaje generado, debido a la rectificación del voltaje - se obtiene un rizado que es característica de los generadores de corriente directa. El escala miento vertical es de 10 voltios/div., y el escalamiento de tiempo es de 5 milisegundos/div.

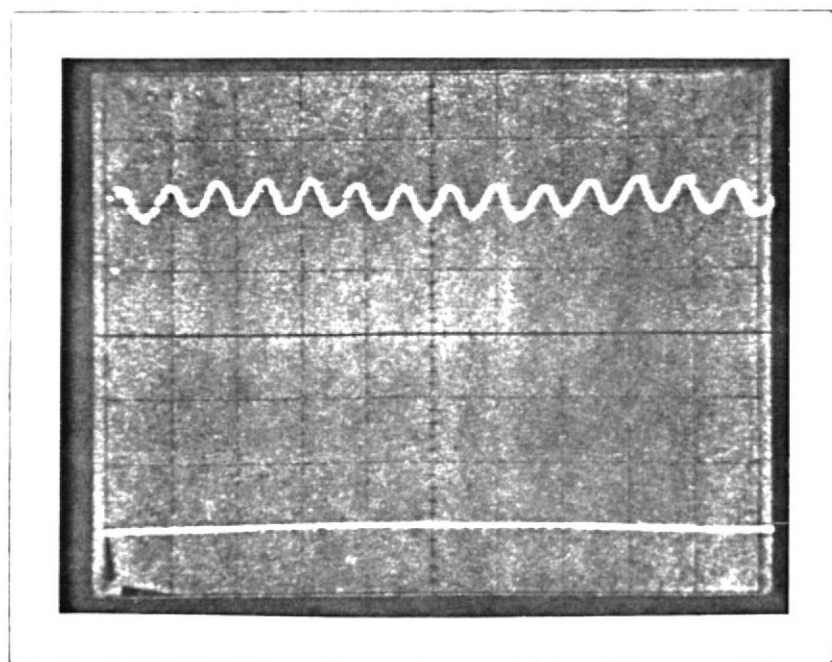


FOTO N°1. VOLTAJE TERMINAL

En la foto N^o 2 se observa la corriente de campo derivado en el proceso de regulación del voltaje, para una velocidad de rotación de 1300 RPM, estando el generador sin carga conectada. El escalamiento vertical es de 0.1 amp/div. y el escalamiento de tiempo es de 10 milisegundos/div.

En la foto N^o 3, se observa la corriente de campo derivado en el proceso de regulación del voltaje, para una velocidad de rotación de 1500 RPM, estando el generador sin carga conectada. El escalamiento vertical es de 0.1 amp/div. y el escalamiento de tiempo es de 10 milisegundos/div.

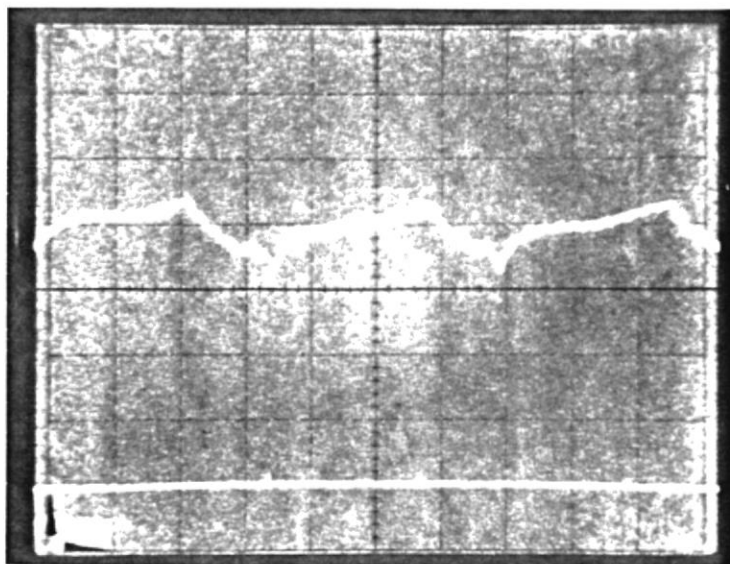


FOTO N° 2. CORRIENTE DE CAMPO DERIVADO EN EL PROCESO DE REGULACION DEL VOLTAJE, A UNA VELOCIDAD DE 1300 RPM.

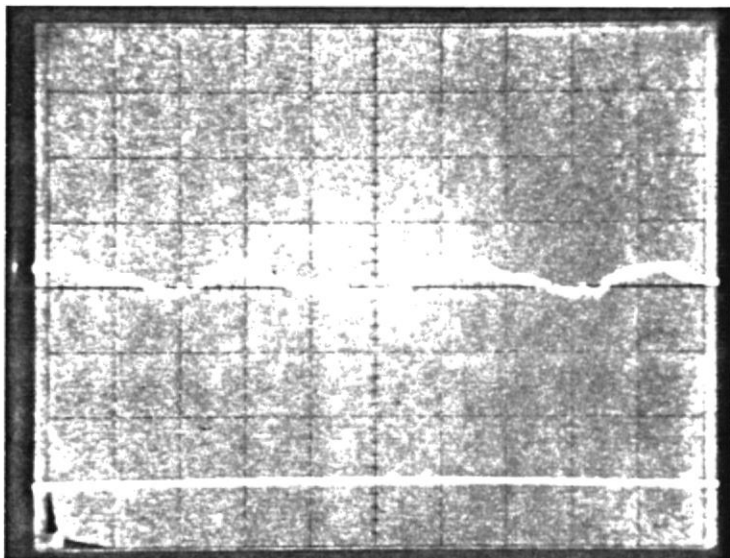


FOTO N° 3. CORRIENTE DE CAMPO DERIVADO EN EL PROCESO DE REGULACION DEL VOLTAJE, A UNA VELOCIDAD DE 1500 RPM.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha diseñado y construido un generador de corriente directa, de excitación compuesta acumulativa, a partir de un generador convencional.

La velocidad utilizada para el diseño es de 1140 RPM, - siendo esta velocidad mucho menor que la velocidad para la cual estaba inicialmente diseñado, se redujo su potencia de salida.

Con el propósito de comprobar experimentalmente las características de diseño del generador, se realizaron pruebas de laboratorio y se determinaron sus principales características.

Dentro de las características de operación de este generador, se observa una velocidad variable de funcionamiento, lo cual es factible mediante el uso de un regulador automático de voltaje.

Por estar destinada su utilización a la carga de bate

rías, es recomendable su uso con un regulador elástico - de tensión, con este sistema de regulación el voltaje - terminal se adapta al estado de las baterías de acumuladores, y dichas baterías pueden quedar cargadas con toda seguridad.

En el diseño de este generador para las características dadas, el rango de voltaje en que puede operar normalmente está entre 33 y 60 voltios, un rango mayor de voltaje se consigue disminuyendo el grado de composición - del generador.

Pruebas de calentamiento registraron una elevación de temperatura de 50°C sobre la temperatura ambiente (28°C), con el propósito de mejorar la refrigeración del generador - es recomendable la utilización de aletas de ventilación.

Para la elaboración de las bobinas de campo derivado, se utilizó dos conductores de sección equivalente a 0.23 mm^2 las condiciones de regulación mejorarían usando conductores de $0,28\text{ mm}^2$ de sección.

A P E N D I C E S

APENDICE A

MATERIALES AISLANTES

Pruebas realizadas sobre varios tipos de materiales utilizados como aislantes han demostrado que para cada material existe una temperatura de seguridad, en servicio continuo, que no se puede sobrepasar sin dañar el material. La tabla A-1, muestra las temperaturas límites para las diferentes clases de aislamiento tal como las especifica el A.I.E.E.

De acuerdo con esta tabla se distinguen cuatro clases de aislamientos. El aislamiento de la clase 0 está constituido por algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares, sin impregnar ni sumergir en aceite. El aislamiento de la clase A está constituido por algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares impregnados o sumergidos en aceite; también el esmalte que se aplica a los conductores. El aislamiento de la clase B está constituido por materiales inorgánicos, como cristal, mica o amianto en forma compuesta, combinados con sustancias aglomerantes.

Las sustancias aglomerantes y los barnices a base de silicona constituyen un nuevo desarrollo en el campo de los materiales aislantes.

Estos aglomerantes y barnices usados conjuntamente con los materiales inorgánicos de la Clase B, producen un aislamiento que es capaz de resistir temperaturas más altas que el aislamiento de la Clase B, a este tipo de aislamiento se lo ha designado como aislamiento de la clase H el cual está formado por mica, amianto, fibra de vidrio y otros materiales inorgánicos similares como unión con sustancias a base de compuestos de silicona o materiales con propiedades similares; compuestos de silicona en forma de gomas y resinas, o materiales con propiedades equivalentes en pequeñas proporciones.

TABLA A.1.
LIMITES DE TEMPERATURA PARA LAS DIFERENTES CLASES DE AISLAMIENTO

CLASE DE AISLAMIENTO	TERMOMETRO (°C)	DETECTOR INCLUIDO (°C)	PUNTO CALIENTE (°C)
0 Materiales orgánicos en bruto	75	85	90
A Materiales orgánicos tratados o impregnados	90	100	105
B Materiales inorgánicos tratados o impregnados	110	120	130
H Materiales inorgánicos orgánicos tratados o impregnados.	—	—	180

APENDICE B

AISLAMIENTO DE LOS DEVANADOS

a. DEVANADO DE INDUCIDO

El aislamiento de una máquina eléctrica debe de tener las siguientes características: debe de presentar una cierta resistencia dieléctrica, para soportar las diferencias de tensión entre los propios conductores y entre los conductores y el núcleo de hierro.

Según las normas del A.I.E.E., el devanado de inducido debe ser capaz de resistir, durante un minuto, una diferencia de tensión entre los conductores y el núcleo de hierro de 2 veces la tensión nominal más 1000 voltios. El aislamiento debe ser capaz de resistir ciertos aumentos de temperatura, y debe tener una elevada conductividad calorífica; debe ser capaz de resistir la humedad y, en ciertas condiciones, el aceite, la suciedad conductora y abrasiva, y diferentes clases de productos químicos. Además, debe ocupar tan poco espacio como sea posible.

Las bobinas del inducido fueron devanadas con hilo de cobre de sección circular con aislamiento de esmalte, que lo clasifica en el aislamiento de la clase A, con un límite máximo de temperatura de 105°C.

Para el aislamiento de las bobinas y el hierro se utilizó papel milarbón recubierto de fibra, utilizándose el doblar de las puntas como protección mecánica del aislamiento de la bobina contra los bornes de la laminación.

b. DEVANADOS DE CAMPO

Las bobinas de campo o de excitación de los generadores de corriente directa son bobinas concentradas. Para la elaboración de estas bobinas se utilizó conductores de cobre con aislamiento de esmalte, además toda la bobina es impregnada de barniz para evitar espacios de aire entre los conductores, puesto que tales espacios de aire permiten la penetración de la humedad en la bobina y también evitan el flujo de calor desde el interior de la bobina a la superficie, donde se disipa.

APENDICE C

ESTIMACION DE LA POTENCIA OBTENIBLE DEL VIENTO

El viento es masa de aire en movimiento, y cuando esta masa tiene velocidad la energía cinética que tiene es proporcional a $1/2 \times \text{masa} \times (\text{velocidad})^2$.

Si ρ es la densidad del aire, V la velocidad del viento y A una área a través de la cual el viento pasa normalmente, la masa de aire pasando en una unidad de tiempo es ρAV y la energía cinética que pasa a traves del área en una unidad de tiempo es:

$$P = 1/2 \cdot \rho AV \cdot V^2 = 1/2 \rho AV^3.$$

Esta es la potencia total disponible en el viento. Por extracción de una máquina movida por el viento, solamente una fracción de ésta potencia puede ser realmente extraída.

La fracción máxima de la potencia del viento el cual

podría ser extraída por un aero-motor ideal es 0.593. Si ésta fracción es aplicada, la fórmula para la potencia máxima teóricamente obtenible es $0.593 \times \frac{1}{2} \rho A V^3$.

Por las imperfecciones aero-dinámicas en cualquier máquina práctica y por las pérdidas eléctricas y mecánicas, la potencia extraída es menor que la calculada arriba - así que, en la práctica, el factor multiplicante no puede ser más grande que aproximadamente 0.4 (en vez de 0.593) y puede ser menor. Su valor actual dependerá sobre el tipo y diseño detallado de la máquina y sobre las condiciones de operación.

Uno de los puntos más importantes en el diseño de generadores movidos por el viento es la "velocidad del viento nominal", o sea, la velocidad del viento - más baja en la cual la potencia total de salida es producida, a velocidades del viento más altas tanto la potencia total de salida así como la velocidad de rotación están limitadas por mecanismos de control.

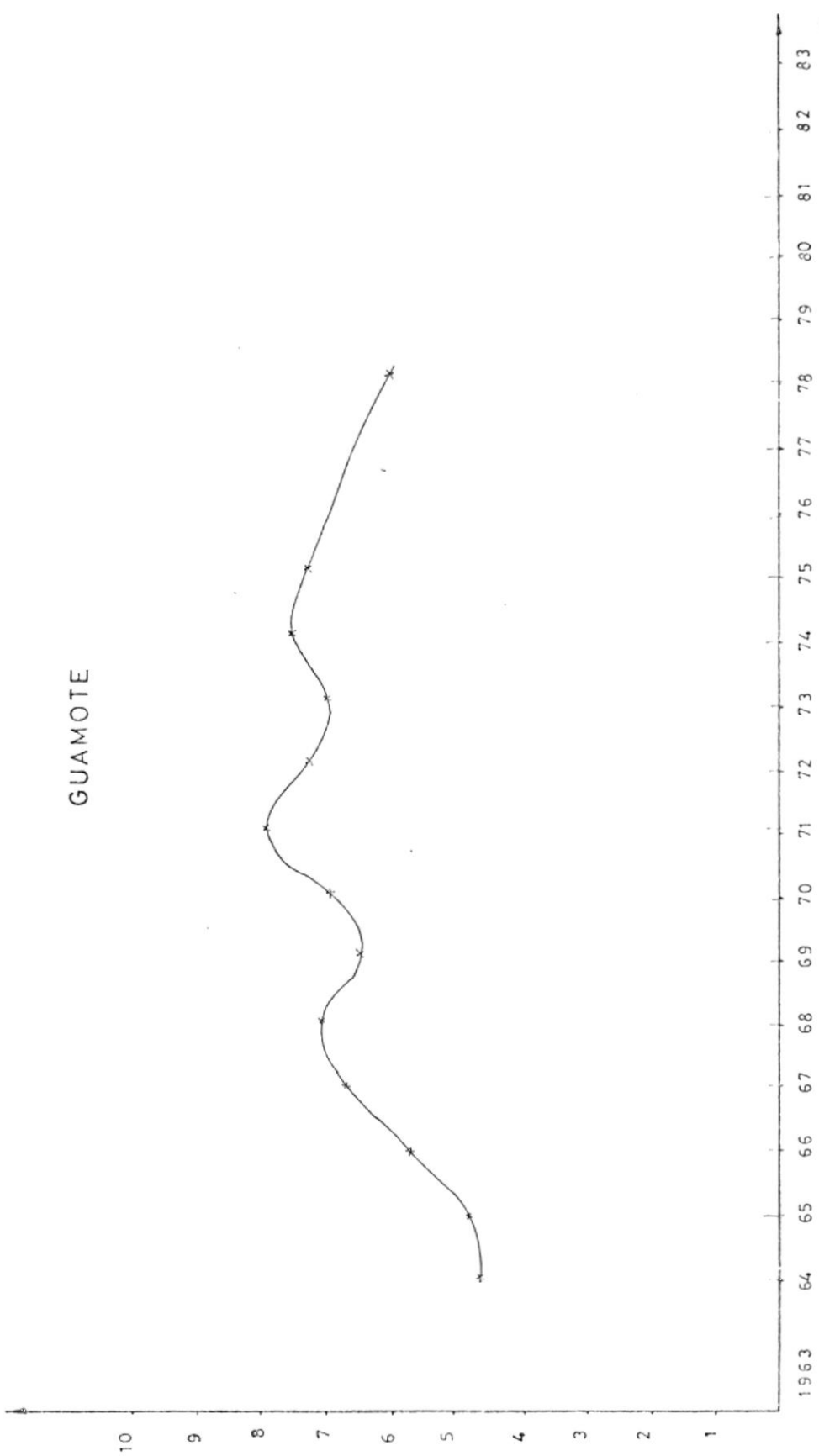
En el caso de nuestro modelo de generador, a la velocidad del viento nominal se tendría una velocidad de rotación de valor cercano a la velocidad de rotación máxima, de este modo el proceso de carga se ini

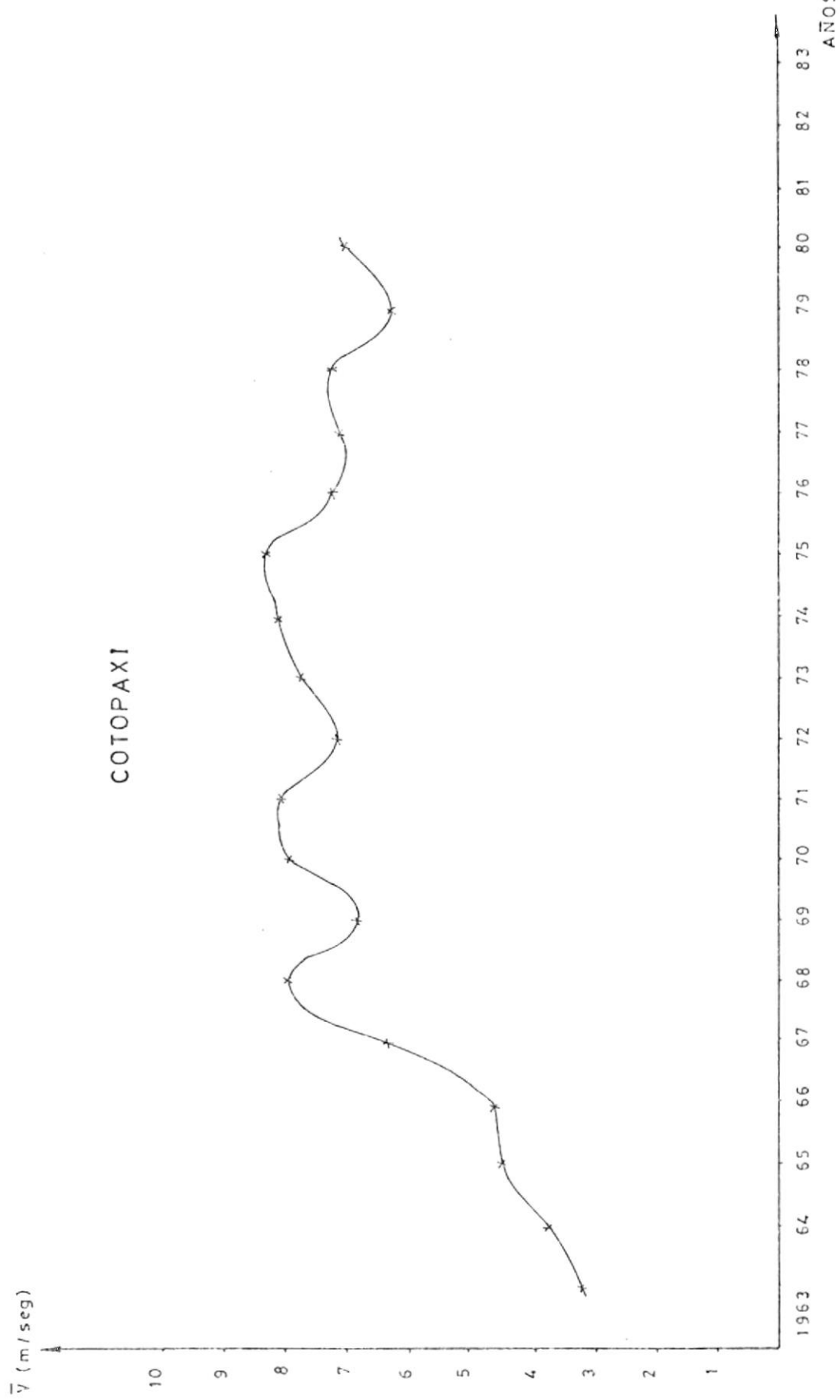
cia a bajas velocidades existiendo por lo tanto un mayor aprovechamiento de energía.

Con la finalidad de dar a conocer algunos de los reursos eólicos con los que cuenta el país, en las figuras siguientes, en base a datos proporcionados por el Instituto Metereológico presentamos los datos estadísticos de los promedios anuales de la velocidad del viento en algunos lugares del Ecuador.

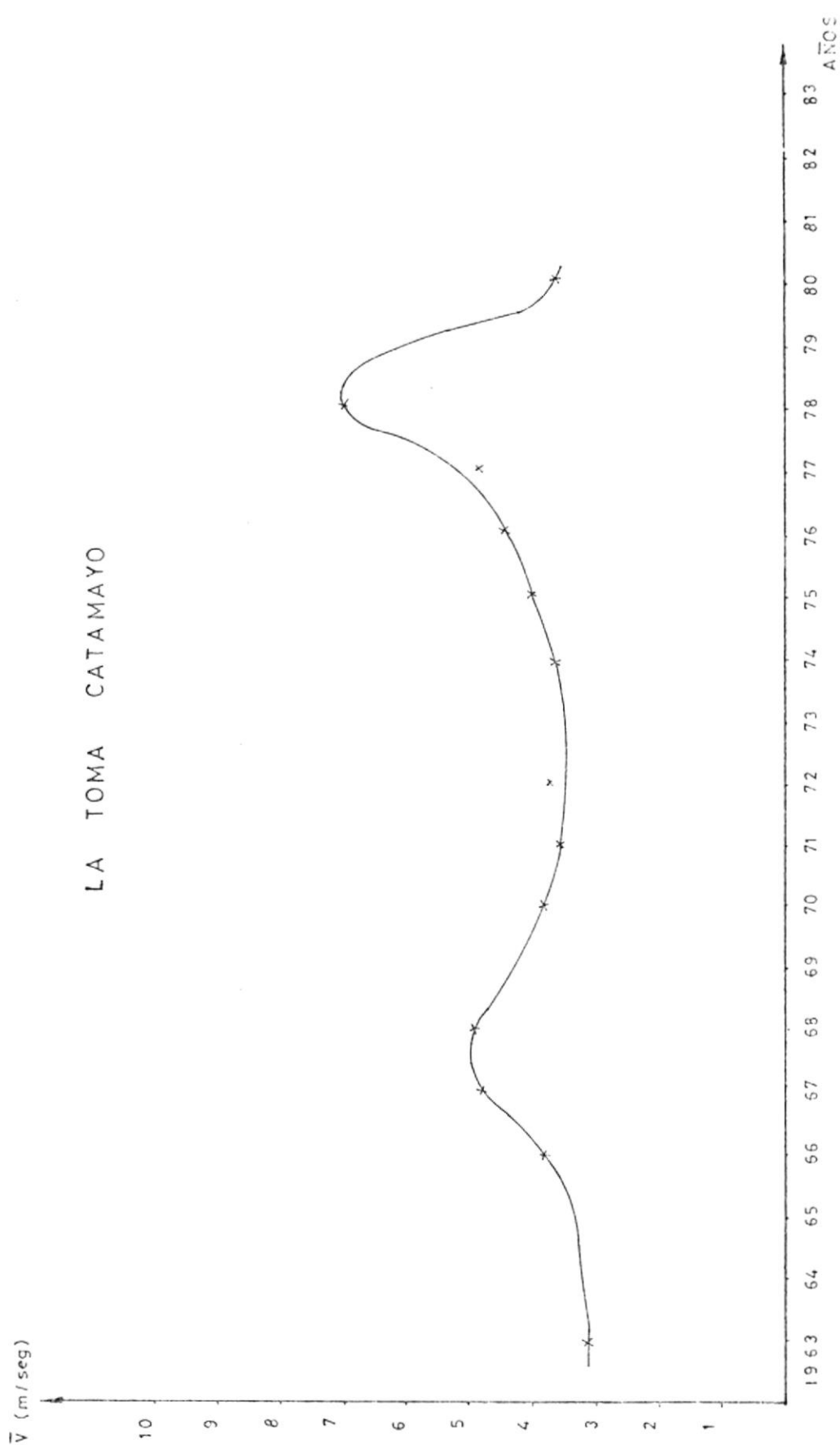
\bar{V} (m./seg)

GUAMOTE





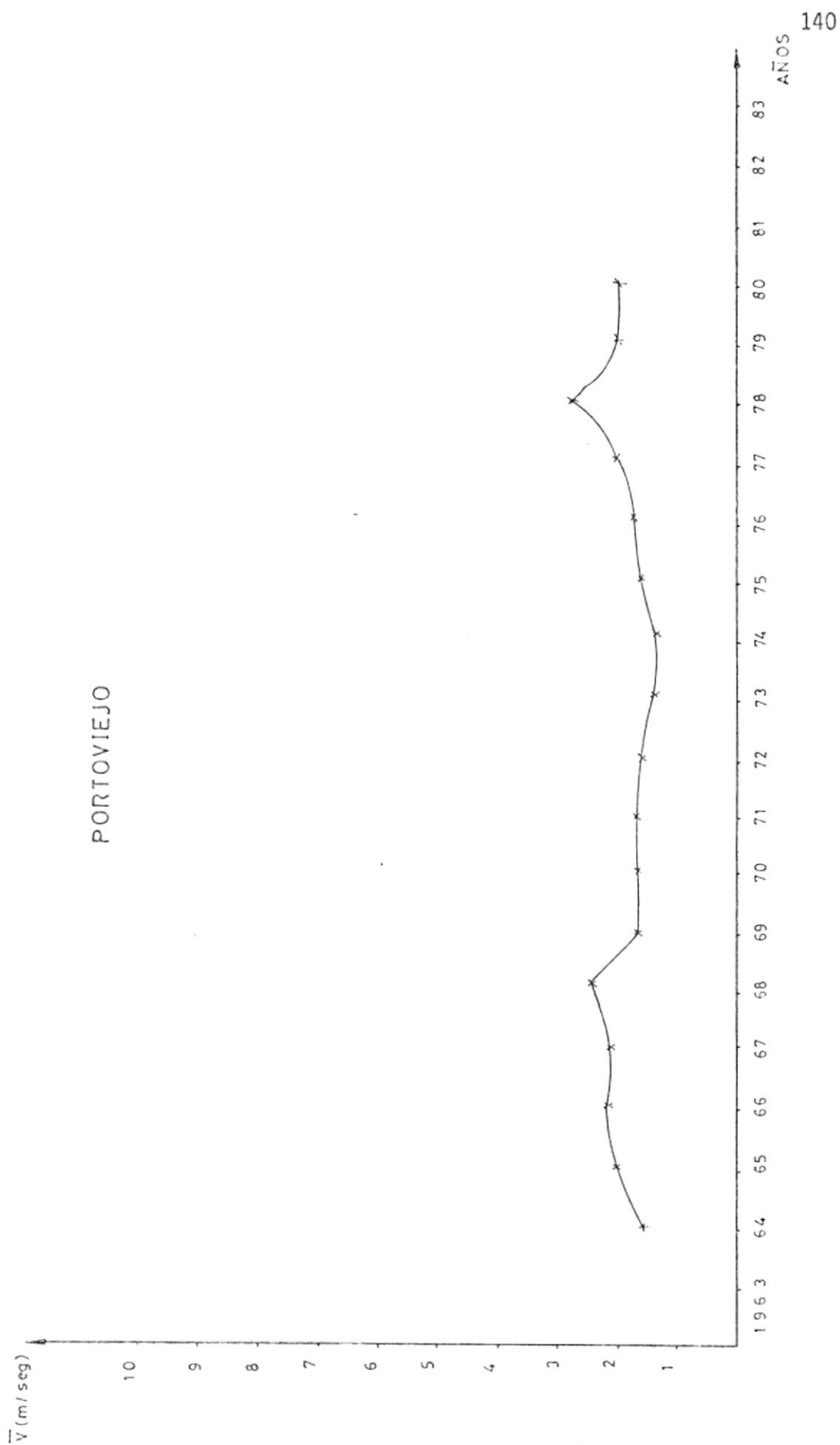
LA TOMA CATAMAYO



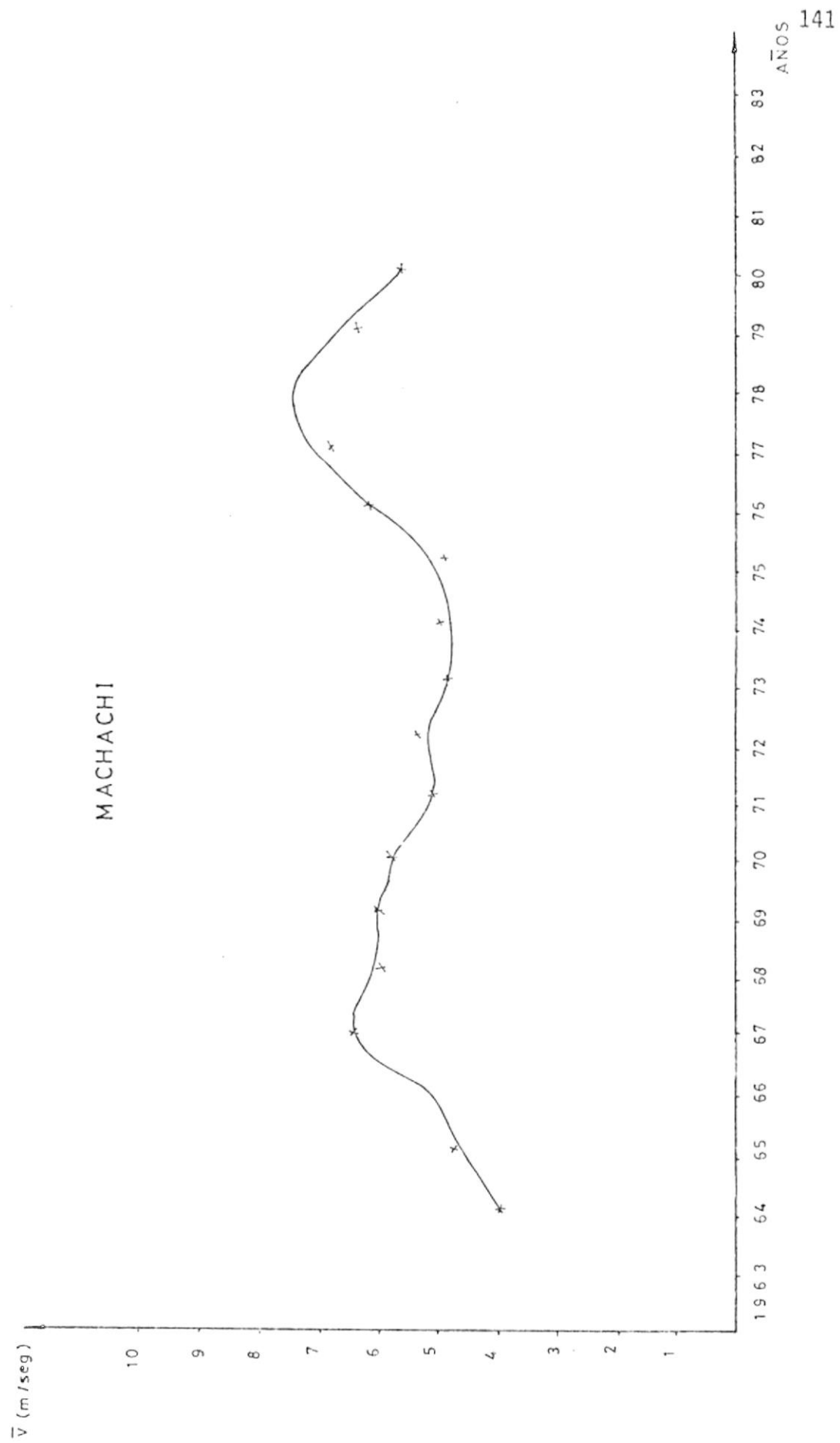
GUAYAQUIL



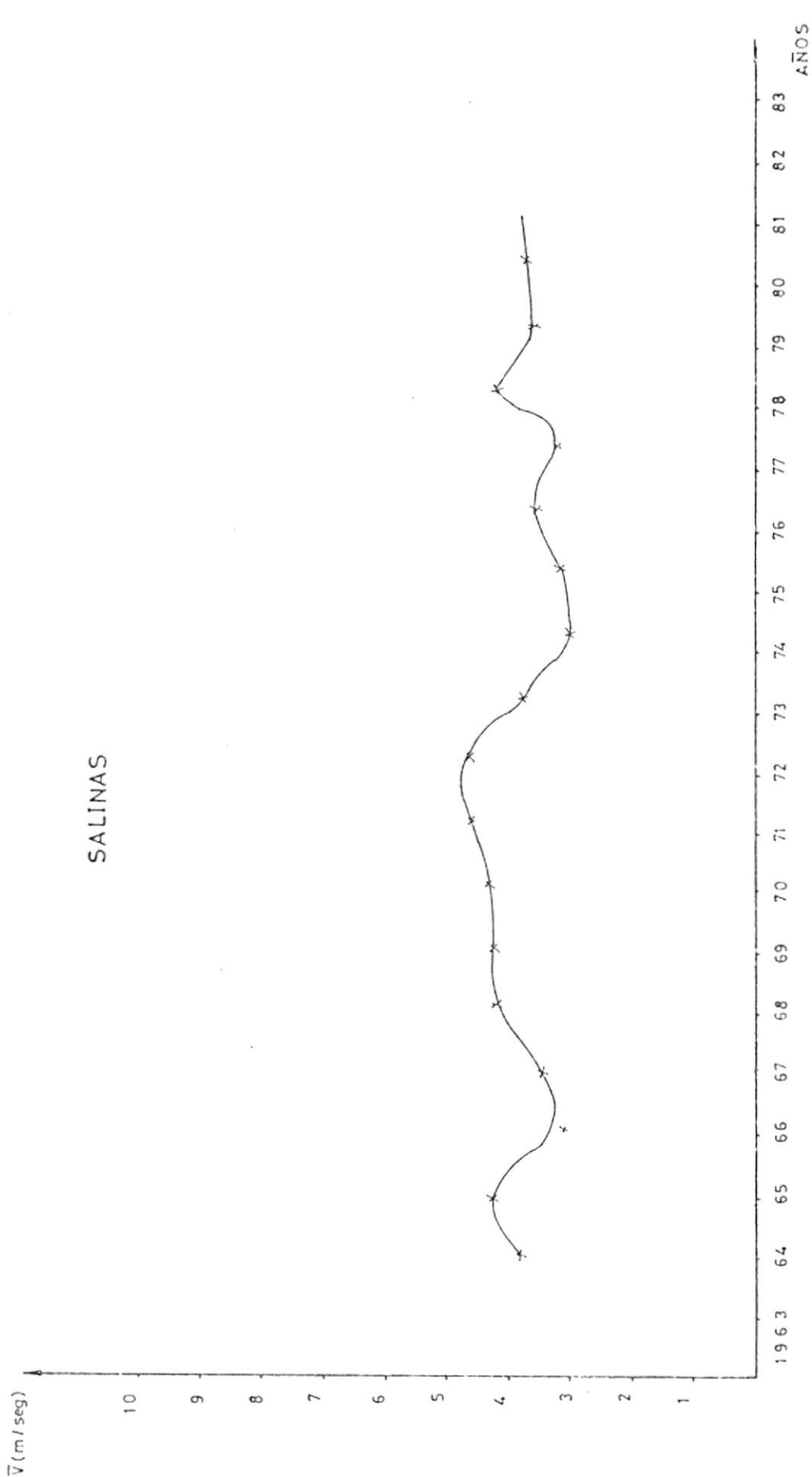
PORTOVIEJO



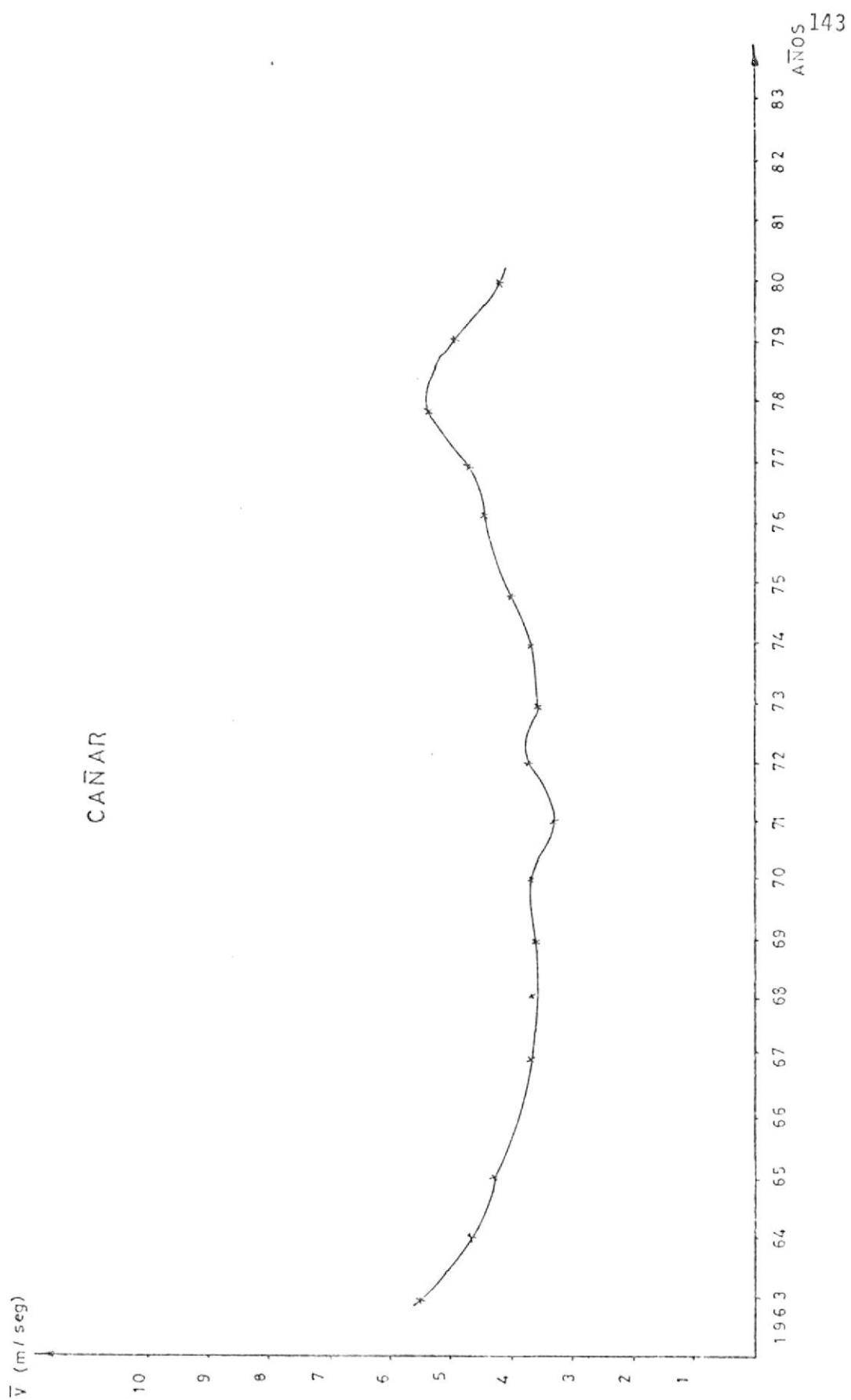
MACHACHI



SALINAS



CAÑAR



A N E X O S

PRUEBAS DE LABORATORIO

Cuando se diseñan y construyen generadores eléctricos, es necesario realizar ciertas pruebas en un laboratorio, mediante estas pruebas se determinan las principales características de su funcionamiento.

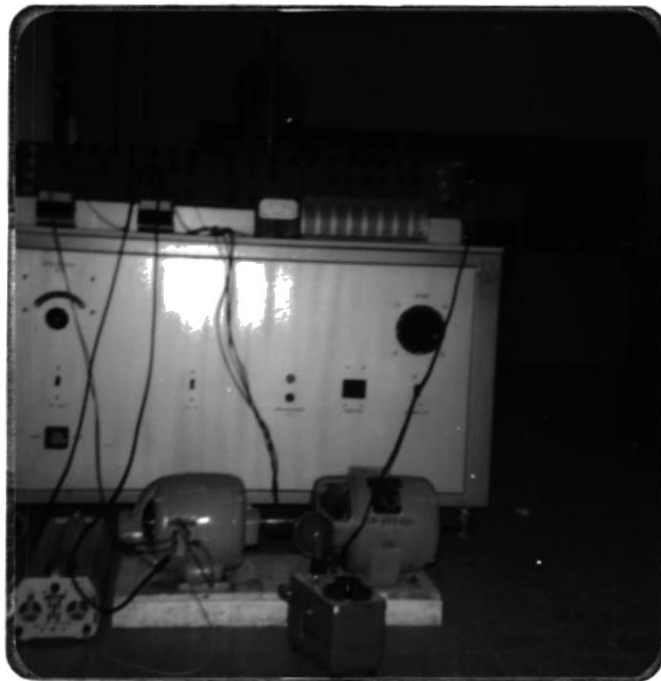


FIGURA A: DETERMINACION DE LA CARACTERISTICA EN VACIO

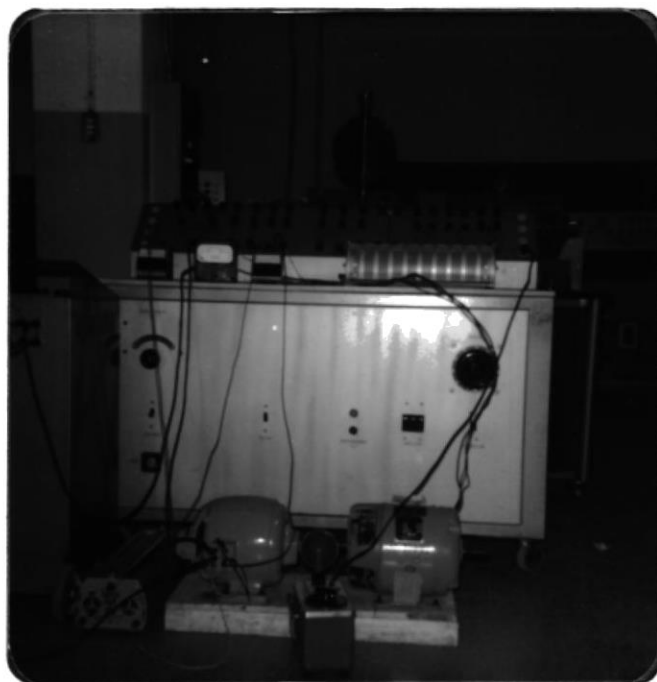


FIGURA B: DETERMINACION DE LA CARACTERISTICA EN CARGA



FIGURA C: DETERMINACION DE LA CARACTERISTICA EXTERNA



B I B L I O G R A F I A

1. CORRALES J., CALCULO INDUSTRIAL DE MAQUINAS ELECTRICAS, 1948 , 590 p.
2. GOLDING., THE GENERATION OF ELECTRICITY BY WIND POWER, 1976, 332 p.
3. KLOEFFLER G., DIRECT CURRENT MACHINERY, 1948, 395 p.
4. KUHLMANN J., DISEÑOS DE APARATOS ELECTRICOS, 1959, 559 p.
5. LIWSCHITZ M., MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA, 1972, 374 p.
6. MATSCH L., MAQUINAS ELECTROMECAICAS Y ELECTROMAGNETICAS, 1972, 523 p.
7. RAMIREZ J., ESQUEMAS CEAC DE ELECTRICIDAD, 101 ESQUEMAS DE BOBINADOS DE CORRIENTE CONTINUA, 1980, 254 p.
8. SISKIND., ELEMENTS OF ELECTRICAL MACHINE DESIGN, 1954, 445 p.

9. TRENKMANN., TEORIA, CALCULO Y CONSTRUCCION DE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA, 1971, 443 p.