

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"PROTOTIPO DE UN GENERADOR DE RELUCTANCIA"

TESIS PREVIA LA OBTENCION DEL  
TITULO DE INGENIERO ELECTRICO,  
ESPECIALIZACION POTENCIA DE LA  
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

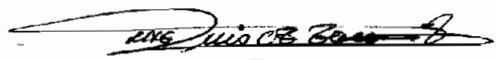
PEDRO FERNANDO TOINGA VINCENT

QUITO JULIO 1985



CERTIFICACION

Certifico que el Señor Pedro  
Fernando Toinga Vincent  
realizó el presente trabajo  
para la obtención del título  
de Ingeniero Eléctrico en la  
Especialización Potencia.



Ing. Luis Taco

DIRECTOR DE TESIS

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

Al culminar este trabajo, cúpleme agradecer a los miembros de la Facultad de Ingeniería Eléctrica que han hecho posible la culminación de mi carrera universitaria.

Al Ing. Luis Taco, Director de Tesis, por su buena voluntad y ayuda incondicional prestada, haciendo posible la realización de la presente tesis; igualmente al señor Marco Rueda por su valiosa colaboración en la construcción de las partes mecánicas del generador.

Mi reconocimiento final a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, a ECUATRAN S.A. por proveer el material para las láminas, y a todas aquellas personas que hicieron posible la misma. Para todos ellos mi gratitud imperecedera y mi sincero agradecimiento.

## PROLOGO

-----

\*\*\*\*\*

En la presente tesis se describe la forma de funcionamiento de un generador de Reluctancia. Se realiza un análisis teórico matemático, se detalla los pasos seguidos para el diseño, las limitaciones que se tienen con respecto a la tecnología de construcción y a los materiales que se pueden conseguir en nuestro país.

## INDICE

	Pag.
INTRODUCCION .....	1
 CAPITULO I: ESTUDIO TEORICO	
1.1 Generalidades .....	5
1.2 Elementos de la máquina .....	5
1.3 Circuito magnético .....	6
1.3.1 Deducción de la ecuación general de voltaje para la máquina de reluctancia .....	10
1.3.1.1 Ecuación de la máquina de reluctancia en función de la inductancia (L) .....	14
1.4 Estudio de la diferentes configuraciones del estator y del rotor .....	17
1.4.1 Estator .....	17
1.4.2 Rotor .....	19
1.4.3 Forma del rotor y estator .....	19

1.5	Condiciones que debe cumplir el circuito magnético .....	20
1.6	Circuito eléctrico .....	21
1.7	Condiciones del circuito electromagnético equivalente .....	22
1.7.1	Parámetros y elementos presentes .....	23
1.7.2	Pérdidas .....	24
1.7.3	Reacción de inducido .....	27
1.7.4	Circuito equivalente .....	29
1.8	Circuito electromagnético para el generador de reluctancia .....	30
1.9	Ecuaciones de velocidad sincrónica y frecuencia.	32
1.10	Reactancias, inductancias de eje directo y en cuadratura .....	37
1.11	Detalles constructivos generales .....	38

## CAPITULO II: GENERADOR DE RELUCTANCIA BIFASICO

### ANALISIS TEORICO

2.1	Generalidades .....	42
2.2	Circuito magnético .....	43
2.3	Circuito eléctrico .....	45
2.3.1	Circuito electromagnético .....	46
2.4	Formulación matemática .....	47
2.5	Reluctancia, permeancia, inductancia .....	53
2.6	Velocidad sincrónica y frecuencia .....	56

2.7	Detalles constructivos .....	56
-----	------------------------------	----

CAPITULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL GENERADOR  
BIFASICO DE RELUCTANCIA

3.1	Generalidades .....	58
3.2	Diseño. Parámetros constructivos .....	59
3.3	Fuerzas y elementos presentes .....	60
3.4	Dimensiones del estator y rotor .....	61
3.5	Dimensionamiento de los devanados .....	64
3.6	Cálculo del eje y de la base .....	66
3.7	Proceso de construcción .....	68
3.7.1	Lista de Materiales .....	70
3.7.2	Planos de las matrices para la construcción de las láminas del estator y del rotor.....	76
3.7.3	Planos del generador de reluctancia .....	94
3.7.4	Fotografías .....	105

CAPITULO IV: PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1	Generalidades .....	109
4.1.1	Diagrama del generador .....	110
4.1.2	Instrumentos y elementos utilizados .....	113
4.1.3	Pruebas preliminares .....	114
4.2	Pruebas como generador monofásico .....	116
4.3	Pruebas monofásicas .....	116
4.3.1	Medida de la resistencia de los bobinados ..	116
4.3.1.1	Voltaje máximo permisible en cada bobinado	119

	Pag.
4.3.2 Prueba de generación de voltaje .....	122
4.3.3 Pruebas de vacío .....	126
4.3.3.1 Cuadros de valores .....	126
4.3.3.2 Formas de ondas de voltaje de armadura ...	133
4.3.3.3 Características en vacío del generador de reluctancia .....	136
4.3.4 Influencia de la velocidad en las formas de onda de voltaje de armadura .....	145
4.3.4.1 Cuadros de valores .....	145
4.3.4.2 Formas de onda de voltaje de armadura con la variación de la velocidad .....	151
4.3.4.3 Características de velocidad del generador de reluctancia .....	153
4.3.5 Prueba de cortocircuito .....	161
4.3.5.1 Cuadros de valores .....	161
4.3.5.2 Formas de onda de corriente .....	168
4.3.5.3 Características de corriente de campo - corriente de armadura .....	170
4.3.6 Pruebas de carga .....	179
4.3.6.1 Cuadros de Valores .....	179
4.3.6.2 Formas de ondas de voltaje y de corriente a terminales de la armadura (pruebas de car- ga) .....	208
4.3.6.3 Características de voltaje de armadura - carga (pruebas de carga) .....	213
4.3.6.4 Regulación de voltaje .....	237
4.3.7 Inductancias propias y mutuas .....	238



4.3.8	Efecto en el voltaje generado con la variación del voltaje de campo .....	240
✓ 4.4	Pruebas bifásicas .....	243
4.4.1	Medida de la resistencia .....	244
4.4.1.1	Voltaje máximo permisible en cada bobinado .....	246
4.4.1.2	Voltaje de campo .....	249
✓ 4.4.3	Prueba de vacío .....	250
4.4.3.1	Cuadros de valores .....	250
✓ 4.4.3.2	Formas de onda de voltaje de armadura en la prueba de vacío .....	254
4.4.3.3	Características en vacío del generador bifásico de reluctancia .....	257
4.4.4	Influencia de la velocidad en las formas de onda de voltaje de armadura .....	261
4.4.5	Prueba de cortocircuito .....	262
4.4.5.1	Cuadros de valores .....	262
4.4.5.2	Formas de onda de corriente .....	266
4.4.5.3	Características de corriente de armadura - corriente de campo .....	268
✓ 4.4.6	Pruebas de carga .....	272
4.4.6.1	Cuadros de valores .....	272
4.4.6.2	Formas de ondas de voltaje y de corriente de armadura .....	282
4.4.6.3	Características de voltaje de armadura - corriente de armadura .....	291
4.4.6.4	Regulación de voltaje .....	301

	Pag.
4.4.7 Inductancias propias y mutuas .....	302
4.4.8 Efecto en el voltaje generado con la varia- ción del voltaje de campo .....	303
4.5 Prueba con voltaje de corriente continua pro- veniente de baterías .....	303
4.6 Formulación de los parámetros nominales del prototipo .....	303
 CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.  	
5.1 Conclusiones .....	305
5.2 Recomendaciones .....	315
Apéndices .....	317
Bibliografía .....	343

## I N T R O D U C C I O N

### JUSTIFICATIVO Y ALCANCE DEL TEMA

El presente trabajo ha sido realizado por etapas y con el esfuerzo de varias personas; el propósito del mismo es tener una visión del funcionamiento del generador de voltaje por la variación de la Reluctancia de una máquina eléctrica.

Los generadores ocupan dentro de las máquinas eléctricas un muy importante lugar, debido a que están formando el corazón de un sistema de potencia, existiendo así generadores de corriente alterna desde plantas muy pequeñas hasta gigantescos generadores, de ahí el interés de nuevas formas de generación.

Dentro de las máquinas generadoras de voltaje se han considerado los bobinados y contactos como inconvenientes.

Varios generadores se han construido sin escobillas en los últimos 75 años; por ejemplo tenemos los generadores con magnetos permanentes, campo pulsátil, etc. Además se han realizado estudios respecto a aplicaciones del estado sólido para el campo en máquinas eléctricas.

Si observamos el avance tecnológico y de la ciencia, estos se han acelerado en los últimos tiempos, siendo de mucho interés e importancia el cómo obtener en las nuevas formas de generación en investigación y en uso, mayor eficiencia, menor desgaste mecánico, menores pérdidas, mayor confiabilidad, mayor estabilidad y otras características específicas que mejoren las cualidades de los generadores ya existentes.

El siguiente estudio trata sobre el generador de Reluctancia, utilizando para el efecto el estudio y conclusión de un prototipo que permita visualizar los fenómenos electromagnéticos y la influencia de la forma y dimensiones físicas entre el rotor y estator en la Reluctancia, y luego en la forma de onda de voltaje generado por la variación de la Reluctancia presente en la máquina.

La variación del flujo con respecto al tiempo nos produce un voltaje generado; el campo de investigación en el presente trabajo, es producir la variación de la Reluctancia para producir esta variación del flujo en el tiempo, para lo cual lo más factible es en el entre-hierro existente

entre el estator y rotor, los bobinados tanto de armadura como de campo se los ubica en el estator, o sea, en la parte fija del generador no habrá necesidad de escobillas, evitando así los desgastes mecánicos y pérdidas eléctricas que estos ocasionan.

La estructuración de la máquina puede ser muy variada, pero se toma un caso particular para las pruebas y análisis en el laboratorio, excluyendo los casos especiales que sin duda existen.

Por último cabe mencionar que resulta una obligación de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, conjuntamente con las demás Escuelas Politécnicas del país y centros donde se obtienen estudios sobre este tipo de máquinas, realicen una seria investigación dentro de este tópico, para así alcanzar un desarrollo de una tecnología propia en nuestro país.

C A P I T U L O    I  
-----

E S T U D I O    T E O R I C O  
-----

## CAPITULO I: ESTUDIO TEORICO

----- - -----

### 1.1 GENERALIDADES.

Al comparar el funcionamiento de los generadores convencionales con el generador de reluctancia, se tienen diferencias fundamentales que caracterizan a cada uno de ellos.

El objeto de este capítulo es revisar matemáticamente las leyes que rigen el principio de funcionamiento del generador de reluctancia en estado permanente, y plantear las ecuaciones y criterios que definen al generador de reluctancia; tomando como base diferentes referencias bibliográficas existentes sobre máquinas sincrónicas.

### 1.2 ELEMENTOS DE LA MAQUINA.

El generador de reluctancia es una máquina rotativa cuyas partes constitutivas son: sistema estructural formado por el estator, el rotor, la base, el eje, la

bornera, los cojinetes, el armazón mismo de la máquina. Un circuito eléctrico formado por los bobinados ubicados todos en el estator, de los cuales un bobinado corresponde al circuito de campo y el otro bobinado corresponde al circuito de armadura. Y un circuito magnético formado por el estator y el rotor de hierro ferromagnético caracterizado por un entrehierro dominante.

### 1.3 CIRCUITO MAGNETICO.

"La forma de actuar los campos magnéticos se deduce de las leyes de Maxwell, complementados con datos relativos a las distintas relaciones que introducen los parámetros correspondientes a los diferentes materiales recorridos por dichos campos. En las máquinas rotativas y transformadores sus frecuencias y magnitudes son tales que permiten desprestigiar la intervención de las corrientes de desplazamiento en las leyes de Maxwell considerando el caso como casi estático. Lo que significa que los campos-magnéticos bajo condiciones de tiempo variable son los mismos que en condiciones estáticas para un mismo nivel eléctrico. Bajo un punto de vista práctico esto supone que es posible resolver todos los problemas de circuitos magnéticos como si fuesen estáticos, introduciendo posteriormente cualquier variación en el tiempo. De otra manera, la resolución de problemas relativos a los circuitos



magnéticos, dada la configuración actual de las máquinas, sería una labor extremadamente dificultosa.

La ley fundamental que relaciona corrientes eléctricas y campos magnéticos es la ley de Ampere.

$$\int J \cdot ds = \oint H \cdot dl \quad (1-1)$$

La fórmula (1-1) establece que la integral de línea de H a lo largo del contorno de una superficie a través de la cual pasa la densidad de corriente J, es igual a la corriente total a través de ella". (2)

Aplicando la fórmula (1-1) al circuito magnético simple, ésta se convierte en:

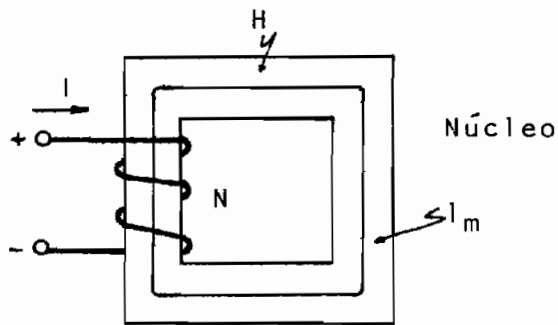


Fig. 1-1 Circuito magnético simple

$$NI = Hl_m \quad (1-2)$$

NI formado de uno, o más bobinados en el camino de flujo.

La dirección de la excitación específica  $H$  se da por la ley de la mano derecha.

La intensidad de campo  $H$  origina allá donde exista una densidad de flujo  $B$ , cuyo valor es:

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

En máquinas o dispositivos de conversión de energía estos están provistos de una parte móvil, de aquí la presencia de entrehierros. La figura 1-2 representa un circuito magnético con un entrehierro, y, aplicando la fórmula (1-1) se obtiene lo siguiente:

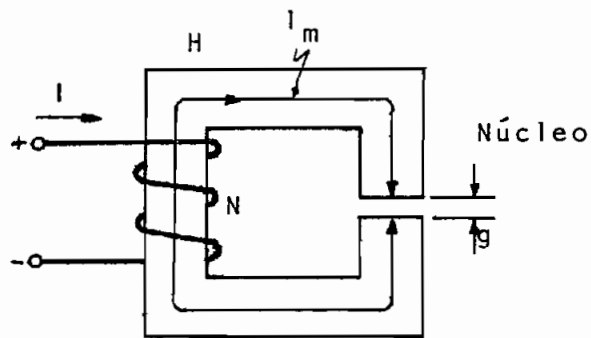


Fig. 1-2 Circuito magnético con entrehierro

$$NI = Hl_m + H_g g \quad (1-4)$$

Reemplazando las siguientes definiciones:

- a) El flujo  $\emptyset$  es continuo a lo largo del circuito magnético, definiéndose como:

$$\emptyset = \int B \cdot ds \quad (1-5)$$

Si se considera uniforme la densidad del flujo:

$$\emptyset = BS \quad (1-6)$$

- b) Cuando se tiene que el circuito magnético es de sección uniforme y de naturaleza homogénea, la reluctancia es igual a:

$$R = \frac{l}{\mu s} \quad (1-7)$$

- c) La fuerza magnetomotriz en un flujo continuo se define como:

$$F = NI \quad (1-8)$$

La ecuación (1-4) en función de la reluctancia y del flujo queda:

$$F = \emptyset (R + R_g) \quad (1-9)$$

Generalizando la ecuación (1-9) queda:

$$F = \emptyset R_{eq} \quad (1-10)$$

1.3.1 Dedución de la ecuación general de voltaje para la máquina de reluctancia.

Un generador de reluctancia es una máquina que tiene movimiento relativo entre el rotor y el estator, por tanto es susceptible variar la reluctancia en el tiempo. Cabe anotar que en el núcleo de material ferromagnético no es posible variar su reluctancia; por tanto, la reluctancia variable se obtiene en el entrehierro de la máquina.

Con esta variación se crea en el espacio un campo eléctrico  $\vec{E}$  y de acuerdo con la LEY DE FARADAY.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{-d}{dt} \int B \cdot d\vec{s} \quad (1-11)$$

En estructuras magnéticas que comprenden bobinados, la variación del campo magnético en el núcleo, origina una fuerza electromotriz (fem) por tanto:

$$e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-12)$$

$$y \quad e = \frac{-d}{dt} \int B \cdot d\vec{s} \quad (1-13)$$

para el caso de N espiras:

$$\lambda = N\phi \quad (1-14)$$

entonces el voltaje generado es:

$$e = \frac{-d\lambda}{dt} \quad (1-15)$$

reemplazando (1-8), (1-10) y (1-14) la ecuación (1-15) se transforma en:

$$e_r = Na \frac{d}{dt} \frac{Nf I_f}{R} \quad (1-16)$$

En la ecuación (1-16) las variables en el tiempo son: la corriente de campo y la reluctancia (que es el objetivo) quedando por tanto:

$$e_r = -Na Nf \frac{d}{dt} \frac{I_f}{R} \quad (1-17)$$

Desarrollando la ecuación (1-17) se obtiene:

$$e_r = -Na Nf \frac{R(t) \frac{d}{dt} I_f(t) - I_f(t) \frac{d}{dt} R(t)}{R(t)^2} \quad (1-18)$$

Para máquinas sincrónicas y mas específicamente en generadores, el bobinado de campo va hacer alimentado por una fuente de corriente continua, o sea, el rizado o la componente de alterna es nula, por tanto:

$$e_r = \frac{N_a N_f I_f}{R^2} \frac{d}{dt} R(t) \quad (1-19)$$

Dado que:  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  (1-20)

reemplazando en la ecuación (1-19), la ecuación (1-20)

$$e_r = \frac{N_a N_f I_f}{R^2} \frac{d}{d\theta} [R(\theta)] \frac{d\theta}{dt} \quad (1-21)$$

finalmente se tiene la ecuación que rige la generación de voltaje por variación de la reluctancia, y es la siguiente:

$$e_r = \frac{N_a N_f I_f \omega}{R^2} \frac{dR(\theta)}{d\theta} \quad (1-22)$$

expresado en función de la permeancia:

$$e_r = \frac{N_a N_f \mu^2}{R^2} \omega I_f \frac{d}{d\theta} \left[ \frac{1}{P(\theta)} \right] \quad (1-23)$$

Reemplazando la ecuación (1-7) en la ecuación (1-22) se obtiene en función del entrehierro y la superficie por donde circula el flujo.

$$e_r = N_a N_f I_f \mu \left[ \frac{S(\theta)}{g(\theta)} \right]^2 \frac{d}{d\theta} \left[ \frac{g(\theta)}{S(\theta)} \right] \quad (1-24)$$

La ecuación (1-21) da la información de las variables y factores importantes en el generador, donde interviene la variación de reluctancia para obtener un voltaje generado a terminales de la armadura.

De la fórmula se tiene que:

el número de espiras de armadura y de campo son términos constantes. Se tiene voltaje a terminales de la armadura si existe una velocidad relativa entre el rotor y estator, y si existe una corriente de campo. Estos dos factores son directamente proporcionales. La variación de la reluctancia de acuerdo a su posición es lo más importante; o sea mientras mayor sea el valor numérico de la pendiente es mayor el voltaje generado.

Y por último el voltaje generado es inversamente proporcional a la reluctancia al cuadrado.

El voltaje a terminales de la armadura es:

$$V_t = e_r - \text{Caídas de voltajes (1-25)} \\ \text{existentes.}$$

1.3.1.1 Ecuación de la máquina de reluctancia en función de la inductancia (L).

Para un sistema lineal la autoinducción de la bobina viene dada por el flujo concatenado por unidad de corriente, es decir:

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (1-26)$$

En un circuito monofásico se tiene que:

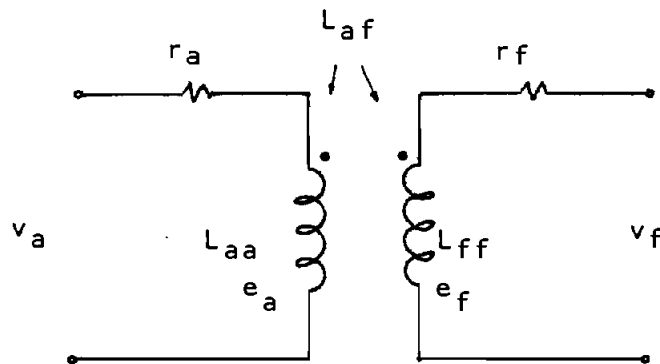


Fig. 1.3 Circuito monofásico

Utilizando la ecuación (1-14)

$$e_a = \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (1-27)$$

$$e_f = \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (1-28)$$



del circuito de la figura (1.3)

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{af} \\ L_{af} & L_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_f \end{bmatrix} \quad (1-29)$$

Desarrollando las ecuaciones (1-27) y (1-28) con las ecuaciones (1-29) y (1-20) las ecuaciones de voltaje a terminales son:

$$V_a = i_a r_a + L_{aa} \frac{di_a}{d\theta} \omega + i_a \frac{dL_{aa}}{d\theta} \omega + L_{af} \frac{di_f}{d\theta} \omega + i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} \omega \quad (1-30)$$

$$V_f = i_f r_f + L_{ff} \frac{di_f}{d\theta} \omega + i_f \frac{dL_{ff}}{d\theta} \omega + L_{af} \frac{di_a}{d\theta} \omega + i_a \frac{dL_{af}}{d\theta} \omega \quad (1-31)$$

Los términos expresan:

$i_a r_a$  caída de voltaje por la resistencia del devanado de armadura.

$i_f r_f$  caída de voltaje por la resistencia del devanado de campo.

$L_{aa} \frac{di_a}{d\theta}$  voltaje debido a la auto inducción de la armadura.

$L_{ff} \frac{di_f}{d\theta}$  voltaje debido a la autoinducción del campo.

$i_a \frac{dL_{aa}}{d\theta}$  y  $i_f \frac{dL_{ff}}{d\theta}$  Voltaje por la variación de su inductancia propia.

$L_{af} \frac{di_f}{d\theta}$  y  $L_{af} \frac{di_a}{d\theta}$  Voltaje inducido por efecto transformador.

$i_f \frac{dL_{af}}{d\theta}$  y  $i_a \frac{dL_{af}}{d\theta}$  Voltaje presente por la variación de la inductancia mutua.

Para un sistema polifásico:

- 1.- La matriz (1-29) será de dimensión  $(m+1) \times (m+1)$ .
- 2.- Para cada fase una ecuación de voltaje terminal.
- 3.- El desarrollo matemático para cada sistema de dos o más fases es similar que para el caso monofásico desarrollado, con la diferencia que se tiene una ecuación por cada fase adicional.

#### 1.4 ESTUDIO DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL ROTOR Y EL ESTATOR.

En una máquina rotativa la forma de obtener variable la reluctancia es, en el entrehierro que se presenta entre el rotor y el estator, lo antes dicho implica un estudio de las posibles configuraciones que pueden tener estos (estator, rotor), para lo cual se parte de formas conocidas y utilizadas en las diferentes máquinas eléctricas convencionales.

##### 1.4.1 Estator.

El estator puede ser:

###### a) Estator de forma cilíndrica.

En esta configuración los bobinados serán colocados como en las máquinas convencionales, pero tanto los bobinados de campo como los de la armadura localizados en el estator, el rotor será de una configuración tal que, sea variable la reluctancia entre el entrehierro; es decir, el rotor puede ser ovalado, de irregularidades simétricas, con orificios y otras configuraciones (Fig. 1.4).

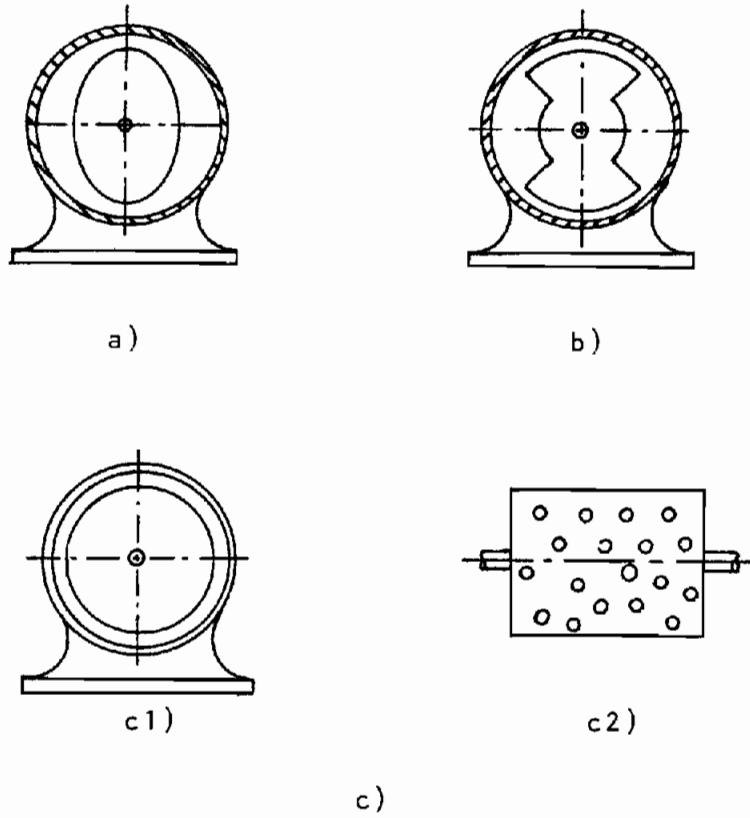


Fig. 1.4 Formas posibles del estator y rotor

Para los casos mencionados va a existir el problema de: el flujo va seguir el camino de menor reluctancia por lo que no cerrará correctamente. Cabe anotar que existe una diversidad de formas para el rotor y el estator en este caso, pero todas presentan el mismo problema.

b) Estator en forma de polos salientes

En este caso el rotor puede ser cilíndrico o de forma irregular. Si es cilíndrico no es posible conseguir una reluctancia variable; pero si es de forma irregular será posible tener una reluctancia variable y además un camino cerrado correcto que abrace a la armadura.

1.4.2 Rotor

- a) Si es cilíndrico y el estator es irregular no es posible conseguir una reluctancia variable, ya que durante la variación del tiempo no se puede conseguir un entrehierro variable.
- b) El rotor irregular ya se analizó en el numeral 1.4.1.

1.4.3 Forma del rotor y estator.

De los numerales 1.4.1 y 1.4.2 se puede concluir que la configuración del estator y del rotor es irregular.

### 1.5 CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR EL CIRCUITO MAGNETICO

a) El rotor y el estator no deben ser de formas sofisticadas ya que la construcción será compleja, por tanto se plantea:

- 1.- El estator en forma de dos polos salientes, no podrá tener más de dos porque la concatenación de flujo en la armadura no cerrará correctamente.

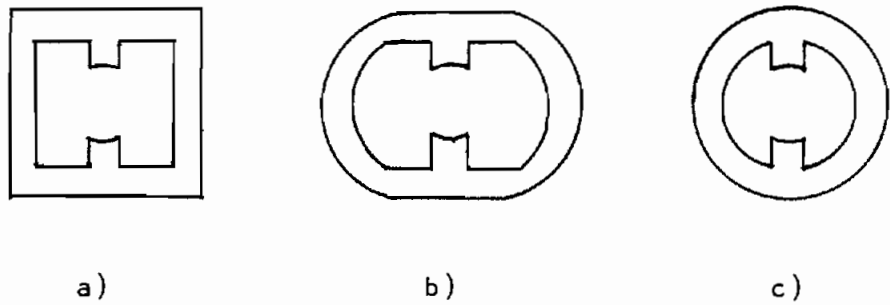


Fig. 1.5 Formas del Estator.

Cada configuración de la figura 1.5 tienen sus propias características, como se puede ver la figura 1.5 (a) es la más apropiada ya que se tiene mayor espacio para las bobinas de la máquina.

- 2.- El rotor tendrá una forma específica, la misma que dependerá de la forma de onda que se quiera obtener (menos cilíndrica). La forma de onda de voltaje convencional es la sinusoidal por tanto, en el generador

de reluctancia el objetivo será generar el mismo tipo de onda, o que se aproxime a la misma que serán la cuadrada y la triangular, a las cuales por medio de las series de Fourier descomponerlas a una componente principal sinusoidal, más una serie de armónicas.

Las formas del rotor de acuerdo a lo dicho serán para ondas sinusoidal, para onda cuadrada y onda triangular.

- b) El flujo debe seguir un mismo camino cerrado sin que existan fugas no deseadas por presencia de caminos de menor reluctancia por donde puede seguir el flujo magnético.
  
- c) Debido a que este tipo de generador es por variación de reluctancia, el flujo será variable en el tiempo: tanto en el estator como en el rotor; por tanto deben ser laminados.

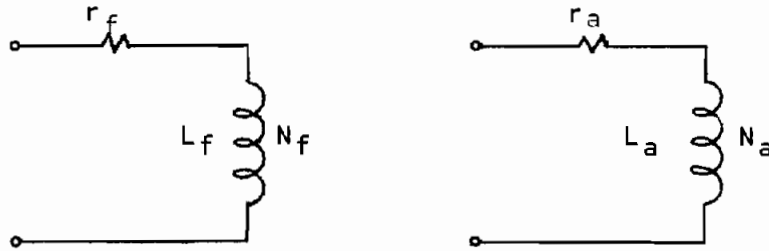
## 1.6 CIRCUITO ELECTRICO

El circuito eléctrico sólo se compone de dos bobinados.

-Bobinado de armadura.

-Bobinado de Campo.

Tanto el campo como la armadura están ubicados en la parte fija del generador, o sea en el estator.



(a) Circuito de campo

(b) Circuito de armadura

Fig. 1.6 Circuito eléctrico

Tanto el bobinado de campo, como el de armadura constará de un cierto número de espiras dependiendo de las condiciones de diseño, potencia de la máquina, voltaje a terminales y de las características propias que tenga el generador. La sección del conductor es función de la corriente que va a circular por cada bobinado.

### 1.7 CONDICIONES DEL CIRCUITO ELECTROMAGNETICO EQUIVALENTE.

Para plantear un circuito electromagnético equivalente y por consiguiente un modelo matemático, es necesario analizar los diferentes componentes mecánicos y componentes eléctricos, y tomar en cuenta



lo más significativo, rechazando las condiciones que no pesen en el resultado final. Cabe anotar que si se toma todas las variables para el circuito magnético y para el modelo matemático, resulta muy complejo, lo cual no se justifica.

Las diferentes variables presentes en el generador de reluctancia son:

#### 1.7.1 Parámetros y elementos presentes.

- a) Partes fijas que están constituidas por:  
Estator, devanados de armadura, devanados de campo, base, armazón, chumacera o portacojinetes, pernos, bornera, soldaduras.
- b) Partes móviles que están constituidas por:  
Rotor, cojinetes y eje.
- c) Tipo de materiales utilizados en las diferentes piezas que forma la máquina.
- d) El entrehierro presente entre el estator y el rotor.
- e) Velocidad de funcionamiento.
- f) Esfuerzos mecánicos presentes, debido a las

fuerzas por la rotación del eje, y por el circuito electromagnético.

- g) El tiempo tiene su influencia (variación en el tiempo).
- h) Desgastes mecánicos.
- i) Fatiga metálica.
- j) Bornes, esquinas, soldaduras, configuraciones del diseño.
- k) Factores: -De bobinado  
-De aislamiento entre láminas.
- l) Rangos de uso.

### 1.7.2 Pérdidas

Las pérdidas de la máquina de reluctancia son:

- a) Las pérdidas en el cobre presentes en la armadura, están dadas por:

$$W_a = I_a^2 R_{am} \quad (1-32)$$

- b) Las pérdidas en el cobre presentes en el campo,

están dadas por:

$$W_f = I_f^2 R_f \quad (1-33)$$

- c) Adicionalmente a las pérdidas mencionadas anteriormente, existen pérdidas en el reóstato del circuito de campo y están dadas por:

$$W_R = I_f^2 R_{reos} \quad (1-34)$$

- d) Pérdidas en el núcleo

Para las pérdidas en el núcleo se consideran: características del estator y rotor, es decir, su configuración si es macizo o si es laminado de la variación de flujo que circula; con estos antecedentes las pérdidas en el núcleo principalmente son:

- Pérdidas por histéresis.
- Pérdidas por corrientes dispersas.
- Pérdidas por corrientes de faucoalto.
- Pérdidas adicionales por características propias del material.

El método de cuantificar es por medio de tablas las cuales proporcionan los fabricantes.

e) Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción existen en las partes móviles de la máquina, es decir, están presentes en las chumaceras (portacojinetes) donde están alojados los cojinetes; las mismas que pueden ser calculadas si se conocen las dimensiones de la chumacera, la velocidad periférica, la carga de la misma y el coeficiente de fricción.

Las pérdidas por ventilación son difíciles de calcular y son dependientes de la construcción.

Normalmente se toman las pérdidas combinadas de la fricción y de la ventilación; cuando no se dispone de valores referenciales se usan las tablas que proporciona el fabricante.

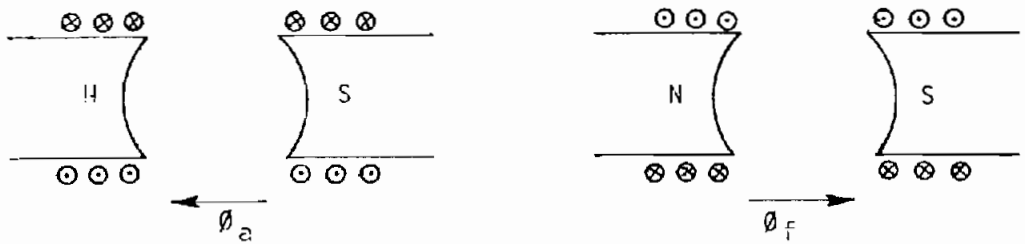
f) Pérdidas por elevación de temperatura.

Las pérdidas de origen eléctrico y mecánicos se ven afectadas por la elevación de temperatura, es decir, por la temperatura del medio ambiente, calentamiento por la circulación de corriente en los conductores, calentamiento de origen mecánico y por calentamiento producido por el circuito electromagnético. Generalmente estas pér

didas son difíciles de calcular matemáticamente, ya que éstas dependen de las características de los materiales, fuerzas presentes, rozamientos y otros; por lo tanto se estima de acuerdo a tablas proporcionadas por el fabricante o tablas estandarizadas.

### 1.7.3 Reacción de Inducido.

En el generador de reluctancia existen dos fuerzas magnetomotrices (fmm) y flujos principales que se muestra en la figura 1.7, uno es el flujo de inducido y el otro el flujo de excitación producido por los devanados de campo de los polos norte y sur de la máquina.



a) Flujo de inducido

b) Flujo de excitación

Fig. 1.7 Flujos principales existentes en el generador de reluctancia.

El flujo de inducido va a ser función del tiempo y, va a depender del tipo de carga. Con carga resistiva la dirección del flujo de inducido será como se muestra en la figura 1.7a es decir en opo-

sición al flujo de excitación. Para el caso de cargas inductiva o capacitiva, la corriente de inducido tiene un desfase en atraso o adelanto respectivamente, lo que implica un desfase en el flujo de inducido ocasionando una distorsión en el mismo, el cual produce una disminución o aumento en el flujo resultante y por ende el voltaje a terminales de la armadura. Disminución para el caso inductivo y aumento en el caso capacitivo.

$$\phi_r = \phi_f + \phi_a \quad (1-35)$$

Reemplazando los valores de los flujos  $\phi_f$  y  $\phi_a$  en función del número de espiras y de la corriente se obtiene que:

$$\phi_r = \frac{1}{R} (N_f I_f + N_a I_a) \quad (1-36)$$

La figura 1.7 muestra el flujo de inducido, el mismo que sigue la línea de acción del flujo de excitación, generalizando para todo tipo de carga, el flujo de inducido sigue aproximadamente esta línea de acción, o sea es crítico para los casos de carga, ya que se obtienen caídas de voltaje: notables para el caso de carga resistiva e inductiva, y viceversa para el caso de carga capacitiva. Por tanto en la ecuación 1-36 se puede asumir como lineal el factor

$(N_f I_f + N_a I_a)$  o sea una suma directa de dos cantidades escalares, ya que la distorsión con respecto a la línea de acción será mínima. Con esta acotación para el diseño  $N_a$  juega un papel importante es decir, a mayor número de espiras la caída de voltaje será más notable y viceversa.

#### 1.7.4 Circuito equivalente.

Para el circuito equivalente del generador de reluctancia se toman los siguientes criterios:

- En estado permanente.
- De los numerales 1.6.1, 1.6.2, 1.6.3 lo más significativo y lo demás como despreciable.
- Se considera la componente principal (series de Fourier).

Con estas acotaciones el circuito equivalente por fase es:

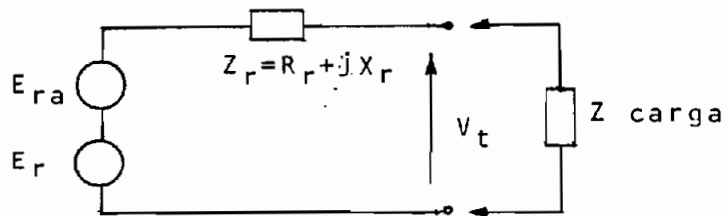


Fig. 1.8 Circuito equivalente del generador de reluctancia.

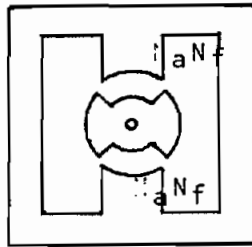
$$E_r = V_t \angle \theta_1^0 + E_{ra} \angle \theta_2^0 + I (R_r + jX_r) \quad (1-37)$$

### 1.8 CIRCUITO ELECTROMAGNETICO PARA EL GENERADOR DE RELUCTANCIA.

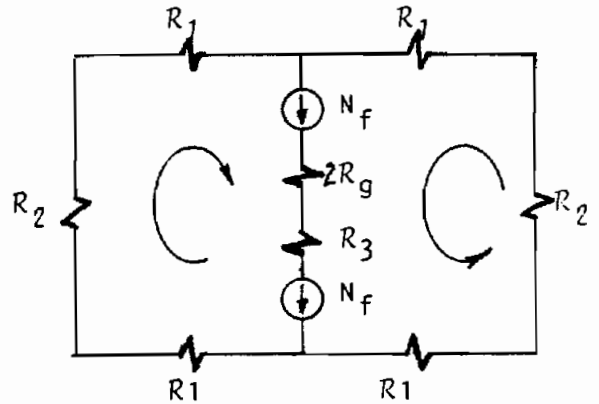
Del numeral 1.5 se puede decir que el circuito electromagnético para el generador de reluctancia tiene las siguientes características:

- Simétrico en las dos ramificaciones del circuito magnético.
- Los bobinados ubicados en los polos (armadura y campo).
- Entrehierro en los dos polos de igual característica.
- Las bobinas de igual número de espiras en los dos polos.

En base a esto el circuito electromagnético es:



a)



b)

Fig. 1.9 Circuito electromagnético



matemáticamente el circuito de la figura 1.9 b y en forma matricial es:

$$2N_f I_f \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(R_g + R_1) + R_2 + R_3 & 2R_g + R_3 \\ 2R_g + R_3 & 2(R_g + R_1) + R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (1-38)$$

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi \quad (1-39)$$

despejando  $\phi$  de la ecuación matricial (1-38):

$$\phi = \frac{2N_f I_f}{2(2R_g + R_1 + R_3) + R_2} \quad (1-40)$$

$N_f$  es el número de espiras en cada polo; si se generaliza esto,  $N_f$  puede provenir de dos o más bobinados ubicados a lo largo del flujo magnético, ocasionando así la posibilidad de poder ser alimentado cada bobinado con fuentes independientes o una sola en común, implicando de esta manera que pueda existir diferente corriente de campo en cada bobinado. Con lo antedicho, la fmm total es la suma de todas las fmm parciales.

Simplificando la ecuación (1-40) los términos significativos, como son:

$$N_f + N_f = N_T \quad (1-41)$$

$$R_g \gg R_1 \quad (1-42)$$

$$R_g \gg R_2 \quad (1-43)$$

$$R_g \gg R_3 \quad (1-44)$$

$$2R_g = R \quad (1-45)$$

$$\phi = \frac{N_T I_f}{R} \quad (1-46)$$

El procedimiento matemático siguiente, se tiene en el numeral 1.3.1.

### 1.9 ECUACIONES DE VELOCIDAD SINCRONICA Y FRECUENCIA.

En el numeral 1.5 y 1.6 están descritos las formas del estator y del rotor y las condiciones que deben cumplirse. De acuerdo a esto, la distribución del flujo a lo largo de los 360° mecánicos para el caso de dos polos y dos saliencias del rotor es aproximadamente la siguiente :

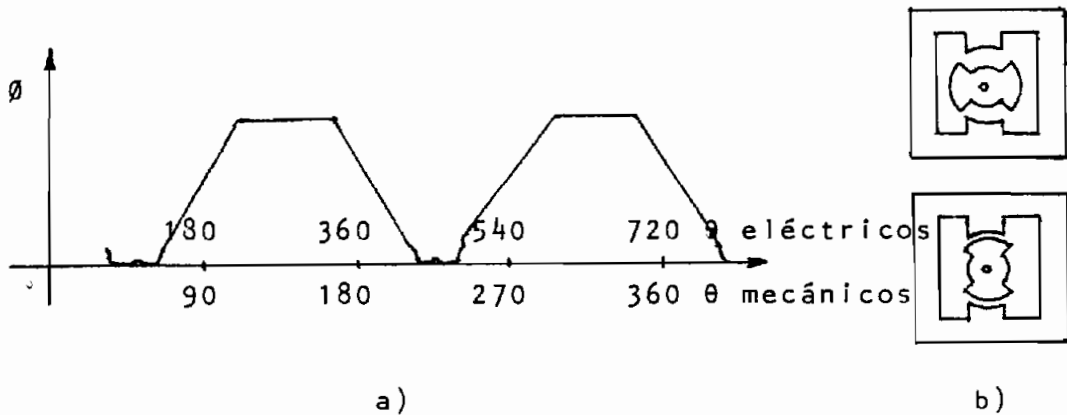


Fig. 1.10 Distribución del flujo en el generador de reluctancia.

La distribución del flujo en el generador de reluctancia va a estar relacionada con la variación de la reluctancia en el entrehierro fundamentalmente. En figura 1.10a se presenta para el caso 1.10b que consta de dos saliencias en el rotor. Haciendo una analogía con las máquinas convencionales en las cuales la armadura está ubicada en el estator y el campo en el rotor o viceversa, la distribución del flujo para el caso de dos polos y rotor cilíndrico se muestran en la fig. 1.11.

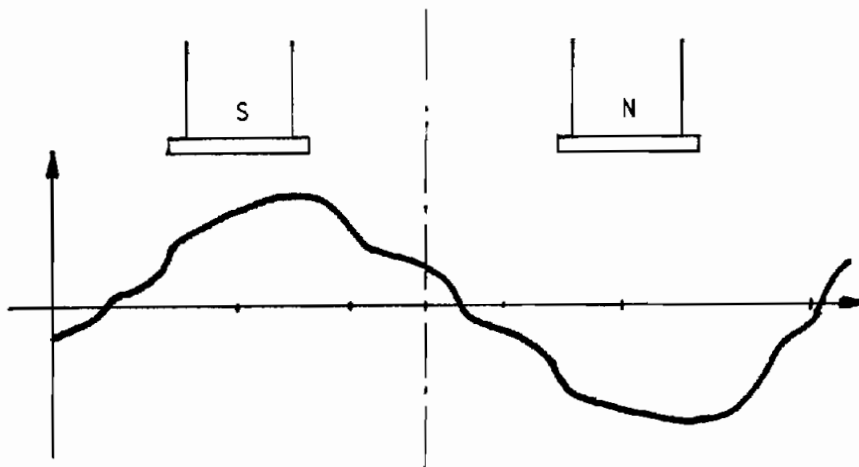


Fig. 1.11 Distribución de flujo en una máquina sincrónica convencional.

Como se puede ver, en la figura 1.10 y 1.11 el generador de reluctancia realiza dos ciclos mientras las máquinas sincrónicas convencionales realizan un ciclo, lo que implica que la velocidad de sincronismo es menor con un factor de dos; si correlacionamos

la variación del flujo con las salientes del rotor se puede deducir que cada saliente proporciona un período en el generador de reluctancia, es decir, es la similitud de dos polos.

Para la determinación de la velocidad sincrónica se parte de la fórmula ya conocida.

$$n = \frac{120f}{P} \quad (1-47)$$

De lo antedicho, la velocidad de sincronismo en el generador de reluctancia es:

$$n_r = \frac{60f}{P_r} \quad (1-48)$$

$P_r$  está determinado por cada saliencias o sea cada saliencia tiene el valor de dos (equivalente a dos polos magnéticos de una máquina sincrónica convencional). La velocidad angular de la onda, o del campo es  $\omega = 2\pi f$  radianes eléctricos por segundo en una máquina de  $P$  polos su velocidad de giro es:

$$\omega_r = \frac{P_r \omega_m}{2} \quad (1-49)$$

Puesto que una revolución completa existe en  $P_r/2$  ondas o ciclos se tiene:

$$\theta_r = \frac{P}{2} r \theta_m \quad (1-50)$$

La frecuencia de funcionamiento es 60 Hz en nuestro medio.

Matemáticamente: tomando como referencia el circuito formado por una máquina síncrona (SM) conectada a una red de potencia infinita de tensión  $E_e$  a través de una impedancia en serie de reactancia por fase igual a  $x_e$ , y se desprecia la resistencia por ser normalmente muy pequeña. El diagrama de vectorial será el trazo de la figura 1.12

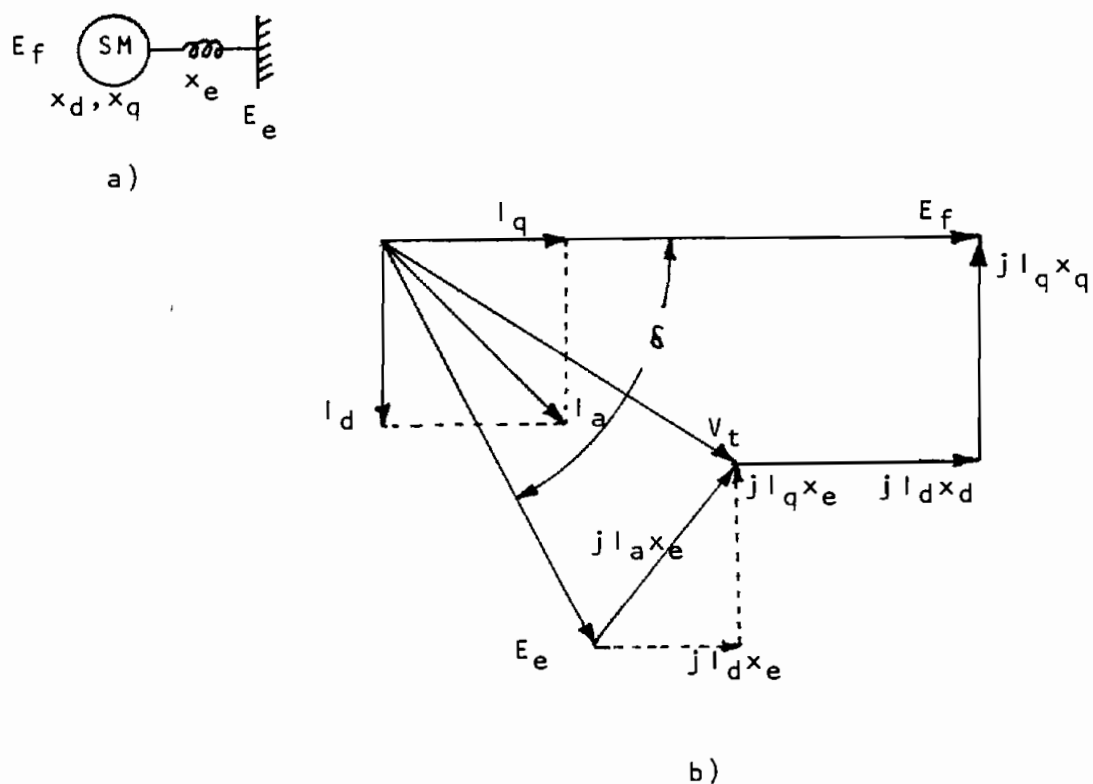


Fig. 1.12 Máquina síncrona de polos salientes e impedancia en serie. a) esquema líneal b) Diagrama vectorial.

El valor total de la reactancia interpuesta entre la tensión  $E_f$  inducida por el campo inductor y la tensión  $E_e$  en la red es:

$$X_d = x_d + x_e \quad (1-51)$$

$$X_q = x_q + x_e \quad (1-52)$$

Si la tensión  $E_e$  de la red se la descompone en las dos componentes  $E_e \text{sen} \delta$  y  $E_e \text{cos} \delta$ , en fase con  $I_d$  y con  $I_q$  respectivamente, la potencia suministrada a la red será:

$$P = I_d E_e \text{sen} \delta + I_q E_e \text{cos} \delta \quad (1-53)$$

De la figura 1.12 b):

$$I_d = \frac{E_f - E_e \text{sen} \delta}{X_d} \quad (1-54)$$

$$I_q = \frac{E_e \text{sen} \delta}{X_q} \quad (1-55)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1-54) y (1-55) en la ecuación (1-53) la ecuación de potencia es:

$$P = \underbrace{\frac{E_f E_e \text{sen} \delta}{X_d}} + \underbrace{E_e^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \text{sen}(2\delta)} \quad (1-56)$$

Componente fundamental debido al campo inductor.

Segunda armónica debido al par de reluctancia.

En el generador de reluctancia el funcionamiento es a base de la variación de la reluctancia que se va a presentar en el entrehierro entre el estator y el rotor, por tanto, en la ecuación (1-56) la componente presente será sólo la de doble frecuencia, que es debida al par de reluctancia. La componente fundamental debida al campo inductor no existirá ya que los bobinados de armadura y de campo están en el estator, o sea no tiene movimiento relativo.

#### 1.10 REACTANCIAS, INDUCTANCIAS DE EJE DIRECTO Y EN CUADRATURA.

Considerando en el entrehierro únicamente, estas son:

En la ecuación (1-26) reemplazando las ecuaciones (1-8), (1-10) y (1-14) la inductancia es igual a:

$$L = \frac{N_T^2}{R} \quad (1-57)$$

La inductancia va a ser función de la posición, cuyos valores extremos son en el eje directo y en el eje en cuadratura:

$$\text{Eje directo } L_d = \frac{N_T^2}{R_d} \quad (1-58)$$

$$\text{Eje en cuadratura } L_q = \frac{N_T^2}{R_q} \quad (1-59)$$

Considerando la componente desarrollada por las series de Fourier los valores de reactancia son:

$$\text{Eje directo } X_d = 2\pi f L_d \quad (1-60)$$

$$\text{Eje en cuadratura } X_q = 2\pi f L_q \quad (1-61)$$

### 1.11 DETALLES CONSTRUCTIVOS GENERALES.

Para la construcción de un generador de reluctancia se deben tomar en cuenta las siguientes partes constitutivas:

	Base
	Armazón
	Rodamientos
SISTEMA MECANICO	Portacojinetes o chumaceras
	Eje
	Pernos
	Remaches
	Soldaduras
	Núcleo estator
SISTEMA MAGNETICO	Núcleo rotor
	Círculo de campo
SISTEMA ELECTRICO	Círculo de armadura



Cada uno de estos deberá tener características que permitan un normal funcionamiento y rangos de seguridad. Con lo que respecta a circuito eléctrico, éste dependerá de las condiciones de diseño como son: voltaje de funcionamiento, corriente que va a circular y por ende la sección del conductor. El circuito de armadura y de campo están localizados en el estator. El circuito magnético va a jugar un papel importante, ya que como el voltaje generado va a depender de la variación de la reluctancia en el entrehierro, será menester orbiar uniones en el camino del flujo, por lo que éstas tendrán su influencia en la variación de la reluctancia como también en el aumento de pérdidas en el núcleo, las mismas que deben ser reducidas al mínimo. Con éstas acotaciones, tanto el estator como el rotor deben ser troquelados en una sola pieza, aumentando así facilidad en el armado de los grupos estator-rotor, ya que es una característica muy importante en toda construcción.

El flujo durante el funcionamiento será variable en el tiempo, lo que implica que el estator y el rotor serán laminados y aisladas las láminas entre sí, para así reducir las pérdidas en el núcleo.

El sistema mecánico debe tener las siguientes características: por existir fuerzas pulsantes por

la configuración del circuito electromagnético, mecánicamente debe tener buenas características mecánicas para evitar desgastes, roturas, fatigas, añadiendo a esto los cojinetes y chumaceras (portacojinetes) con tolerancias lo más mínimas que la construcción lo permita, ya que si éstas son apreciables, afectarán al entrehierro. El eje debe ser rígido o sea de un coeficiente de torción nulo.

Por la presencia de irregularidades del rotor no es necesaria una ventilación adicional.

Para los casos de dos o más fases será indispensable añadir un grupo estator rotor por cada fase, existiendo así también la posibilidad de ser cada fase de uno o más grupos estator-rotor, cuyo desfase dependerá de la posición física del rotor (relativa entre los rotores existentes).

El rotor constará de dos o más saliencias y cada saliencia es la similitud como si se añadiera dos polos magnéticos a una máquina convencional. Cabe anotar que esta máquina podrá ser de dos polos salientes en el estator, solamente, debido a las condiciones electromagnéticas que debe cumplir.

C A P I T U L O    I I

GENERADOR DE RELUCTANCIA BIFASICO

A N A L I S I S    T E O R I C O

## CAPITULO II: GENERADOR DE RELUCTANCIA BIFASICO

### ANALISIS TEORICO

#### 2.1 GENERALIDADES.

El objeto de este capítulo es, el análisis desde el punto de vista matemático del generador de reluctancia bifásico.

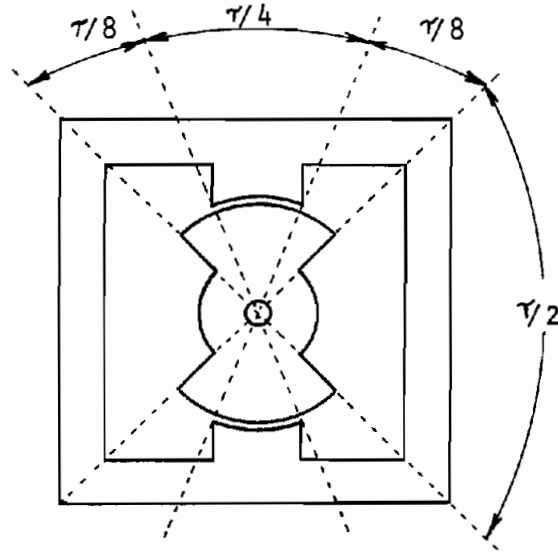
En el capítulo uno se detallan las condiciones que debe cumplir el circuito magnético y cual es el principio de generación; en este capítulo ya no se mencionaran estos tópicos ya que se cumplirán también. En el numeral 1.11 se tiene la información de las posibilidades para los casos polifásicos, para poder tener mas flexibilidad en cuanto al comportamiento de este tipo de generador, se toma el caso bifásico, el cual constará de dos grupos estator-rotor cada fase. Este análisis tiene el enfoque para construir un prototipo con fines didácticos y de investigación para el laboratorio de máquinas eléctricas de la E.P.N..

## 2.2 CIRCUITO MAGNETICO.

Consta de cuatro grupos estator-rotor de doble saliencia, se los representa con las letras w,x,y,z, las interconexiones son tales que resulta su funcionamiento análogo a una máquina sincrónica convencional de rotor cilíndrico bifásica y de cuatro polos. Los grupos estator-rotor w,x constituyen la fase a, y los grupos estator-rotor y,z constituyen la fase b.

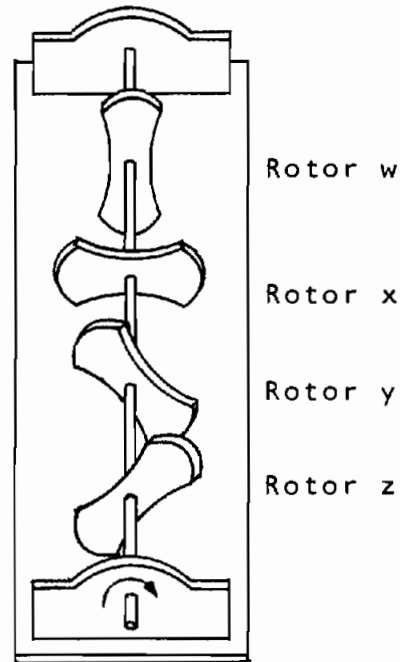
Entre la fase a y la fase b hay un desfase de 180 grados eléctricos, lo cual depende de la posición física de los rotores; entre los rotores w,x así como también entre los rotores y,z un desfase de 90 grados eléctricos (fig. 2.1. b)). Para el primer caso se tiene un desfase de 90 grados mecánicos y para el segundo caso de 45 grados mecánicos.

La forma física de la envolvente de cada grupo estator-rotor se muestra en la fig. 2.1. a).



a)

Forma física de la en  
volvente del grupo es  
tator-rotor.



b)

Posición de los rotosres.

Fig. 2.1 Circuito magnético

### 2.3 CIRCUITO ELECTRICO.

Consta de bobinas de armadura y de campo en cada estator (fig. 2.2).

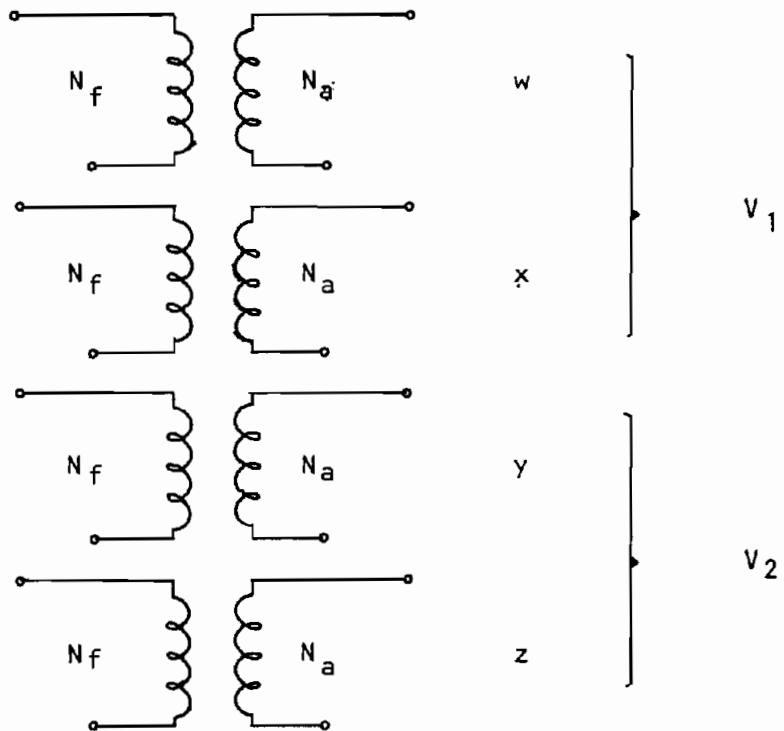


Fig. 2.2 Circuito eléctrico

$V_1$  constituye la fase a

$V_2$  constituye la fase b

### 2.3.1 Circuito electromagnético.

De los numerales 2.2 y 2.3 se tiene el circuito electromagnético para el caso del generador bifásico de reluctancia el mismo que se muestra en la fig. 2.3.

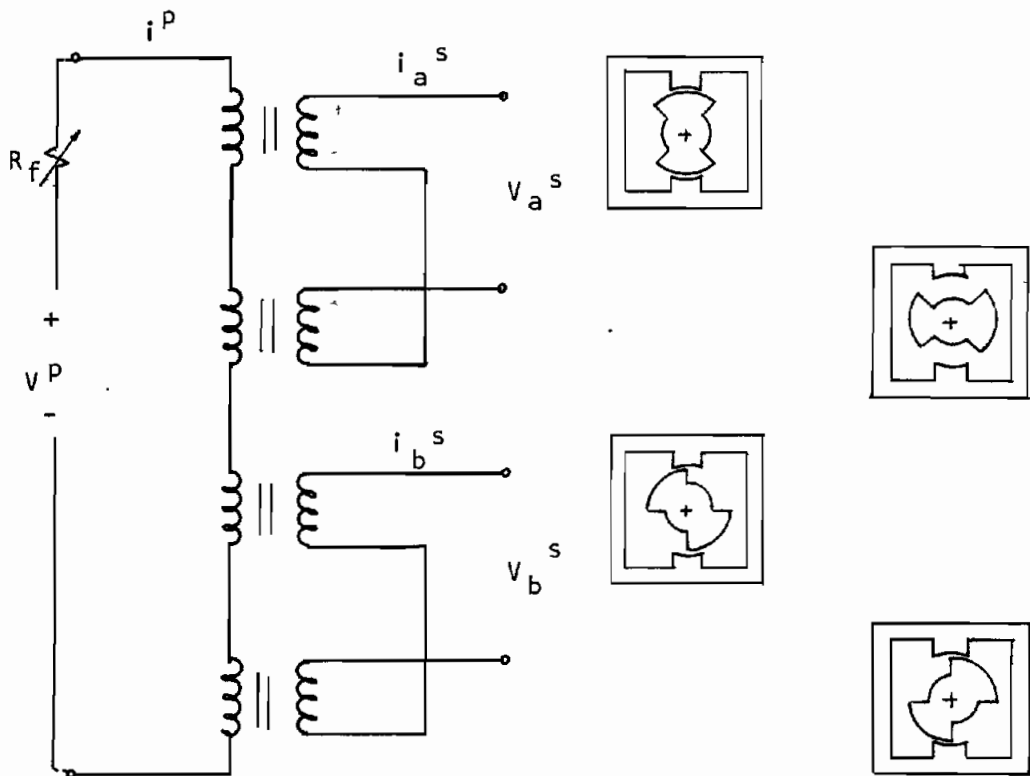


Fig. 2.3 Circuito electromagnético



## 2.4 FORMULACION MATEMATICA.

En general las ecuaciones de balance de voltaje para una máquina multibobina se pueden escribir en forma matricial:

$$[V] = -\frac{d[\lambda]}{dt} + [R] [i] \quad (2-1)$$

de donde el flujo está definido como:

$$[\lambda] = [L] [i] \quad (2-2)$$

Para el generador de reluctancia los vectores voltaje y corriente son:

$$[V] = \begin{bmatrix} v_R & v_a^s & v_b^s \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$[i] = \begin{bmatrix} i_R & i_a^s & i_b^s \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Y la representación de las resistencias y de las inductancias del circuito del generador de reluctancia son matrices tres por tres, las cuales son determinadas desarrollando las ecuaciones de la matriz 2-1.

Se ha planteado la ecuación de generación para es-

te tipo de máquina en el capítulo uno, en función de la reluctancia y/o permeancia del entrehierro y además en función de la inductancia; efectuando un análisis de la variación de la reluctancia entre los grupos estator-rotor  $w,x$  y entre  $y,z$ , estos por estar desfasados 180 grados eléctricos (90 grados mecánicos) se obtiene que mientras en el un grupo estator-rotor, su reluctancia varía de su menor valor al mayor valor en el otro grupo es lo contrario, lo que implica que como el voltaje generado depende de esta variación este será igual a cero, por tanto la conexión de los bobinados para que el voltaje a terminales de la armadura no sea nula es la indicada en la fig. 2-3. De lo antedicho va aparecer un signo menos entre las inductancias mutuas de los grupos  $w,x$  y entre  $y,z$  (de esta variación depende el voltaje generado a terminales de la armadura); los términos son los siguientes:  $L_w^{ps} - L_x^{ps}$  y  $L_y^{ps} - L_z^{ps}$ .

Desarrollando las ecuaciones de la matriz 2-1 para el circuito de la fig. 2-3 se tiene lo siguiente:

(Con la letra  $p$  para el primario (campo) y con la letra  $s$  para el secundario (armadura))

$$\begin{aligned}
 V^P &= (R_W^P + R_X^P + R_Y^P + R_Z^P) i^P + \\
 &\quad \frac{d}{dt} ((L_W^{PP} + L_X^{PP} + L_Y^{PP} + L_Z^{PP}) i^P) + \\
 &\quad \frac{d}{dt} ((L_W^{PS} - L_X^{PS}) i_a^S) + \frac{d}{dt} ((L_Y^{PS} - L_Z^{PS}) i_b^S) \quad (2-5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_a^S &= (R_W^S + R_X^S) i_a^S + \frac{d}{dt} ((L_X^{SS} + L_W^{SS}) i_a^S) + \\
 &\quad \frac{d}{dt} ((L_W^{PS} - L_X^{SP}) i^P) \quad (2-6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_b^S &= (R_Y^S + R_Z^S) i_b^S + \frac{d}{dt} ((L_Y^{SS} + L_Z^{SS}) i_b^S) + \\
 &\quad \frac{d}{dt} ((L_Y^{PS} - L_Z^{PS}) i^P) \quad (2-7)
 \end{aligned}$$

reemplazando los siguientes igualdades:

$$R^P = R_X^P + R_W^P + R_X^P + R_Z^P \quad (2-8)$$

$$R^S = R_X^S + R_W^S = R_Y^S + R_Z^S \quad (2-9)$$

$$L^{PP} = L_W^{PP} + L_X^{PP} + L_Y^{PP} + L_Z^{PP} \quad (2-10)$$

$$L_a^{SS} = L_W^{SS} + L_X^{SS} \quad (2-11)$$

$$L_b^{SS} = L_Y^{SS} + L_Z^{SS} \quad (2-12)$$

$$L_a^{PS} = L_W^{PS} - L_X^{PS} \quad (2-13)$$

$$L_b^{PS} = L_Y^{PS} - L_Z^{PS} \quad (2-14)$$

y la ecuación 1-20 en las ecuaciones 2-5 ,

2-6 y 2-7 se obtiene las siguientes igualdades:

$$V^P = R^P i^P + w \frac{d}{d\theta} (L^{PP} i^P) + w \frac{d}{d\theta} (L_a^{PS} i_a^S) + w \frac{d}{d\theta} (L_b^{PS} i_b^S) \quad (2-15)$$

$$V_a^S = R^S i_a^S + w \frac{d}{d\theta} (L_a^{PS} i^P) + w \frac{d}{d\theta} (L_a^{SS} i_a^S) \quad (2-16)$$

$$V_b^S = R^S i_b^S + w \frac{d}{d\theta} (L_b^{PS} i^P) + w \frac{d}{d\theta} (L_b^{SS} i_b^S) \quad (2-17)$$

Simplificando las ecuaciones 2-15 , 2-16 y 2-17 se tiene:

$$V^P = R^P i^P + e^P \quad (2-18)$$

$$V_a^S = R^S i_a^S + e_a^S \quad (2-19)$$

$$V_b^S = R^S i_b^S + e_b^S \quad (2-20)$$

de donde:

$$e^P, e_a^S, e_b^S = f(w, \text{inductancias propias, inductancias mutuas, corriente, } d/d\theta) \quad (2-21)$$

De donde:

$V^P$	voltaje de campo
$V_a^S$	voltaje de la fase a
$V_b^S$	voltaje de la fase b
$i^P$	corriente de campo
$i_a^S$	corriente de la fase a
$i_b^S$	corriente de la fase b
$R_w^P$	resistencia del bobinado de campo del estator w
$R_x^P$	resistencia del bobinado de campo del estator x
$R_y^P$	resistencia del bobinado de campo del estator y
$R_z^P$	resistencia del bobinado de campo del estator z
$R_w^S$	resistencia del bobinado de armadura del estator w
$R_x^S$	resistencia del bobinado de armadura del estator x
$R_y^S$	resistencia del bobinado de armadura del estator y
$R_z^S$	resistencia del bobinado de armadura del estator z

$L_w^{pp}$	inductancia propia del bobinado de campo del estator w
$L_x^{pp}$	inductancia propia del bobinado de campo del estator x
$L_y^{pp}$	inductancia propia del bobinado de campo del estator y
$L_z^{pp}$	inductancia propia del bobinado de campo del estator z
$L_w^{ss}$	inductancia propia del bobinado de armadura del estator w
$L_y^{ss}$	inductancia propia del bobinado de armadura del estator y
$L_z^{ss}$	inductancia propia del bobinado de armadura del estator z
$L_x^{ss}$	inductancia propia del bobinado de armadura del estator x
$L_w^{ps}$	inductancia mutua entre el campo y la armadura del estator w
$L_x^{ps}$	inductancia mutua entre el campo y la armadura del estator x
$L_y^{ps}$	inductancia mutua entre el campo y la armadura del estator y
$L_z^{ps}$	inductancia mutua entre el campo y la armadura del estator z

## 2.5 RELUCTANCIA, PERMEANCIA, INDUCTANCIA.

En el numeral 2.2 se describe el circuito magnético; de acuerdo a este, se puede deducir la variación de la reluctancia a lo largo del camino del flujo y se muestra en la figura 2.4 (conjuntamente con la variación de la permeancia, ya que ésta es en el inverso)

$$R = \frac{g}{\mu_0 \bar{S}}$$

$$P = \frac{\mu \bar{S}}{g}$$

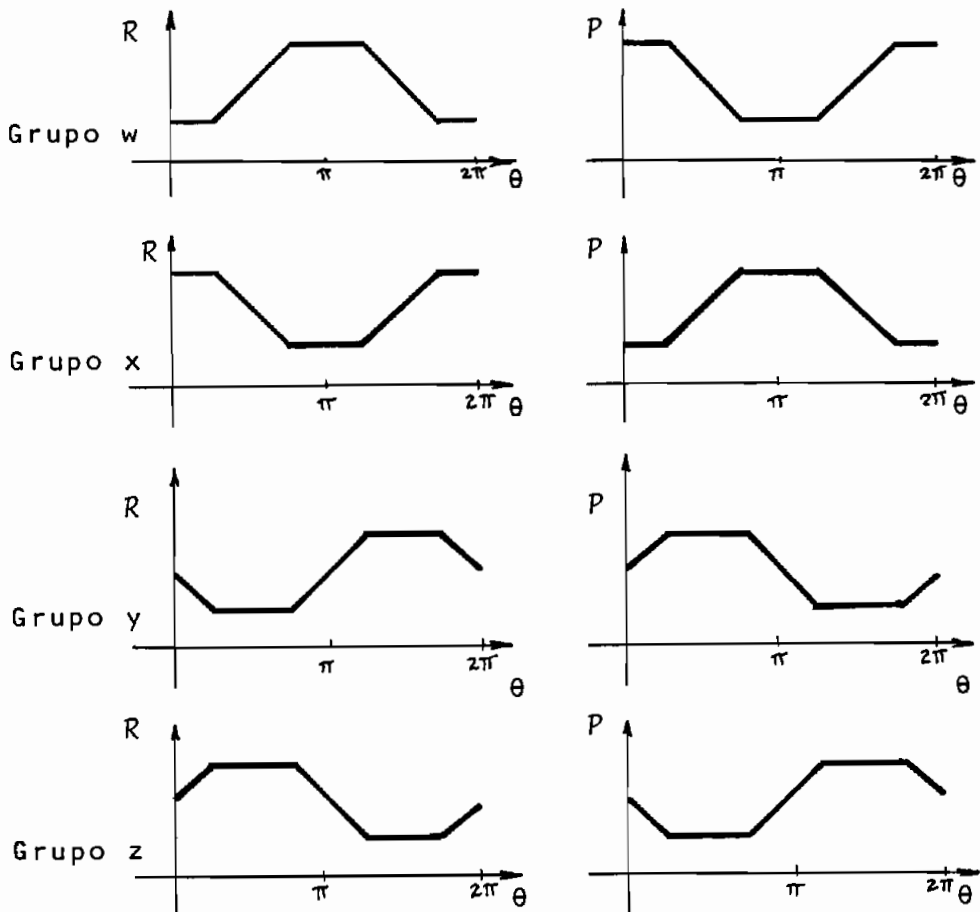


Fig. 2.4 Características de la Reluctancia y de la Permeancia en función de la posición del rotor.

La matriz de inductancias del generador de reluctancia bifásico se tiene de las ecuaciones 2-15, 2-16 y 2-17, y es la siguiente:

$$[L] = \begin{bmatrix} L^{pp} & L_a^{ps} & L_b^{ps} \\ L_a^{ps} & L_a^{ss} & 0 \\ L_b^{ps} & 0 & L_b^{ss} \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

Demostrándose que este generador tiene una autoinductancia primaria (o campo) y una autoinductancia secundaria (o armadura); así mismo que no hay acople mutuo entre las dos fases pero sí una inductancia mutua entre el primario y el secundario, que es función del tiempo o de la posición.

De la matriz de inductancias se tiene que :

$$L_a^{ss} = L_b^{ss} \quad (2-23)$$

son términos constantes

$L^{pp}$  es un término constante.

$L_a^{ps}(\theta)$  es un término variable.  
y es función de la posición.



$$L_b^{ps}(\theta) = L_a^{ps}(\theta - \pi/2) \quad (2-24)$$

De estos dos últimos conceptos va a depender el voltaje general, es decir las inductancias mutuas primario secundario, en este caso son de variación de tipo trapezoidal, y el voltaje generado depende de esta variación de inductancia.

Los voltajes generados de cada grupo estator-rotor se muestra en la figura 2.5

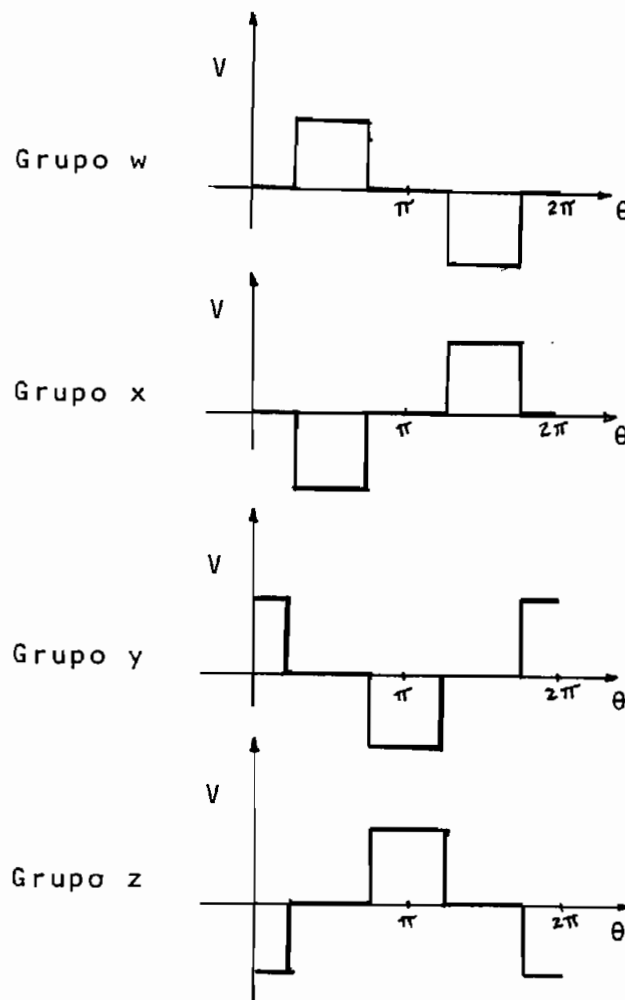


Fig. 2.5 Formas de onda de voltaje en función de la posición del rotor.

## 2.6 VELOCIDAD SINCRONICA Y FRECUENCIA

La velocidad sincrónica del generador bifásico será la misma que está descrita y analizada en el numeral 1.9.

La frecuencia de funcionamiento es 60 Hz.

## 2.7 DETALLES CONSTRUCTIVOS.

Esta máquina, a más de tener las características constructivas mencionadas en el numeral 1.11, se debe realizar el armado con guías para centrar adecuadamente los cuatro rotores de los que está conformada la máquina. Lo antedicho evita la posibilidad de roce y por ende de daños en poco tiempo.

C A P I T U L O    I I I

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL GENERADOR

BIFASICO DE RELUCTANCIA

CAPITULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL  
GENERADOR BIFASICO DE  
RELUCTANCIA.

3.1 GENERALIDADES.

En los capítulos I y II se han planteado las condiciones y posibilidades de diseño y construcción del generador de reluctancia. El presente capítulo tiene el objeto de detallar los pasos seguidos para la construcción del mismo. Se da un diseño tentativo ya que no se dispone de referencias bibliográficas concernientes a este tópico.

### 3.2 DISEÑO. PARAMETROS CONSTRUCTIVOS.

Para el diseño solo se toma en cuenta características generales, en cuanto se refiere a la parte mecánica, ya que el fin de este estudio no es el optimizar los tipos de materiales propios para este caso particular de máquina, por tanto no se transcribe estos cálculos.

Dentro de la parte eléctrica se toman parámetros tentativos para un posible diseño. Se asignan rangos de corriente, voltaje y potencia, debido a que no se poseen ni las ecuaciones de diseño ni tampoco de una guía para realizar los correspondientes cálculos para la construcción.

Los rangos fueron los siguientes:

Voltaje entre 110 y 220 voltios.

Corriente entre 0.5 y 6 amperios

y una potencia de alrededor de 100 watt

Con lo que respecta a la velocidad se toma como parámetro límite 3600 r.p.m..

### 3.3 FUERZAS Y ELEMENTOS PRESENTES.

Existen fuerzas mecánicas y fuerzas electromagnéticas.

Las fuerzas mecánicas se originan por la inercia y por el peso normal de los rotores. Cabe mencionar que por estar balanceados los rotores el efecto de estas al eje no es muy representativo.

Los esfuerzos originados por electromagnetismo están dados por la corriente de campo y por la corriente de armadura. Por la configuración del rotor las fuerzas que presentan estas corrientes son pulsantes periódicas de un valor representativo, las mismas que dependen del número de espiras que constan los bobinados. Además se presenta el efecto del torque electromagnético que se opone al movimiento por efecto generador. Estas fuerzas si afectan a la torción del eje, por tanto son consideradas y calculadas después de dimensionadas las espiras de los bobinados de campo.

Los elementos presentes para el generador ya están mencionados en los dos capítulos anteriores.

### 3.4 DIMENSIONES DEL ESTATOR Y ROTOR.

Para determinar las dimensiones del estator y del rotor, primeramente se vio necesario conseguir las láminas de material ferromagnético, y de acuerdo a éstas medidas dimensionar al estator y al rotor.

- a) Las configuraciones posibles del estator, estudiadas en el capítulo uno, deduce que la forma cuadrada es en la que se puede aprovechar más cantidad de hierro ferromagnético, ya que en las otras configuraciones se debe hacer cortes los cuales disminuyen el camino de flujo y por ende el núcleo.
  
- b) Se realizó un diseño gráfico (fig 3.1), en el cual se tomaron en cuenta las siguientes características: caminos de reluctancia, que las saliencias del estator sean lo más cuadradas, que la variación de la reluctancia sea trapezoidal, debido a que de ésta depende la variación del flujo y por ende el voltaje (onda cuadrada), además aprovechar al máximo el hierro debido a que las condiciones del camino de reluctancia hace que el hierro ferromagnético útil se reduzca considerablemente.

Observando la figura 3.1 se tiene que, si se aumenta

la saliencia el camino del flujo disminuye y si se disminuye la saliencia el espacio para los bobinados va a disminuir, siendo una desventaja ya que lo que se requiere es que los bobinados estén ubicados lo más próximos al camino de menor reluctancia, por ésos inconvenientes se trata de optimizar lo mejor posible graficamente, siendo el resultado el mostrado en la figura de la lámina 1G para el estator, y 2G para el rotor.



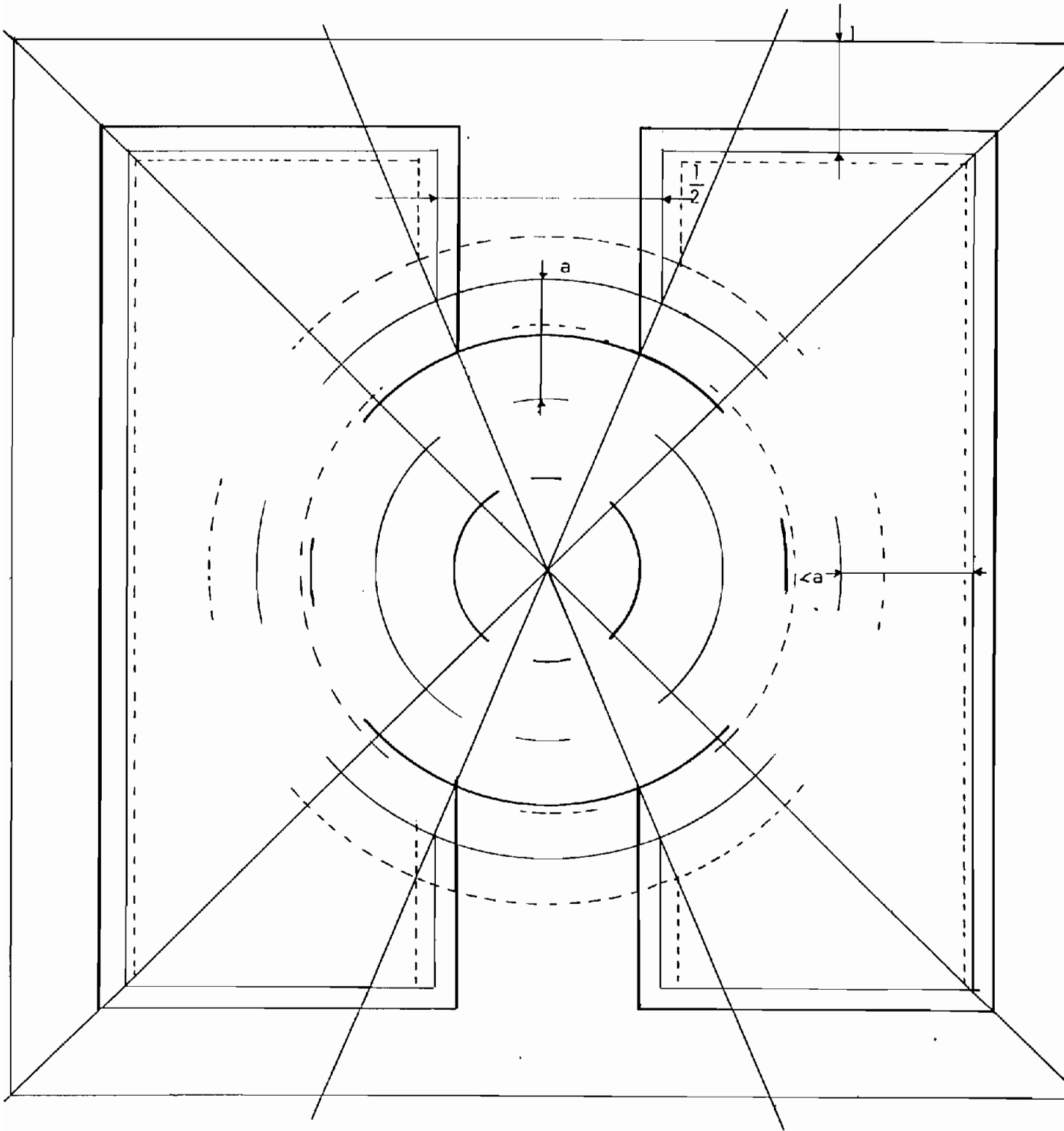


Fig. 3.1 Dimencionamiento gráfico  
(escala 1.1)

### 3.5 DIMENSIONAMIENTO DE LOS DEVANADOS.

#### a) Cálculo de la bobina de campo

$$N_f = \frac{B_g}{\mu_0 I}$$

Datos:  $0.5 < I < 1.5$  A (criterio de diseño para corriente de campo)

y con  $1.5 > J > 3.5$  del cual se dispone el cuadro de valores de capacidad de corriente de acuerdo a  $J = 2.8 \frac{A}{mm^2}$  se escoge la corriente de 0.91 A que corresponde al conductor AWG # 22 (apéndice 2)

Densidad de flujo = 6000 Gauss

$g = 0.05$  m (entrehierro mayor)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ wb/A}\cdot\text{m}$$

Reemplazando éstos datos se tiene:

$$N_f = 26234 \text{ espiras}$$

De acuerdo al apéndice 3 se puede decir que este cálculo de números de espiras no es posible colocarlas en el espacio físico disponible, por lo tanto se realizan varias bobinas y a las cuales se harán las pruebas correspondientes en el laboratorio, y luego sacar de acuerdo a éstas los parámetros nominales del generador.

b) Calculo de la cantidad de conductor de cobre para las bobinas.

Del numeral 3.5 a) se ve necesario la construcción de varios bobinados por tanto:

para el cálculo de la cantidad de conductor de cobre para las bobinas se escogio arbitrariamente .

- AWG # 22

- AWG # 15

- De acuerdo al apéndice 3, cuadro 3A (que no sobrepase el número de espiras indicado); y siguiendo el criterio de que cada bobina ocupará la mitad del espacio en el estator, como máximo.

CUADRO b.1

BOBINAS	AWG#	N	AWG#	N	PESO #22 (libras)	PESO #22 (libras)
9 y 10	22	200	15	160	0.20	1.04
11 y 12	22	200	15	160	0.20	0.98
13 y 14	22	700	15	160	0.82	1.18
15 y 16	22	1400	15	160	1.98	1.38
17 y 18	22	3000	15	320	5.89	4.15
19 y 20	22	700	22	800	0.79	1.17

De donde: peso del cobre en gramos por metro (Apéndice 2)

Peso del bobinado =  $l_a \times \text{peso (gr/m)} \times 2.205/1000$  ( $l_a$ , Apéndice 4). Se escoge un margen de seguridad del 20%, ya que en las pruebas pueden existir daños.

Cantidad total para las pruebas monofásicas: AWG # 22-121 libras y AWG # 15-12 libras.

Fuerza Máxima en el eje =  $B^2/2\mu_0 u = 143239.44 \text{ N/m}^2$  (20.52 Kg)

### 3.6 CALCULO DEL EJE Y DE LA BASE

El cálculo del eje y de la base no se realizó por medio de ecuaciones que rigen el funcionamiento de éstos. Se realizó un estudio de los tipos de aceros disponibles en el mercado, y concretamente para el eje. Cabe mencionar que una de las características que deberá poseer el eje es, tener un diámetro lo menor posible, para que no influya en la circulación del flujo a través y otra, ser rígido, es decir, con una flexión que tienda a cero. Con éstos antecedentes y de acuerdo a sus características se observó que el acero CEAX de veinte milímetros de diámetro, cumple las condiciones para la construcción del prototipo.

Las características dadas por el fabricante son:

Dureza, HB	180 - 225
Punto de cedencia $R_{e1}$ min., N/mm <sup>2</sup>	280 - 320
Resistencia a la tensión $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	590 - 740
Elongación $A_5$ min., %	16
Resistencia al impacto KU+20°C min.,	15
Dureza después de templado por inducción	
HRC	57 - 63
Tolerancia del diámetro	h8
Redondez (diferencia de radio)	1/3 de la Tol Diam.

Rectitud, mm/m	0.2
Divergencia media aritmética de superficie	$R_a$ , mm 0.6-1.2
Soldabilidad	limitada
Maquinabilidad según SMF,	30/min.

Acero al carbono 0.45% de carbono y 0.60% de manganeso

Acero tipo 3 /12- 125 mm de diámetro.

Para el dimensionamiento de la base se toma las dimensiones físicas del prototipo; con lo que respecta al largo, este es la suma de los espacios para el caso cuando las bobinas ocupen todo el espacio disponible en el estator.

En la lámina 9G se especifica la base y en la lámina 10G el eje.

NOTA: Para el grosor de la lámina de la base se siguió el criterio de la persona quien colaboró con el resto de la construcción; se sigue este criterio ya que de lo contrario resulta un cálculo demasiado tedioso, sin ser justificable, debido a que el estudio en este prototipo es la parte del comportamiento eléctrico.

### 3.7 PROCESO DE CONSTRUCCION.

- 1.- Obtención del material ferromagnético para las láminas del rotor y el estator.
- 2.- De acuerdo a las medidas del material ferromagnético se realizó las configuraciones finales del estator y el rotor.
- 3.- Diseño y construcción de las matrices mecánicas para el corte de las láminas. (Láminas #0 hasta #16).
- 4.- Troquelado de las láminas (Láminas #1G y 2G).
- 5.- Construcción de los grupos tanto del estator como del rotor ( Láminas #(5G,6G,7G y 8G).
- 6.- Construcción de los bocines ( Lámina #4G).
- 7.- Construcción de la base (Lámina # 9G)
- 8.- Construcción del eje (Lámina #10G).
- 9.- Construcción de los portacojinetes extremos (Lámina #3G).

- 10.- Construcción de los sujetadores laterales  
(Lámina #10G).
- 11.- Construcción del apoyo portacojinete central  
(Lámina #10G).
- 12.- Construcción de la guía bornera (Lámina #10G)
- 13.- Armado de las partes constitutivas del generador y centrada del eje.
- 14.- Construcción de la bornera y de la tapa bornera.
- 15.- Pruebas mecánicas de funcionamiento del generador, con lo que respecta a velocidad y resistencia mecánica en el laboratorio.
- 16.- Construcción de las bobinas. (monofásico).
- 17.- Construcción de las tapas laterales y superior  
(De mica transparente).
- 18.- Construcción de las bobinas (bifásico).

CANTIDAD DE PIEZAS	NUMERO DE LAMINA	DESIGNACION	DIMENSIONES	OBSERVACIONES	TIPO DE MATERIAL
1	1	Punzón	155x155x70		DF2
1	4	Matriz	250x250x20		DF2
2	2 y 5	Guía y Súfridera	250x250x20		Acero 760
2	3	Separador	250x20x2		Acero 760
1	7 y 8	Punzón	Ø 100 Largo 70		DF2
1	10	Matriz	200x200x20		DF2
2	9 y 10	Guía y Sufridera	200x200x20		Acero 760
2	8	Separador	200x20x2		Acero 760
1	14	Punzón	Ø 20 Largo 70		DF2

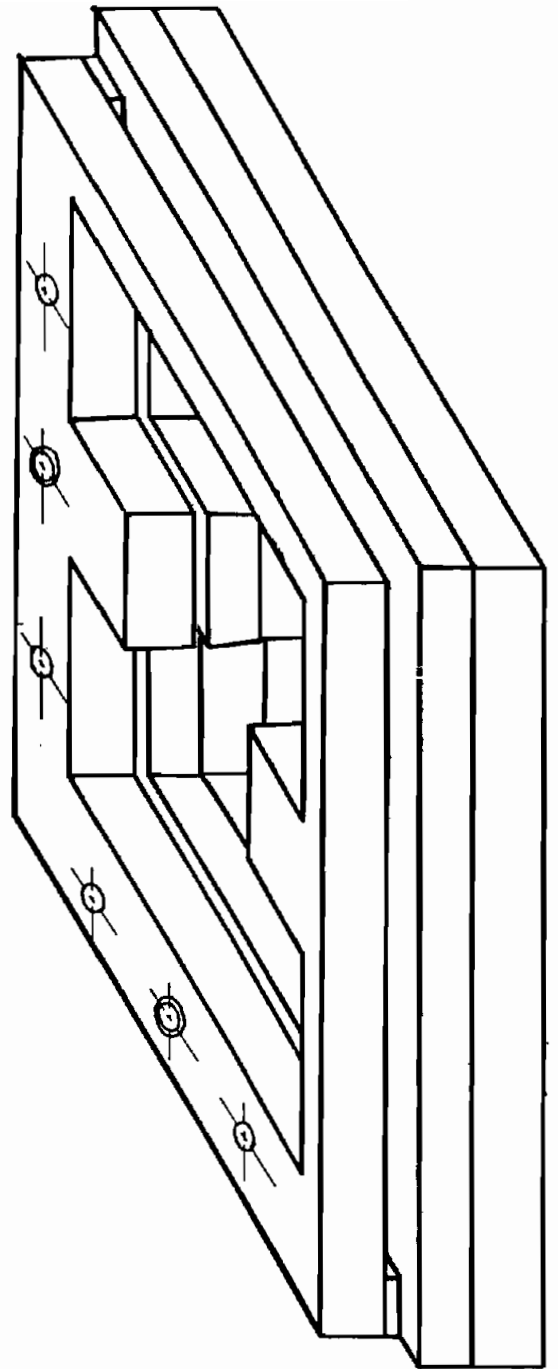
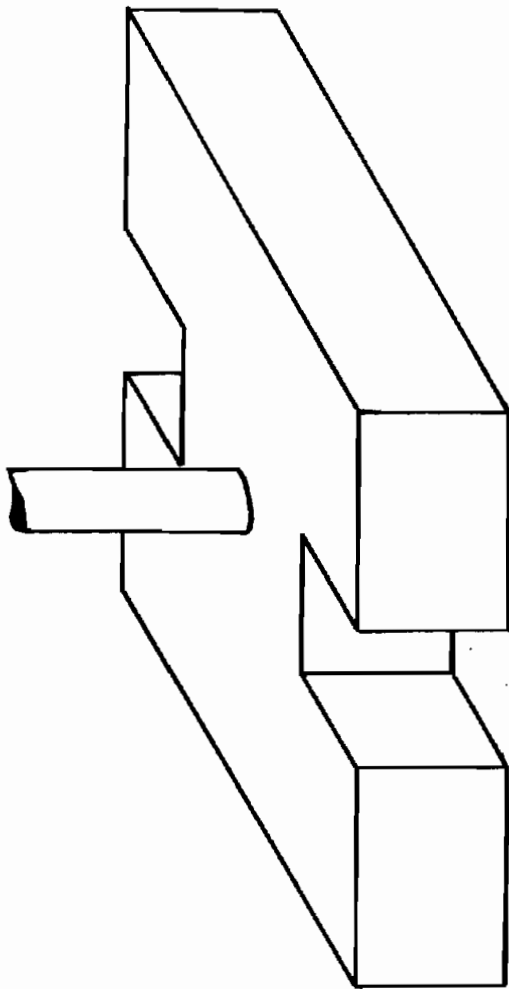


1	15	Matriz	120x120x20		DF2
2	13 y 16	Guía y Sufridera	120x120x20		Acero 760
2	14	Separador	120x20x3		Acero 760
472	1G	Estator	190x190	Láminas	Ferromagnético
472	2G	Rotor	Ø 100	Láminas	Ferromagnético
2	3G	Apoyo	Ø 50 Largo 20	Portacoginetes o Chumacera	Acero ST37
4	4G	Bocín	Ø 36 Largo 70	Remachado después de colocado el grupo rotor.	Acero ST37
4	5G	Sujetador del Estator	570x65x1.5	Doblado	Acero ST37
2	6G	Soportes extremos	Angulo 200x40 Espesor 4.8	Soldado con el sujetador del estator	Acero ST37

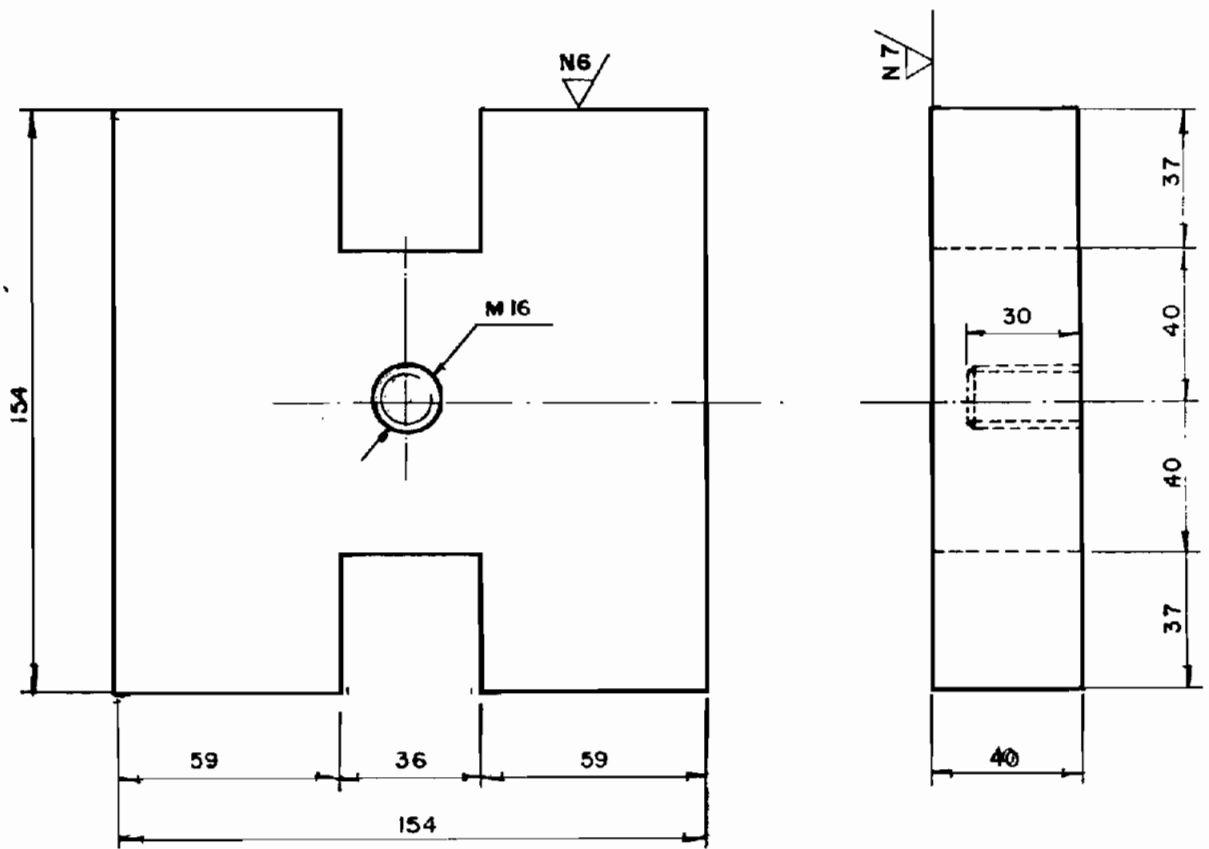
1	9G	Base	111x540x3	Platina soldada con el tubo cuadrado	Acero ST37
1	9G	Tubo Cuadrado	41x20 Largo 1500	Soldada con la Platino de la base	
1	10G	Eje	Ø20 Largo 732		Acero CEAX
2	10G	Sujetador Lateral	T de 38 1/8 " Grosor 650	Soldado con los sujetadores de los estatores	Acero ST37
1	10G	Apoyo central	180x120x3	Soldado con la base y los sujetadores laterales	Acero ST37
1	10G	Gufa Portabornera	150x150 1/16 " Grosor	Doblados sus extremos y soldados después de esto	Acero ST37
3		Cojinetes		Número de pedido 6204-22	
		Alambre de Cobre		# AWG 15 14 libras # AWG 22 18 libras	

1	Tapa bornera	25x17	Lámina para copia xerox sujetado con 4 tornillos tripa de pato	
1	Caja bornera	25x17x10	Con una base soldada a la base del generador y con un tornillo tripa de pato al sujetador late- ral. La construcción de la caja con platina de 1 mm de espesor.	
6	Tornillos	Ø 6 Largo 55	Dos tornillos para cada matriz mecánica.	
12	Pasadores	Ø 8 Largo 55	Cuatro pasadores para cada ma- triz mecánica.	Acero 760
4	Prisioneros	1/4x1/4 "	Sujetadores para los rotores, maquinado en el bocín del rotor con machuelo de 1/4.	
11	Tornillos	De 5 mm de largo	Tripa de pato	
1	Tapa Superior	218x630x 4 100x210x 4 100x638x 4	Pegadas las tres piezas mencio- nadas, y sujetada con tornillos tripa de pato al generador.	Mica trans- parente
1	Tapa lateral	280x105x 4	Sujetado al generador con torni- llos tripa de pato.	Mica trans- parente

1	Tapa Lateral	259x107x 4	Sujetado al generador con tornillos tripa de pato	Mica transparente
1	Tapa lateral	640x87x 4	Sujetado al generador con tornillos tripa de pato	Mica transparente
16	Terminales		Colocados en la tapa bornera	material aislante



		<b>TESIS DE GRADO</b>	
<b>GENERADOR DE RELUCTANCIA</b>	<b>TOL.</b>	<b>ESCALA</b> 1: 2	<b>LAMINA N° 0</b>   <b>FECHA: 7/85</b>
			<b>DIBUJO: Pedro Toinga V.</b>
<b>M A T R I Z</b>		<b>E.P.N.</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>ELECTRICA      POTENCIA</b>



MATERIAL : Acero DF-2

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 1

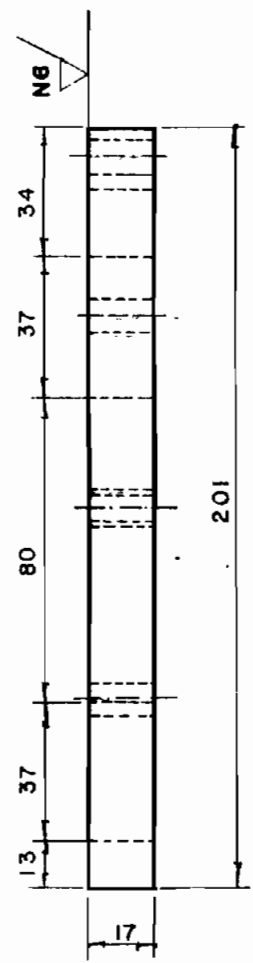
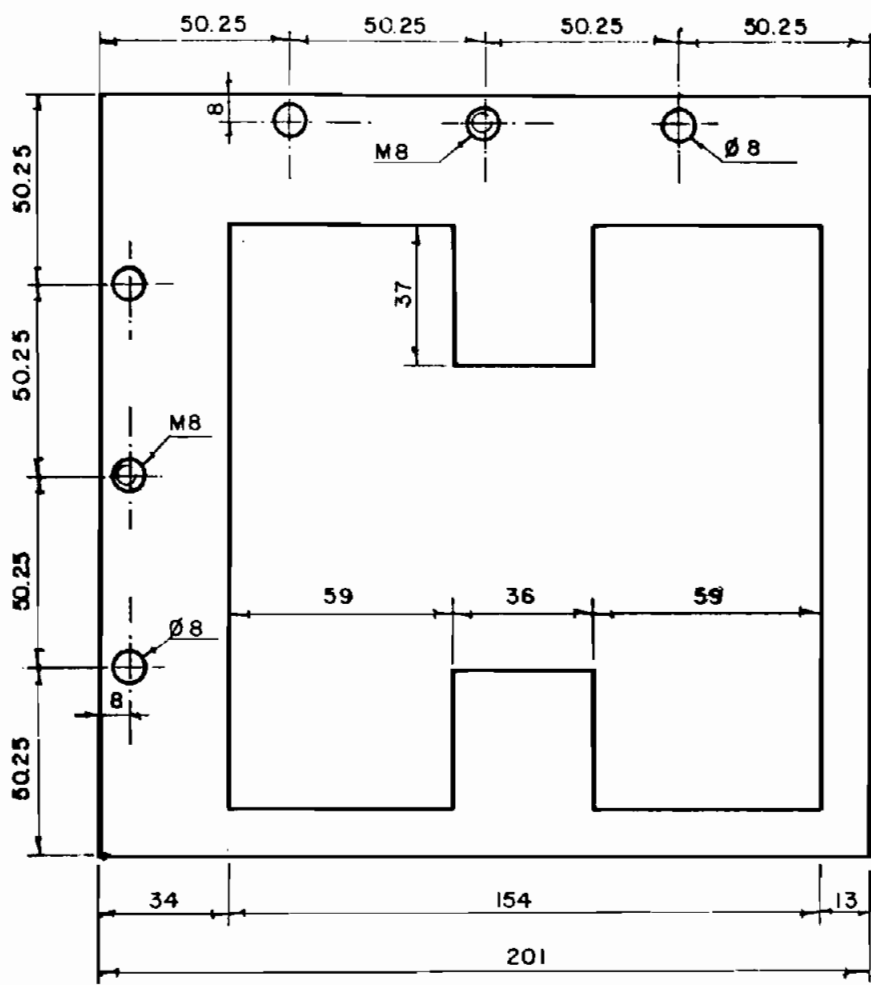
FECHA: 7 / 85

DIBUJO: PEDRO TOINGA V.

PUNZON

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 2

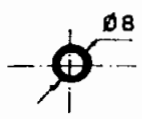
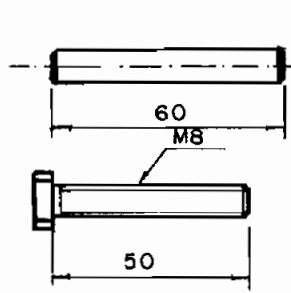
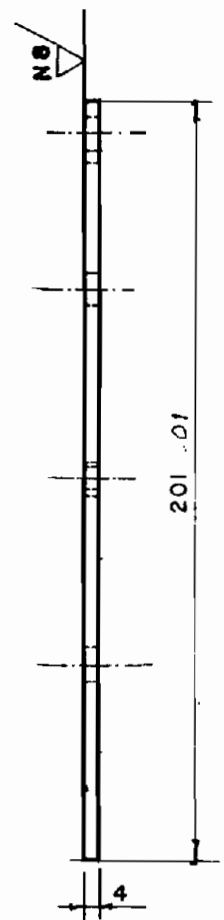
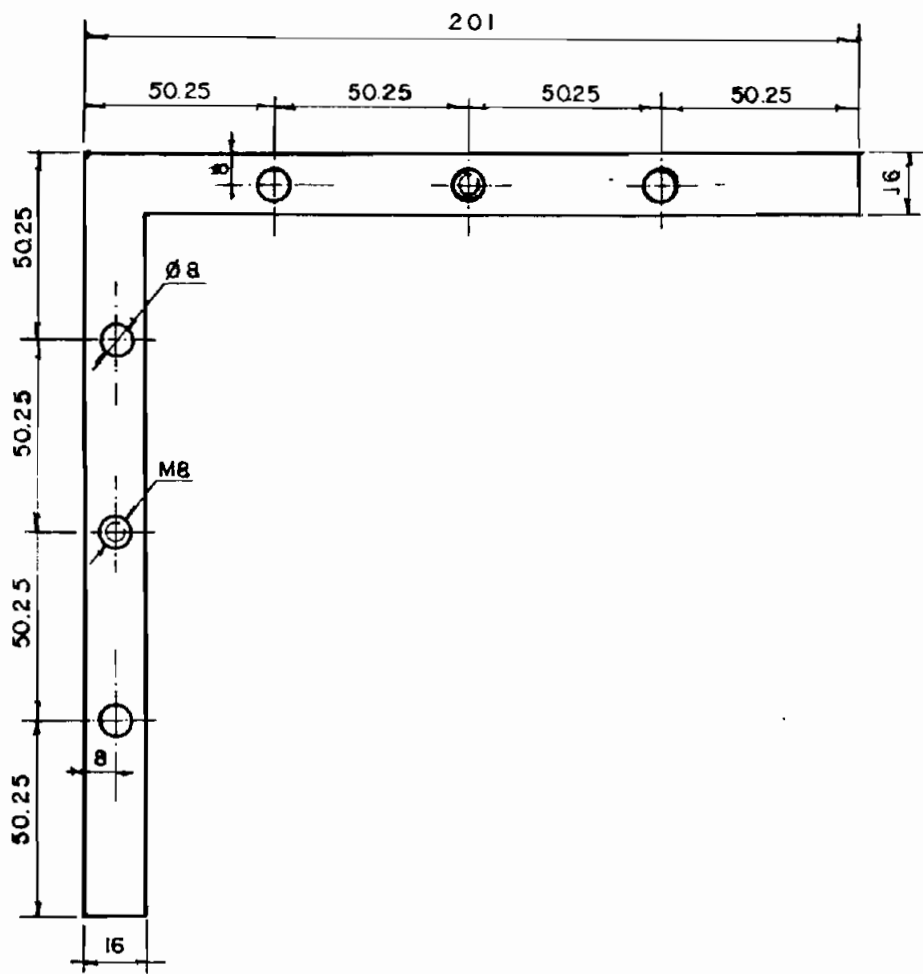
FECHA: 7/85

DIBUJO: Pedro Toinga V.

G U I A

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



PASADOR

PERNO

MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 3

FECHA: 7 / 85

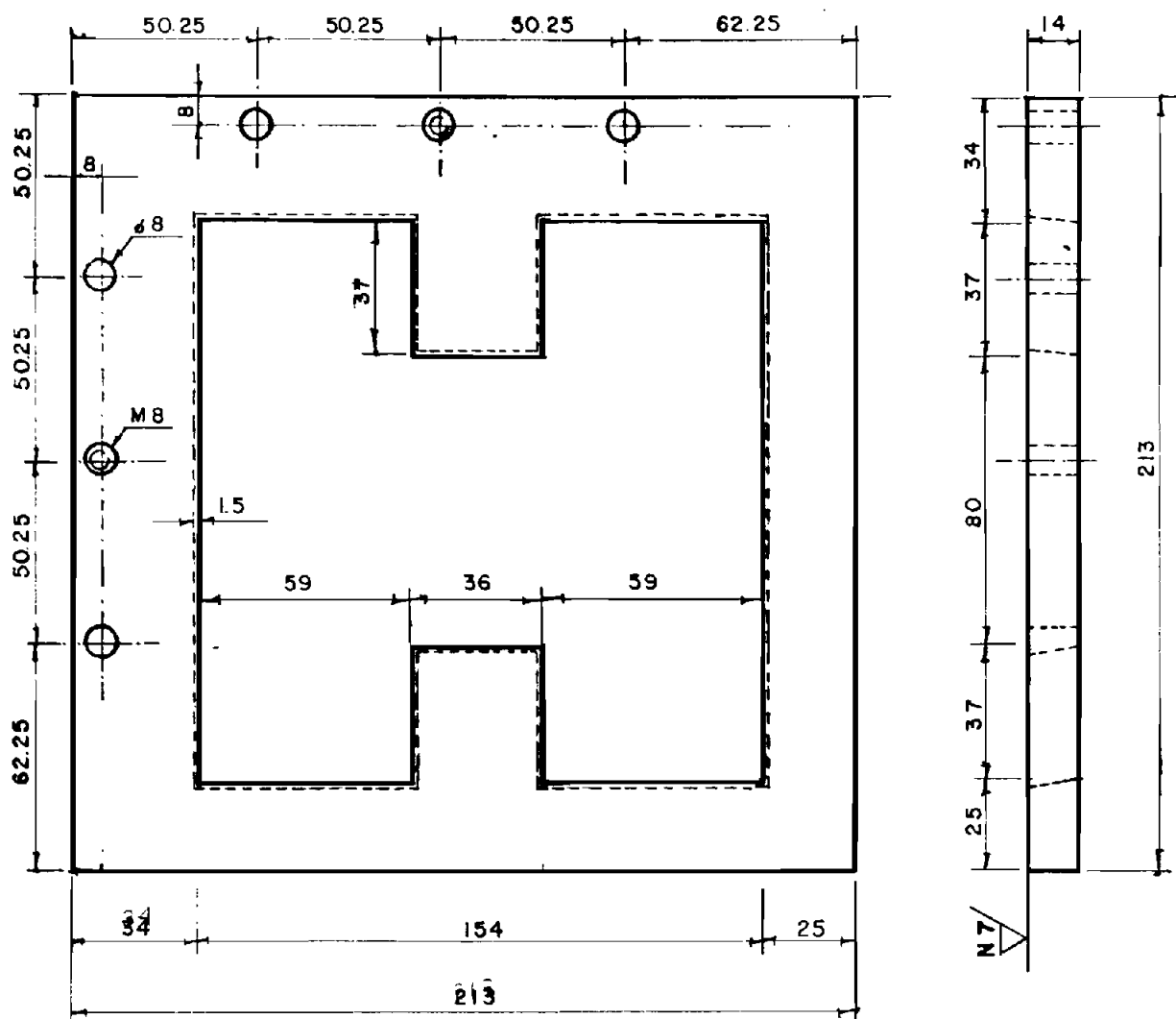
DIBUJO: Pedro Toinga V.

S E P A R A D O R

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA





MATERIAL: Acero DF-2

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL :0.02

ESCALA  
1: 2

LAMINA Nº 4

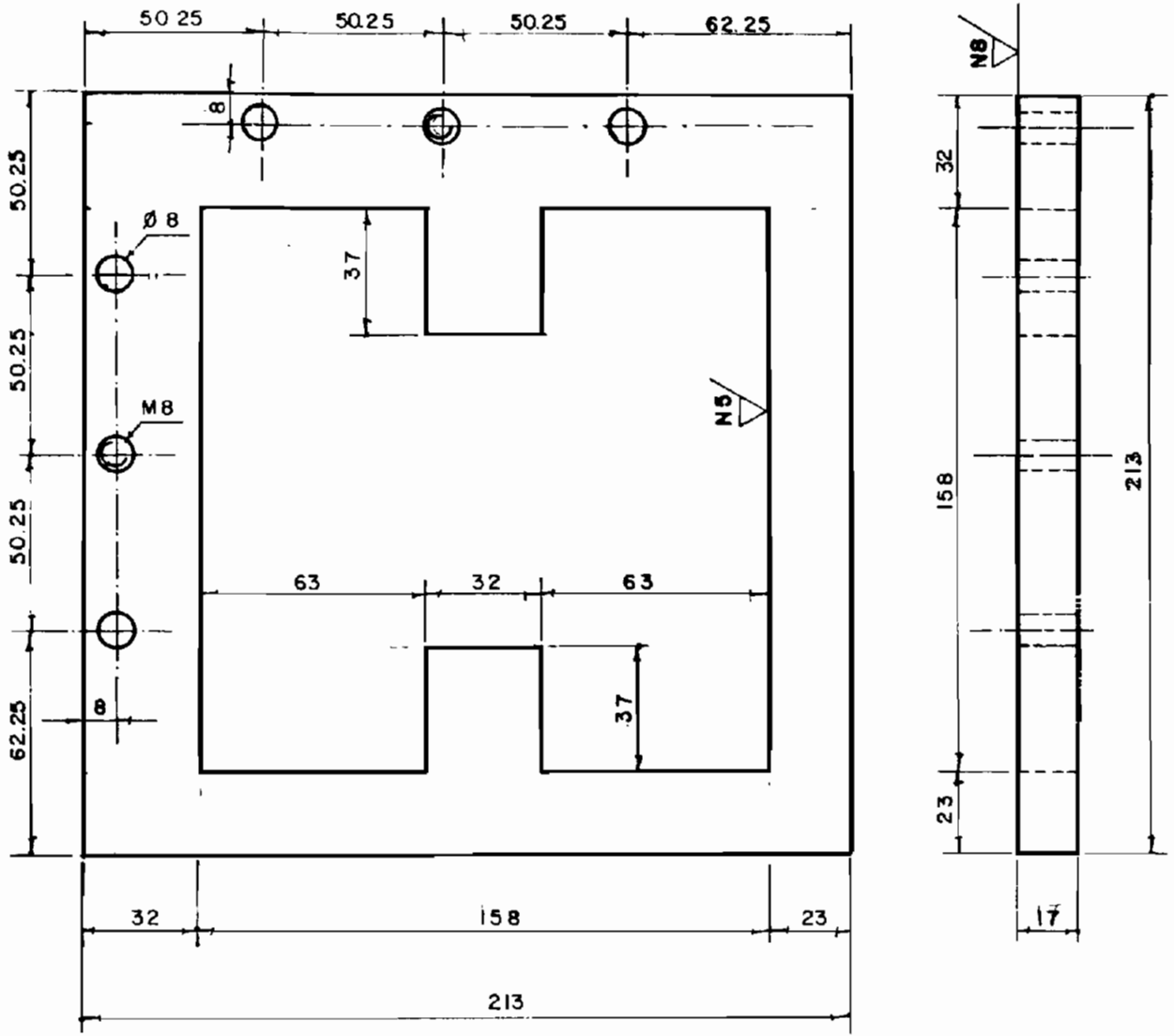
FECHA: 7/05

DIBUJO: Pedro Toingo V.

MATRIZ

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRIA - POTENCIA



MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL : .02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 5

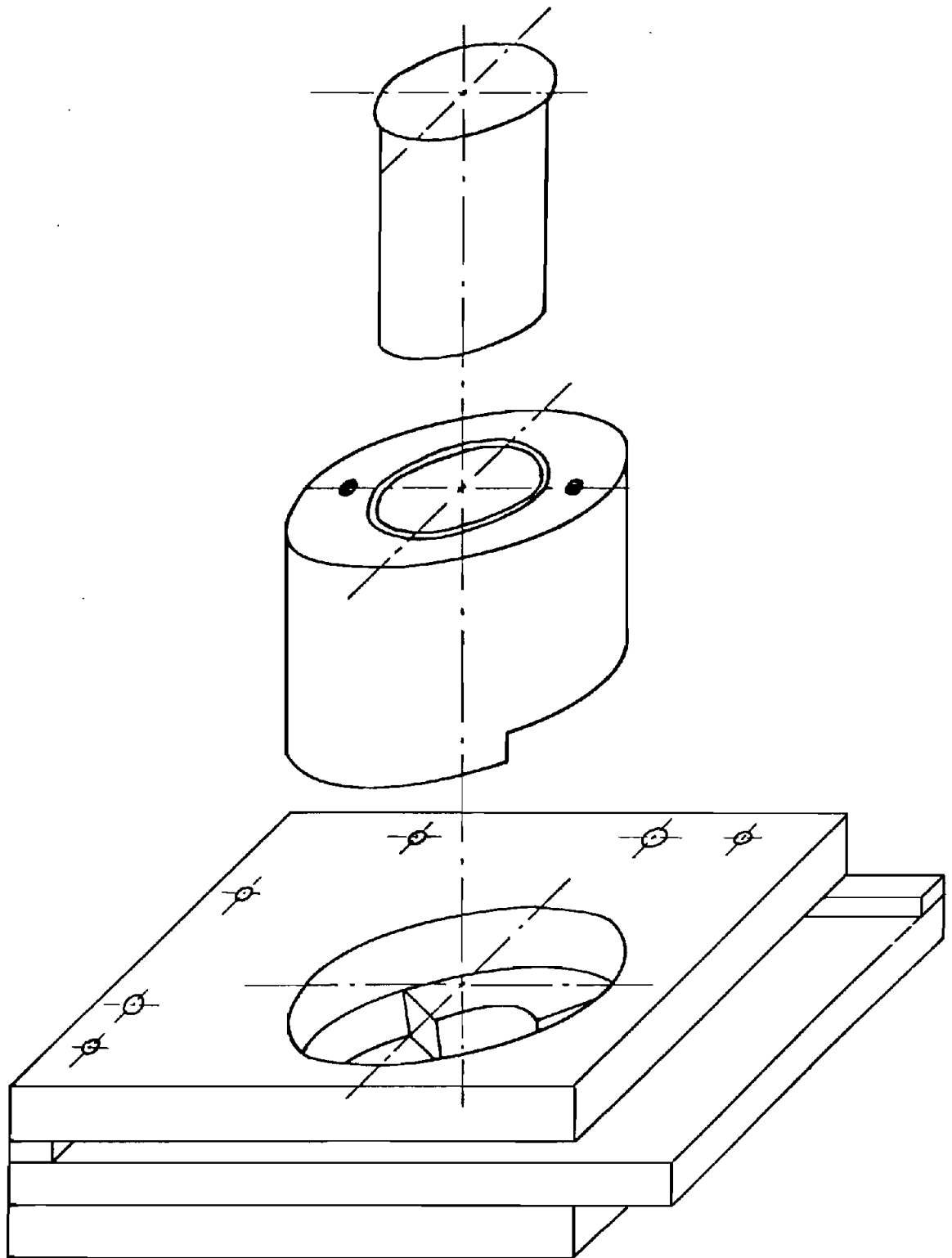
FECHA: 7 / 85

DIBUJO: Pedro Tolnga V.

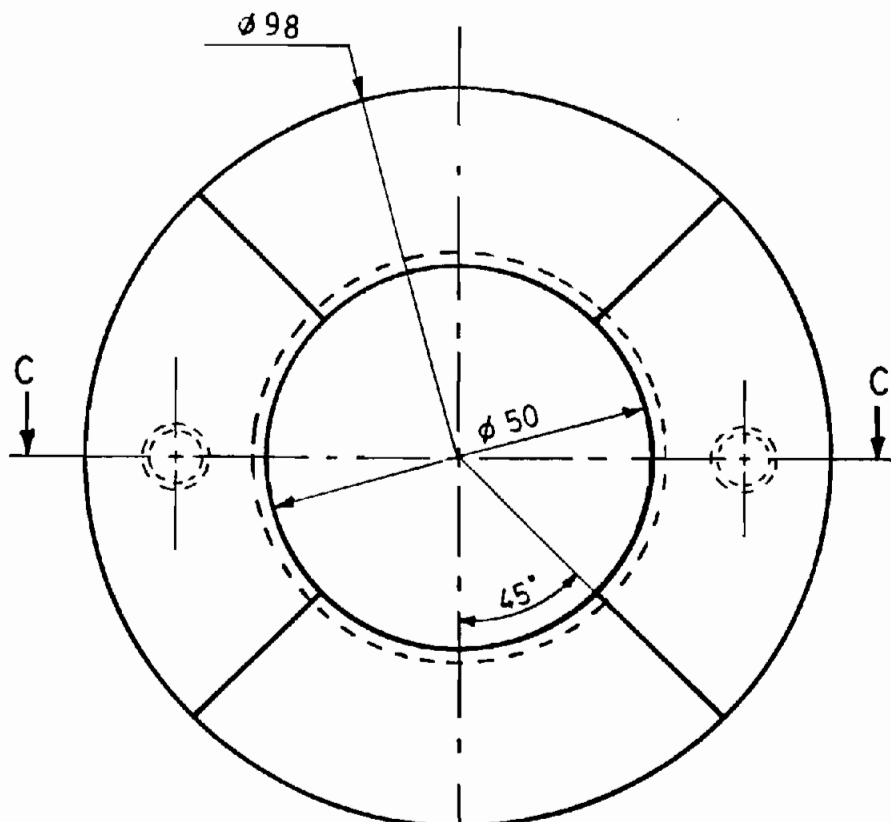
SUFRIDERA

E.P.N.

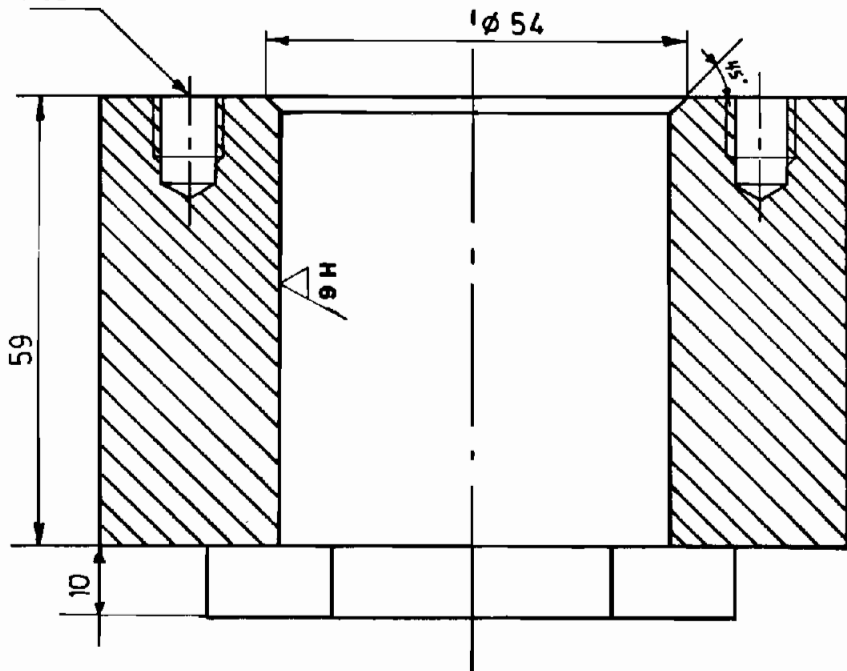
FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



		<b>TESIS DE GRADO</b>	
<b>GENERADOR DE RELUCTANCIA</b>	<b>TOL:</b>	<b>ESCALA</b> 1 : 2	<b>LAMINA: N° 6</b> <b>FECHA: 7/85</b>
			<b>DIBUJO: Pedro Toinga V.</b>
<b>MATRIZ MECANICA</b>		<b>E.P.N.</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA - POTENCIA</b>



M long. min. 8



MATERIAL: Acero DF - 2

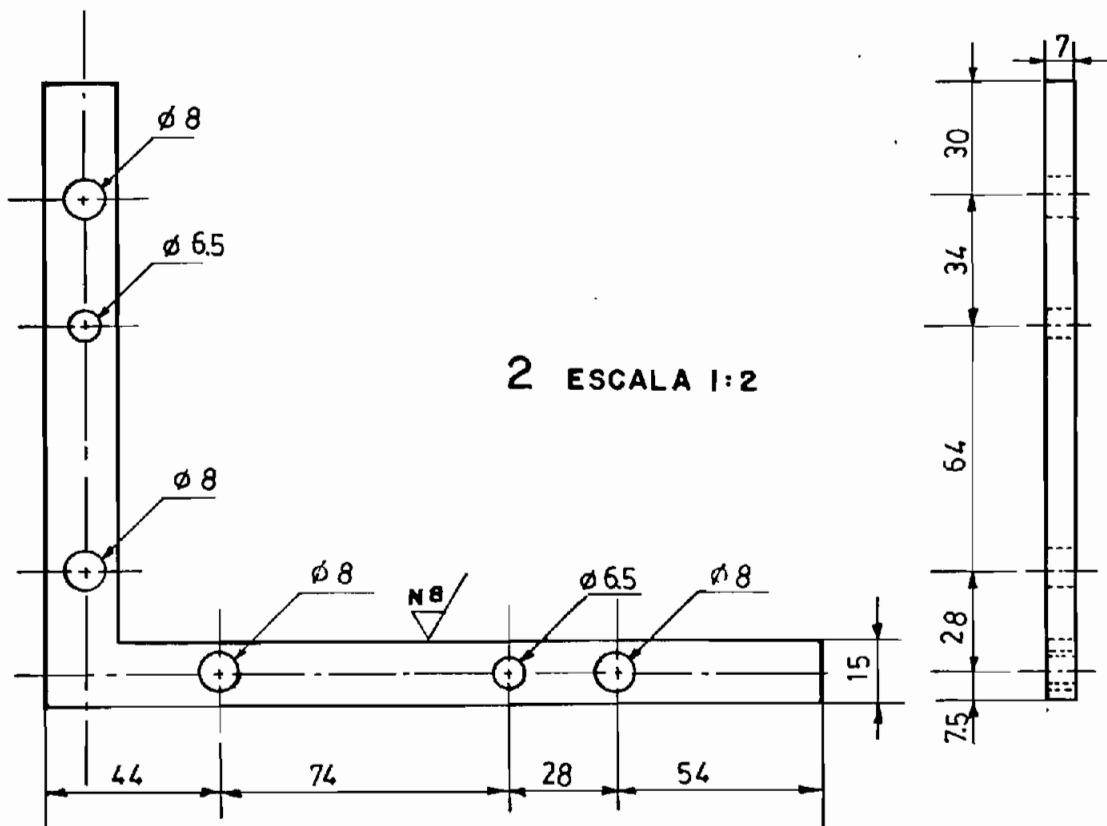
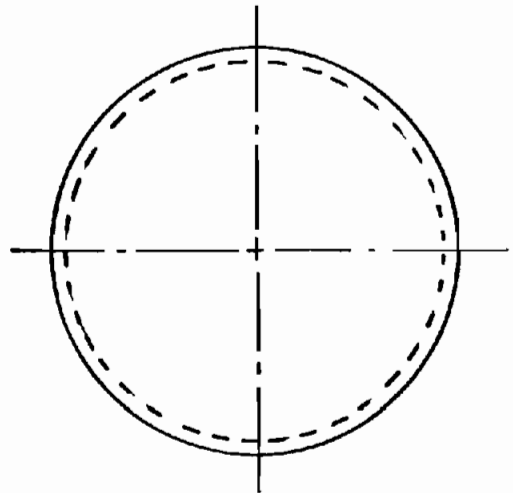
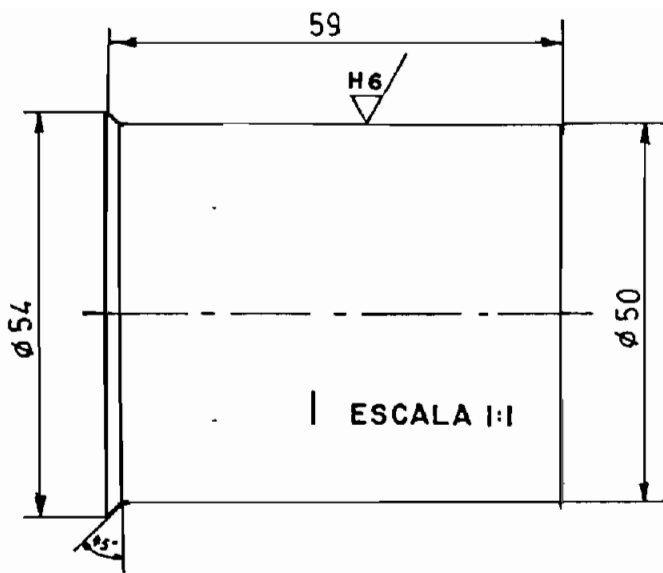
TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA TOL.0.02

ESCALA 1:1 LAMINA Nº 7 FECHA: 7/85  
DIBUJO: Pedro Toinga V.

PUNZON (PARTE EXTERIOR)

E.P.N. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA - POTENCIA



MATERIAL:

- 1.- Acero DF-2
- 2.- Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL:002

ESCALA  
INDICADA

LAMINA Nº 8

FECHA: 7 / 85

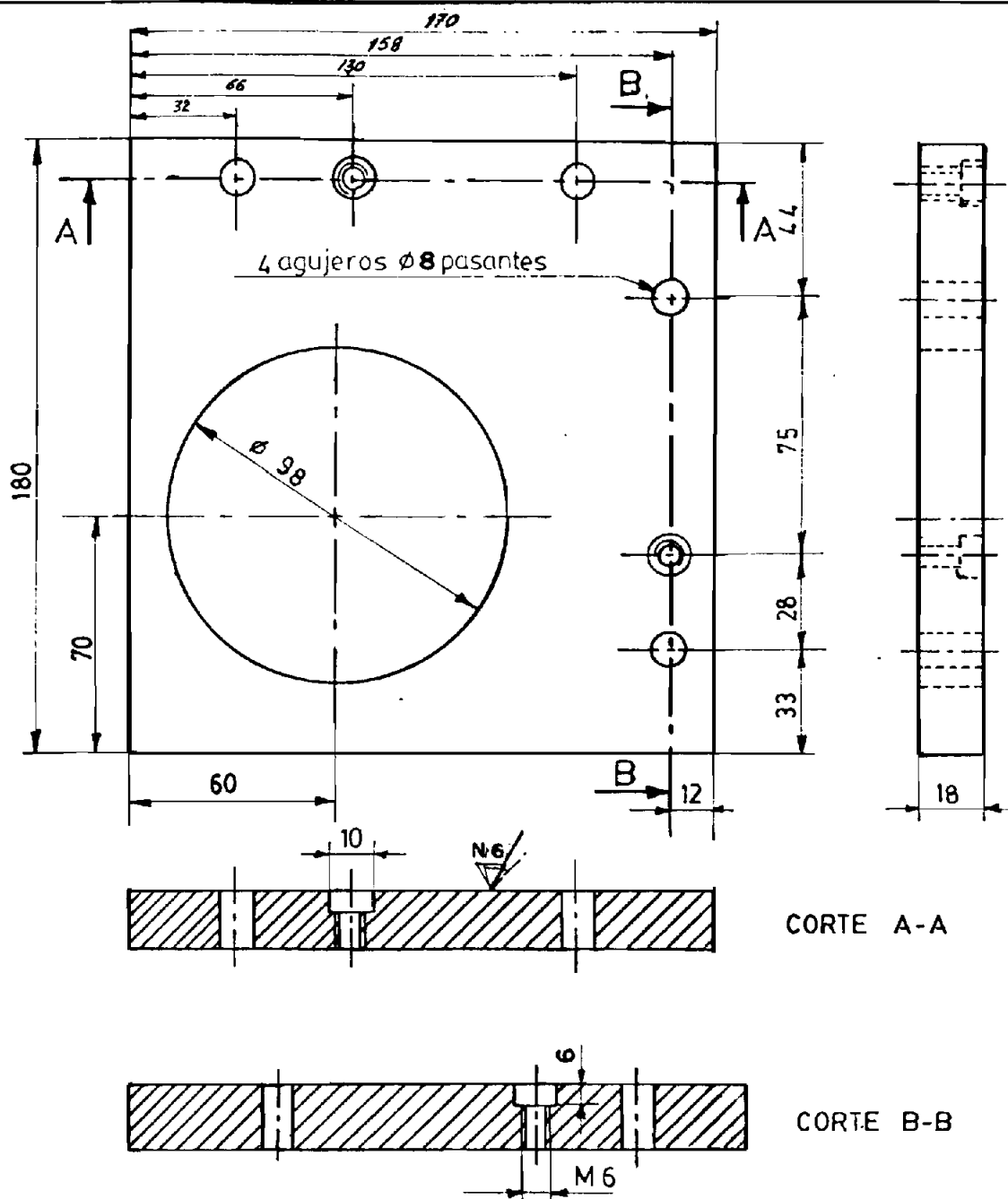
DIBUJO: Pedro Toinga V.

1.- PUNZON (PARTE INTERIOR)

2.- SEPARADOR

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.0.02

ESCALA  
1-2

LAMINA: N° 9

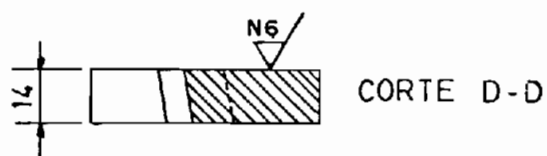
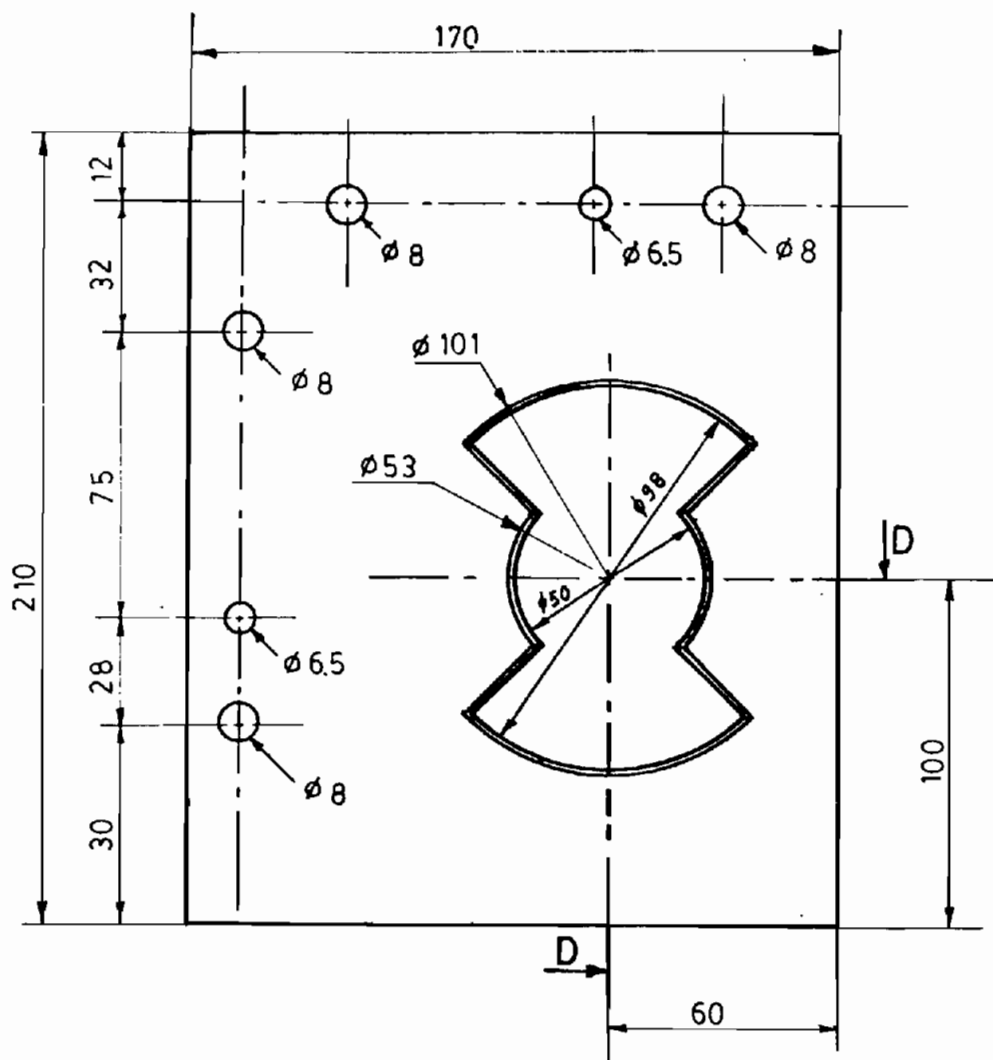
FECHA: 7 / 85

DIBUJO: Pedro Toinga V.

G U I A

E. P. N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



MATERIAL: Acero DF-2

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 10

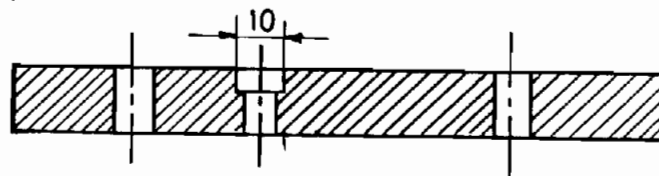
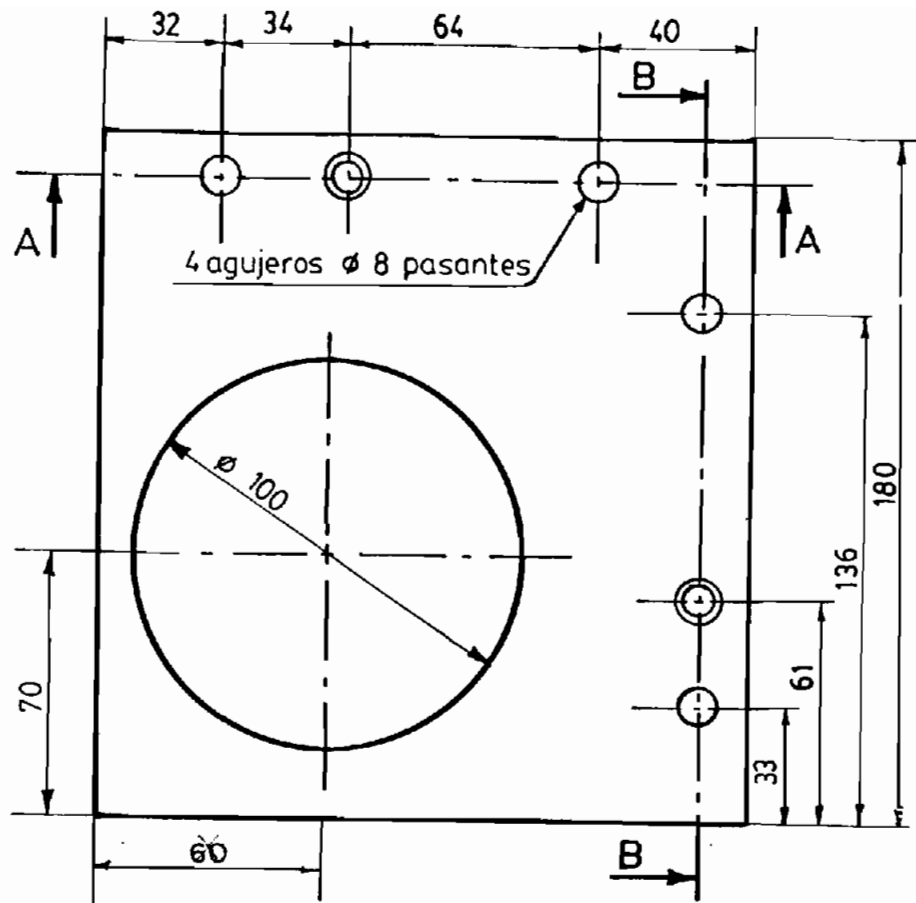
FECHA: 7/85

DIBUJO Pedro Toingo V.

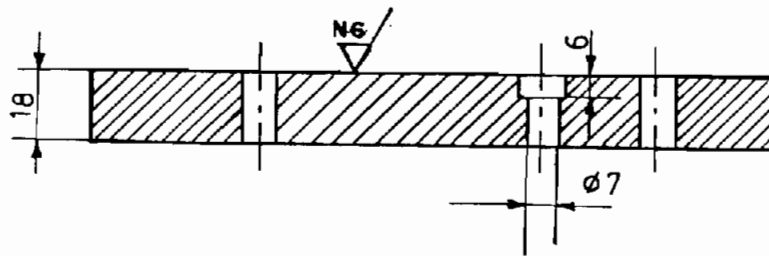
M A T R I Z

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



CORTE A-A



CORTE B-B

MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA N° II

FECHA: 7/85

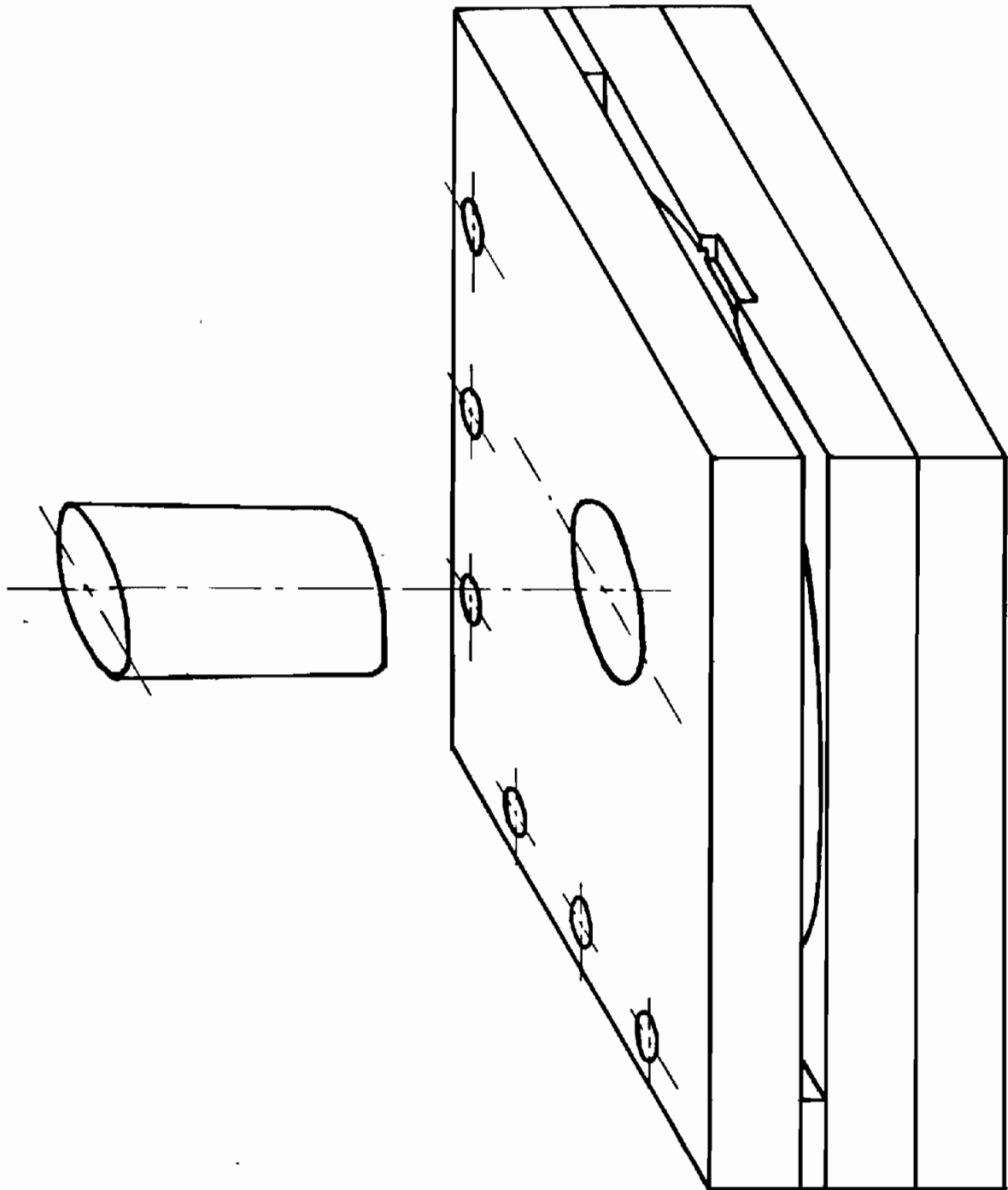
DIBUJO: Pedro Toinga V.

SUFRIDERA

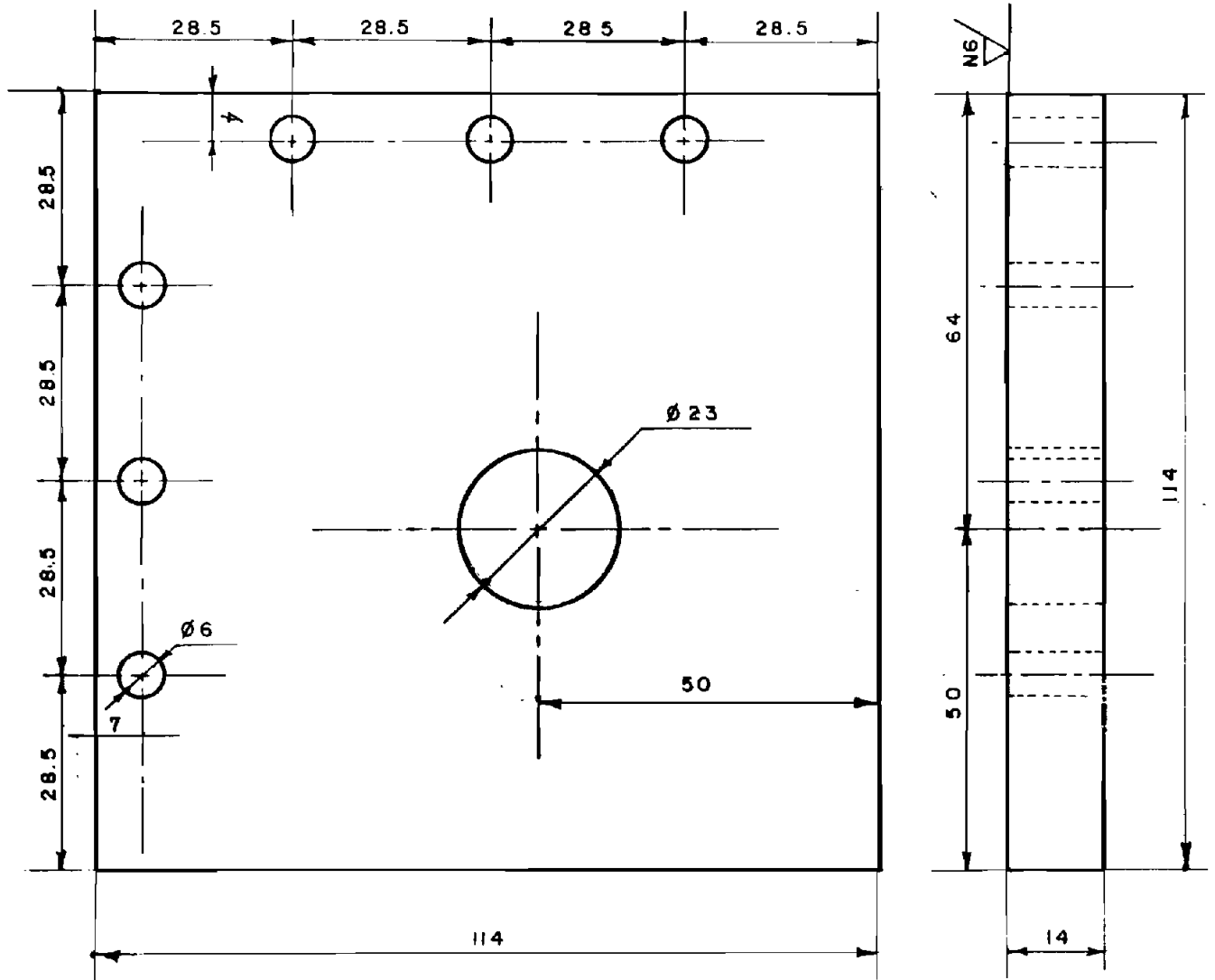
E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA





		<b>TESIS DE GRADO</b>			
<b>GENERADOR DE RELUCTANCIA</b>		<b>TOL.</b>	<b>ESCALA</b>	<b>LAMINA N° 12</b>	<b>FECHA: 7/85</b>
			<b>1:2</b>	<b>DIBUJO: Pedro Toinga V.</b>	
<b>MATRIZ MECANICA</b>		<b>E.P.N.</b>		<b>FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA - POTENCIA</b>	



MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.02

ESCALA  
1:1

LAMINA N° 13

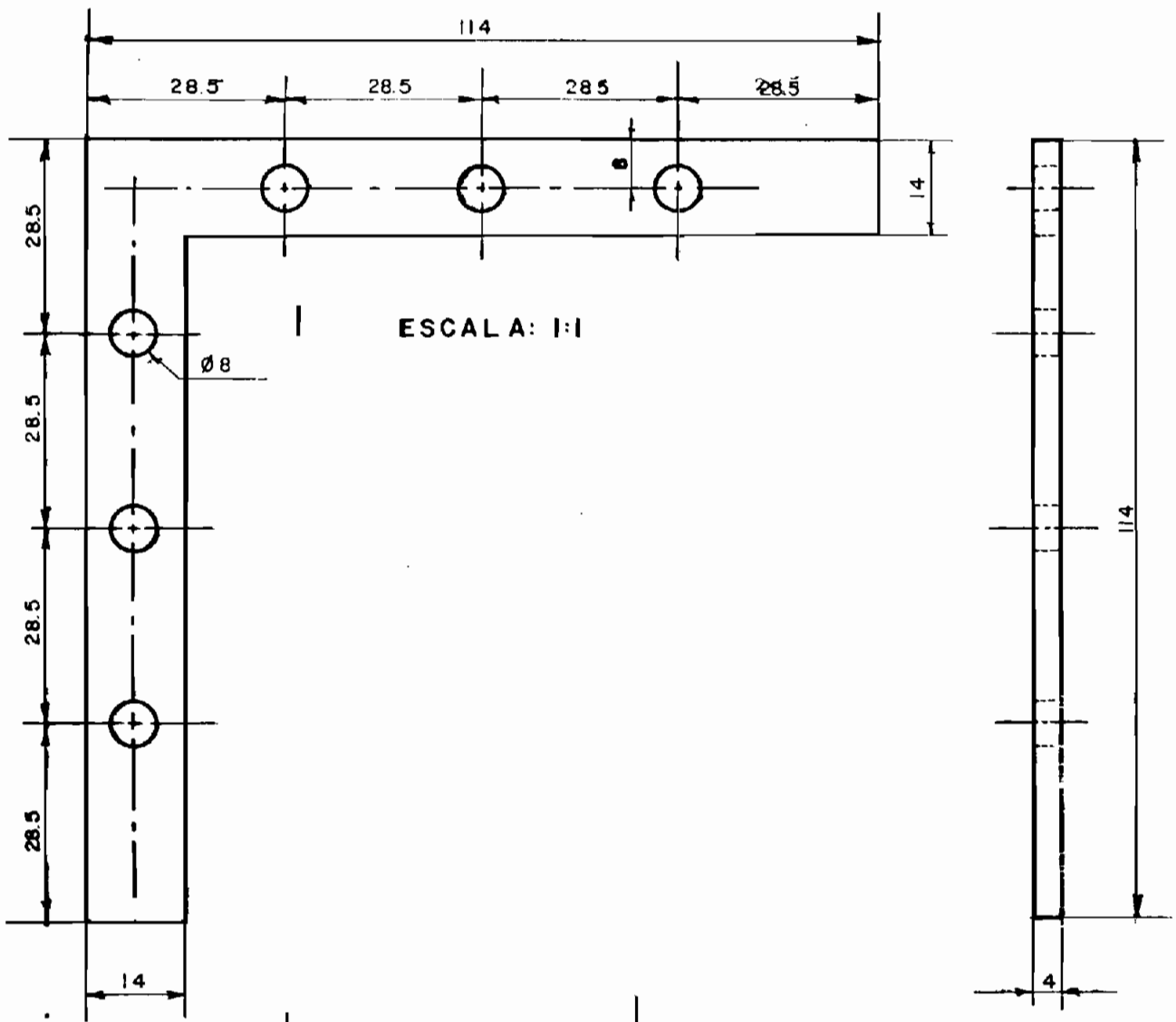
FECHA: 7 / 85

DIBUJO: Pedro Tolnga V.

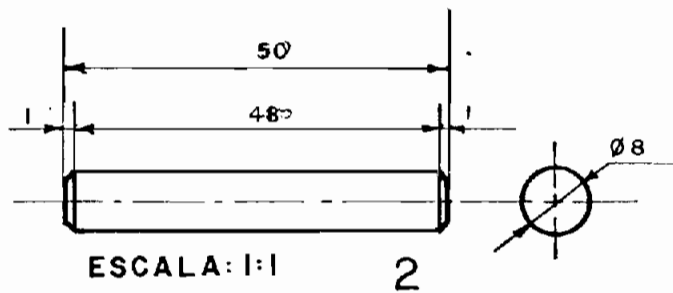
G U I A

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA — POTENCIA

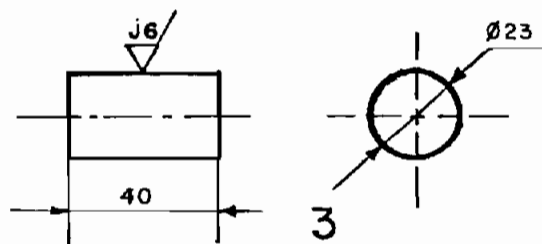


ESCALA: 1:1



ESCALA: 1:1

2



ESCALA: 1:2

3

MATERIAL:

1.- Acero 760

3.- Acero DF-2

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.05

ESCALA  
INDICADA

LAMINA Nº 14

FECHA: 7/85

DIBUJO: Pedro Tolinga V.

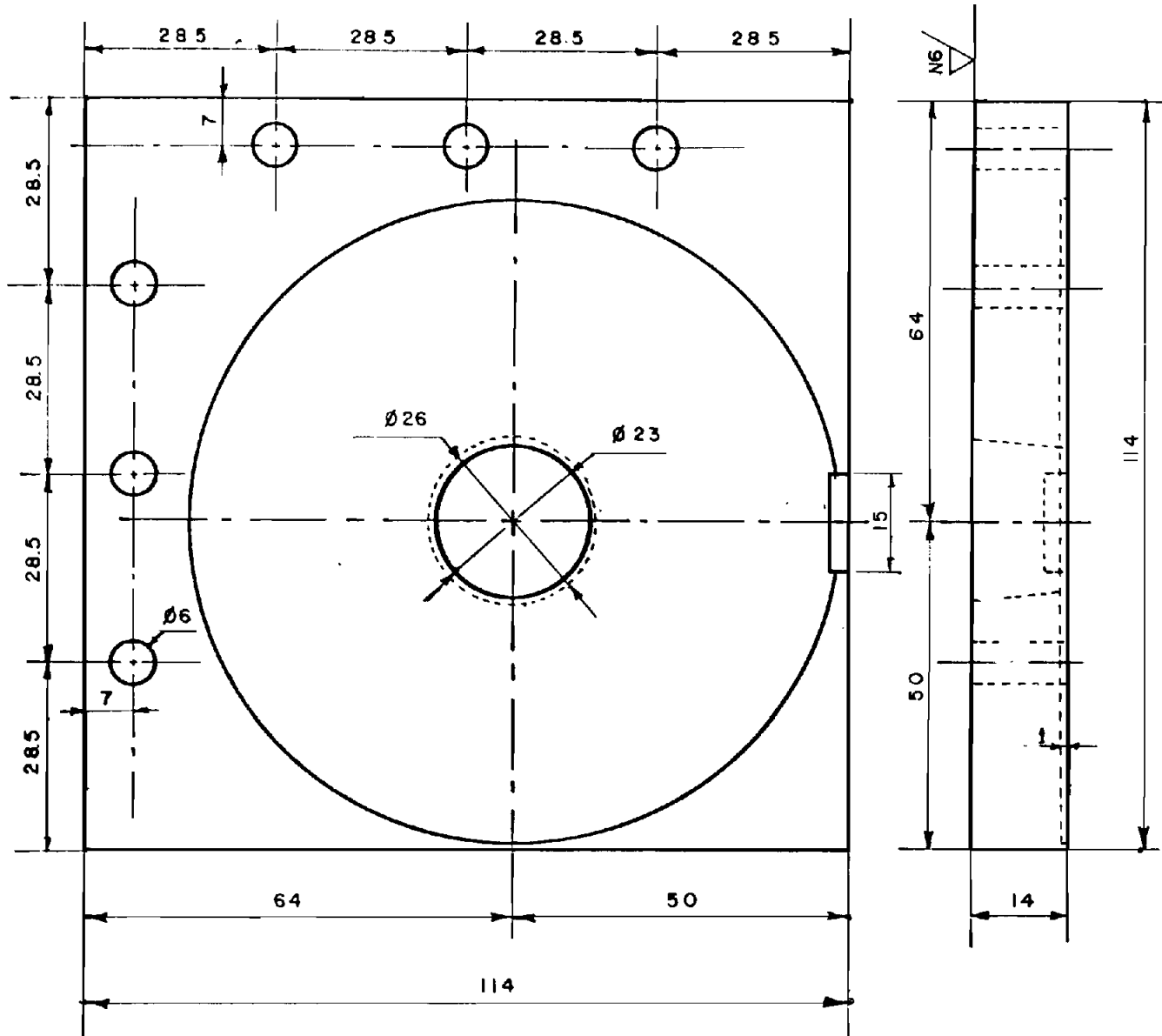
1.- SEPARADOR

2.- PASADOR

3.- PUNZON

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA — POTENCIA



MATERIAL: Acero DF-2

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.002

ESCALA  
1:1

LAMINA Nº15

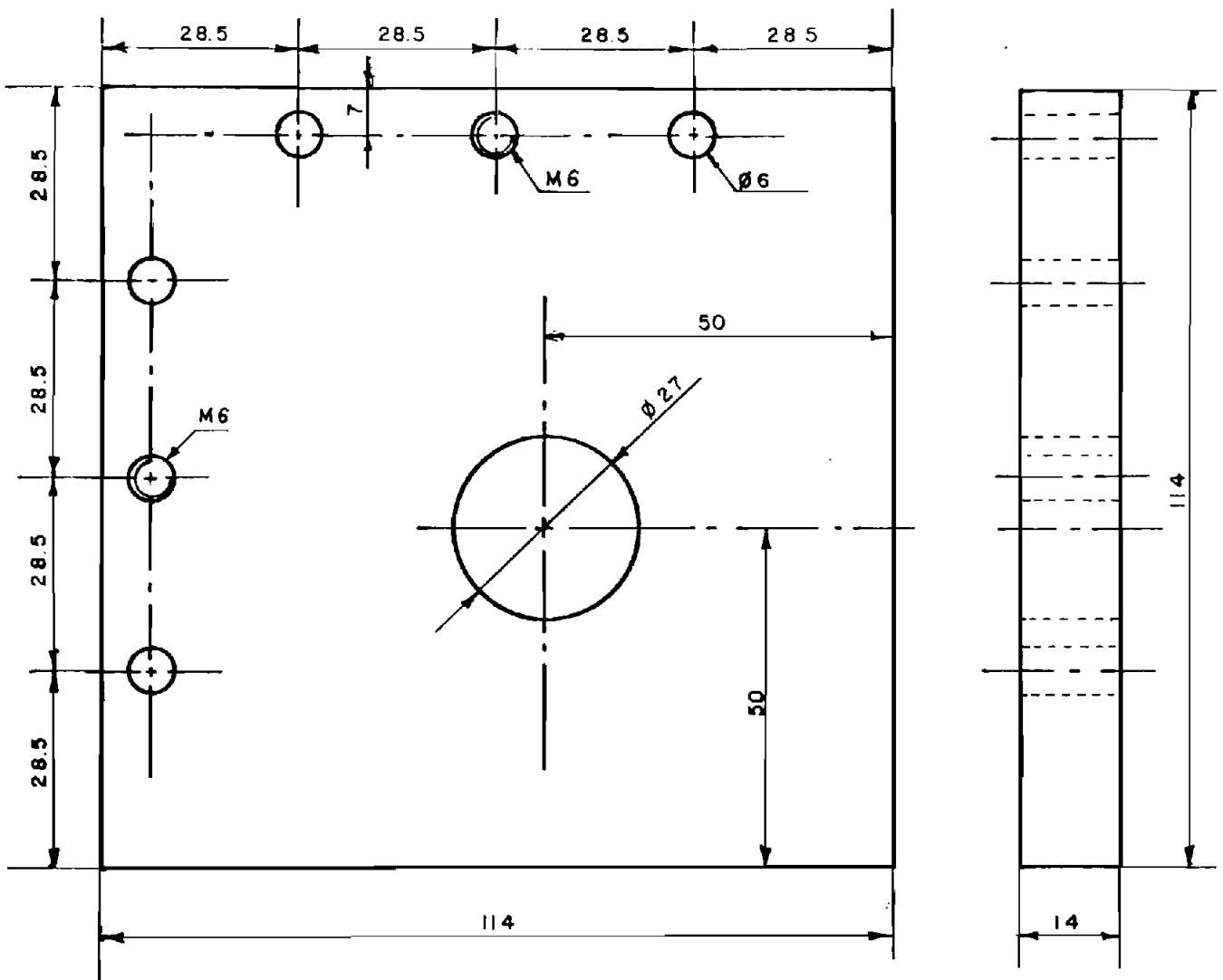
FECHA: 7 / 85

DIBUJO: Pedro Toinga V.

M A T R I Z

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA — POTENCIA



MATERIAL: Acero 760

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.02

ESCALA

LAMINA Nº 16

FECHA: 7/85

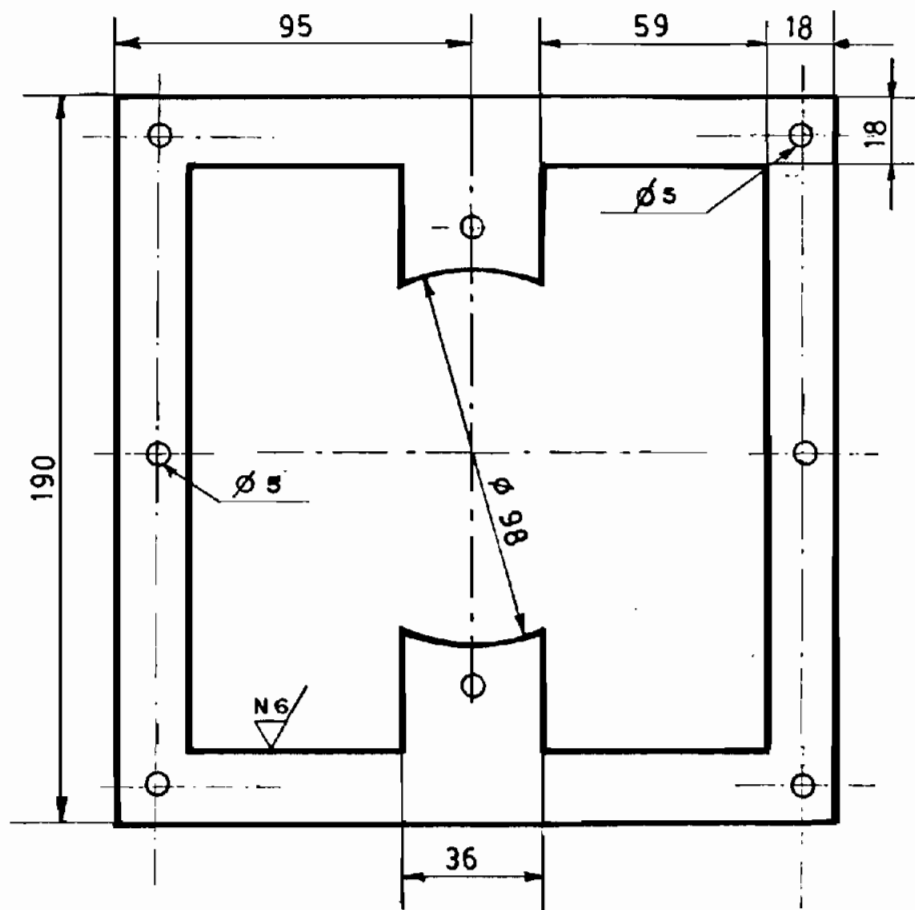
1:1

DIBUJO: Pedro Toinga V.

SUFRIDERA

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA — POTENCIA



**MATERIAL:** Lámina de grano orientado M-5

**ESPEJOR:** 0.305 mm

**PESO :** 0.0334 Kg

**GRUPO :** 118 Láminas

**PESO POR GRUPO:** 3.95 Kg

**NUMERO DE GRUPOS:** 4

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL 0.02

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 1G

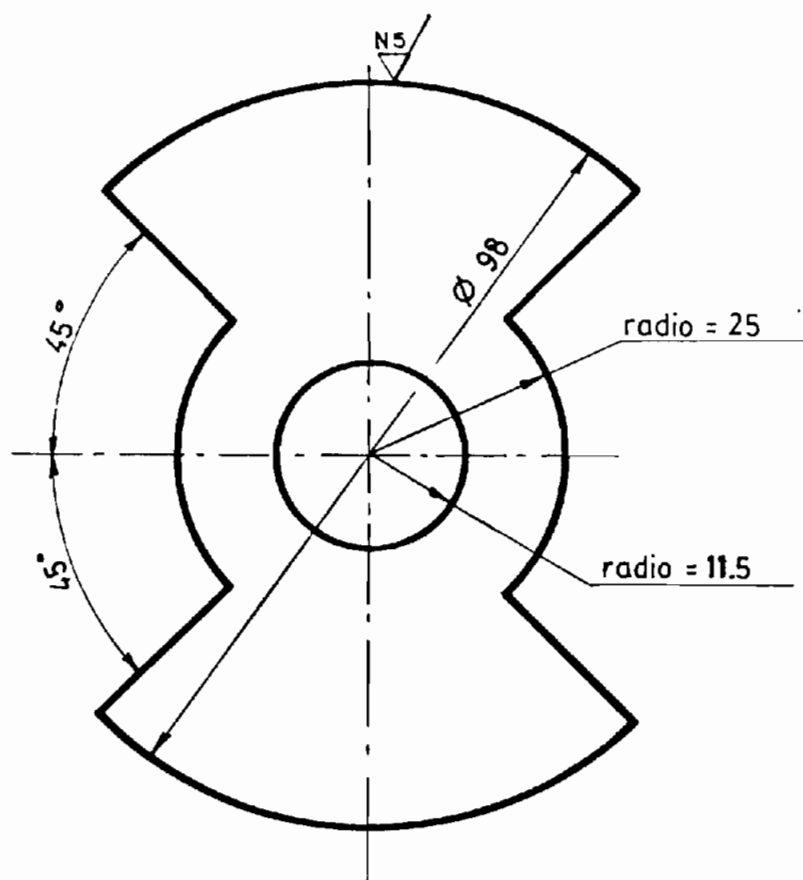
FECHA: 7/85

DIB. PEDRO TOINGA

GRUPO ESTATOR

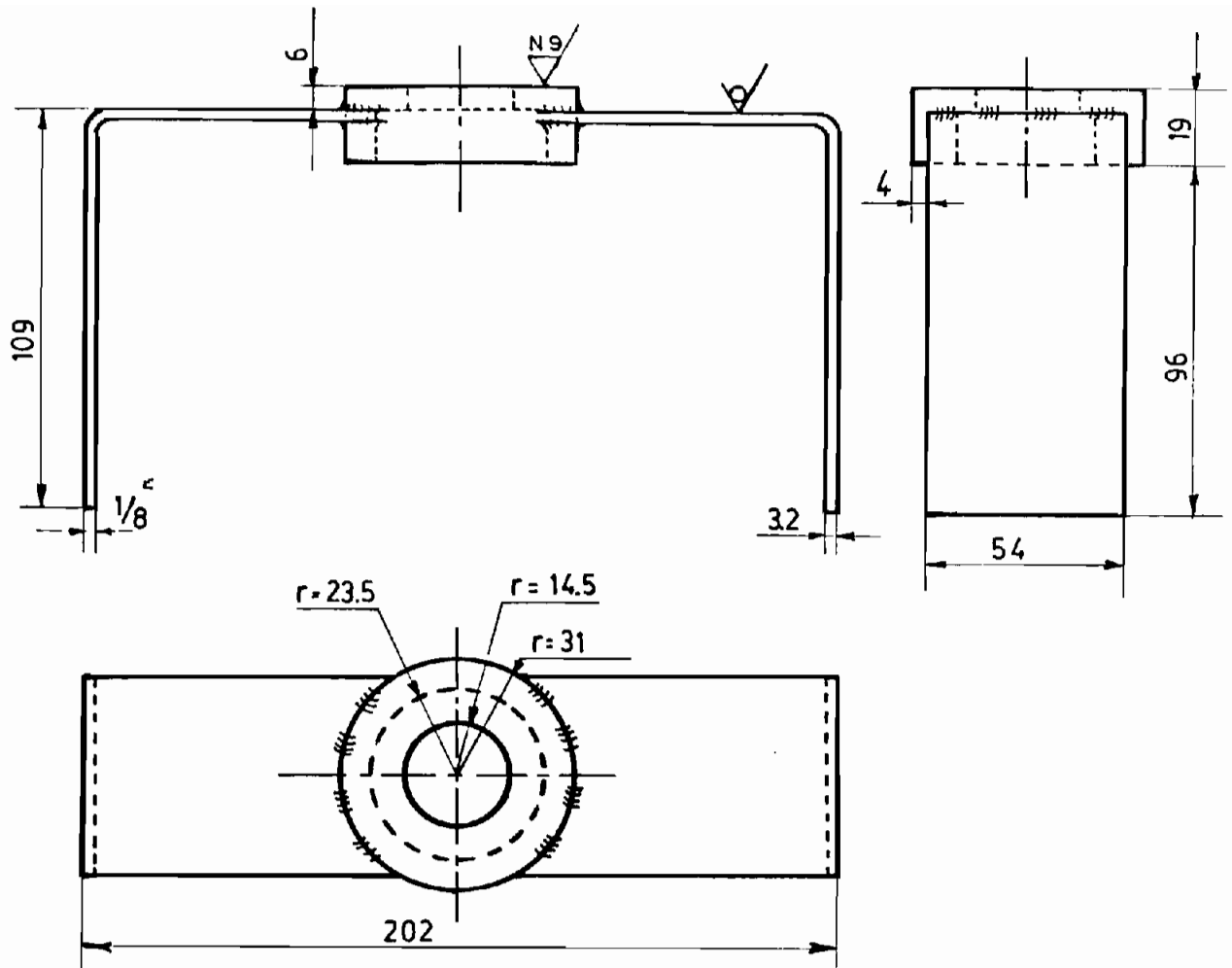
E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA



**MATERIAL:** Lámina de grano orientado M-5  
**ESPEJOR:** 0.305mm  
**PESO :** 0.010 Kg  
**GRUPO:** : 118 Láminas  
**PESO POR GRUPO:** 1.18 Kg  
**NUMERO DE GRUPOS:** 4

		<b>TESIS DE GRADO</b>	
<b>GENERADOR DE RELUCTANCIA</b>	<b>TOL.0.02</b>	<b>ESCALA</b> 1:1	<b>LAMINA Nº 2G</b>
			<b>FECHA: 7/85</b>
			<b>DIBUJO: Pedro Tolnga V.</b>
<b>GRUPO - ROTOR</b>		<b>E.P.N.</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA - POTENCIA</b>



UNIDADES: 2

MATERIAL: Acero ST-37

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA TOL.0.06

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 3G

FECHA: 7 / 85

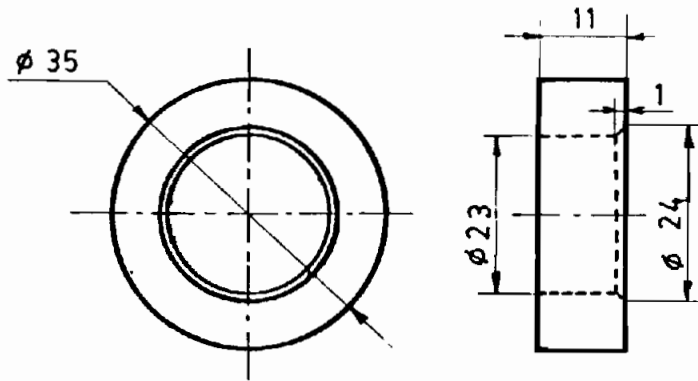
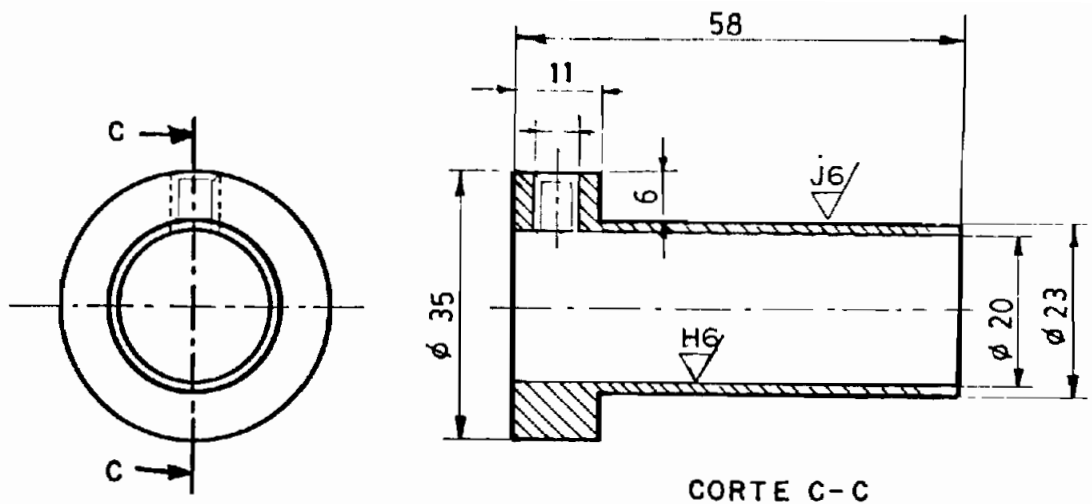
DIBUJO: Pedro Tolnga V.

APOYO TIPO

E. P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA





UNIDADES: 4  
 MATERIAL: Aero ST-37

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.05

ESCALA  
 1:1

LAMINA N° 4G

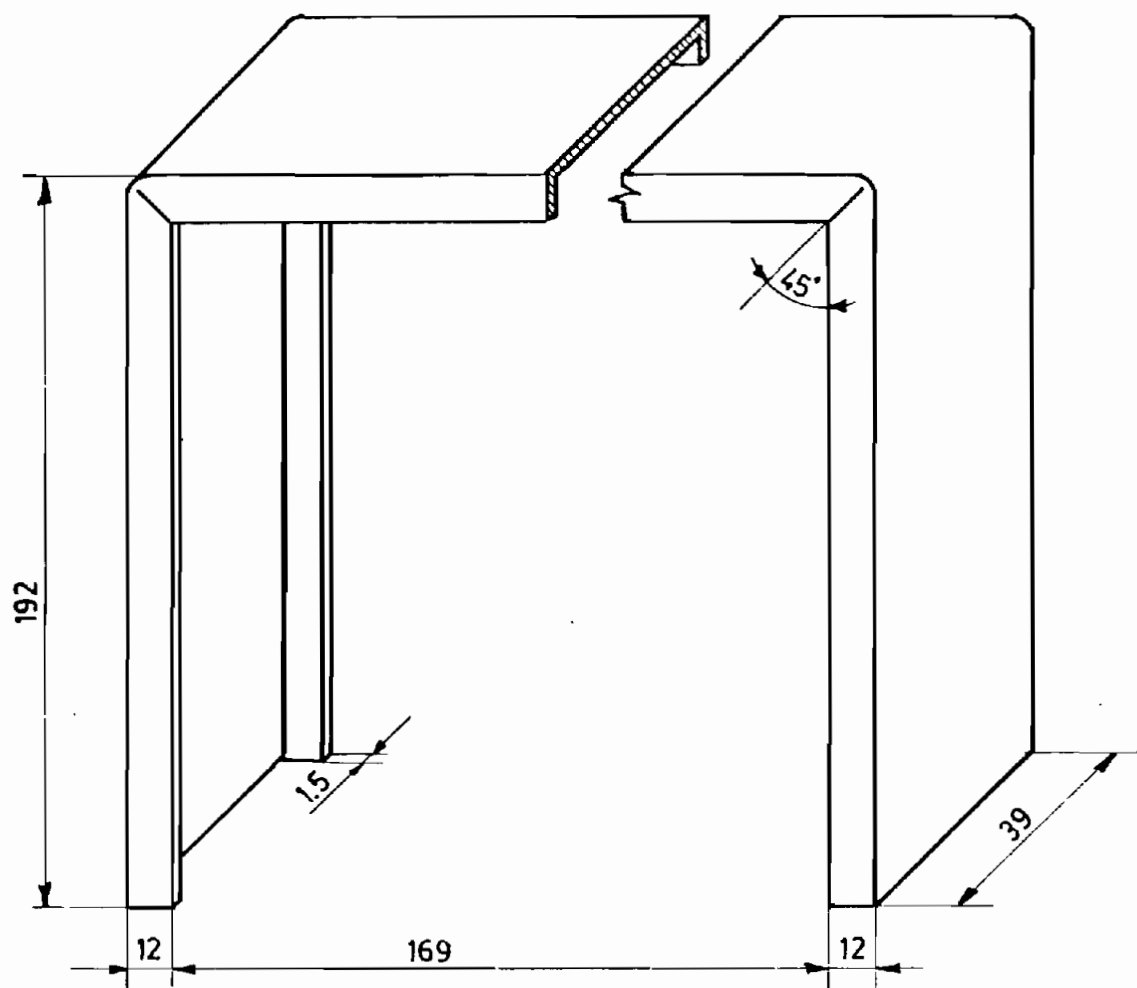
FECHA: 7/85

DIBUJO: Pedro Tolngá V.

BOCIN - TIPO

E. P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
 ELECTRICA - POTENCIA



UNIDADES: 4

MATERIAL: Acero ST-37

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL. 0.05

ESCALA  
1:2

LAMINA Nº 5G

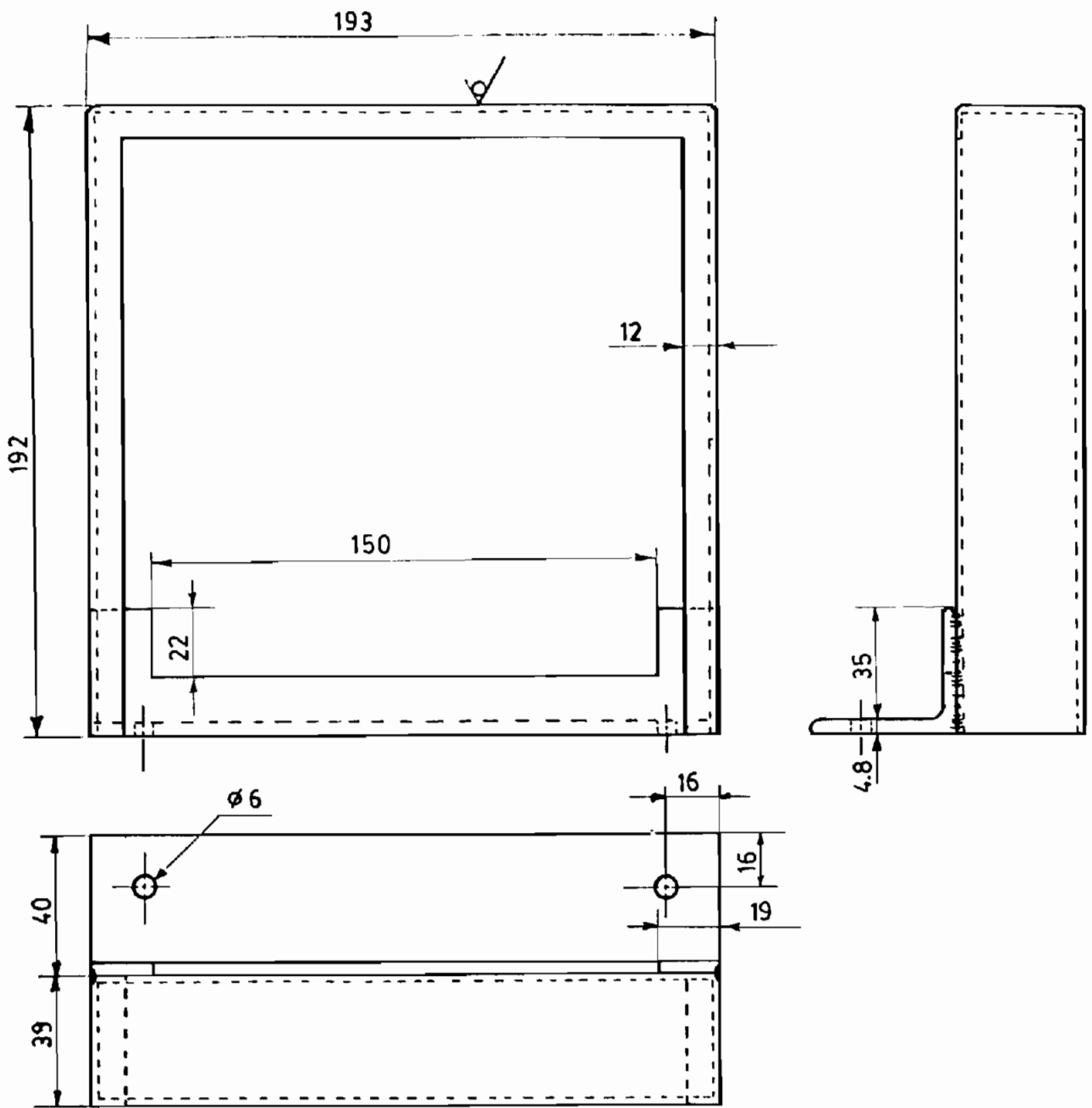
FECHA: 7/85

DIBUJO: Pedro Toinga V.

SUJETADOR TIPO

E.P.N.

FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



UNIDADES: 2

MATERIAL: Acero ST-37

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA

TOL.0.05

ESCALA

LAMINA Nº 6G

FECHA: 7/85

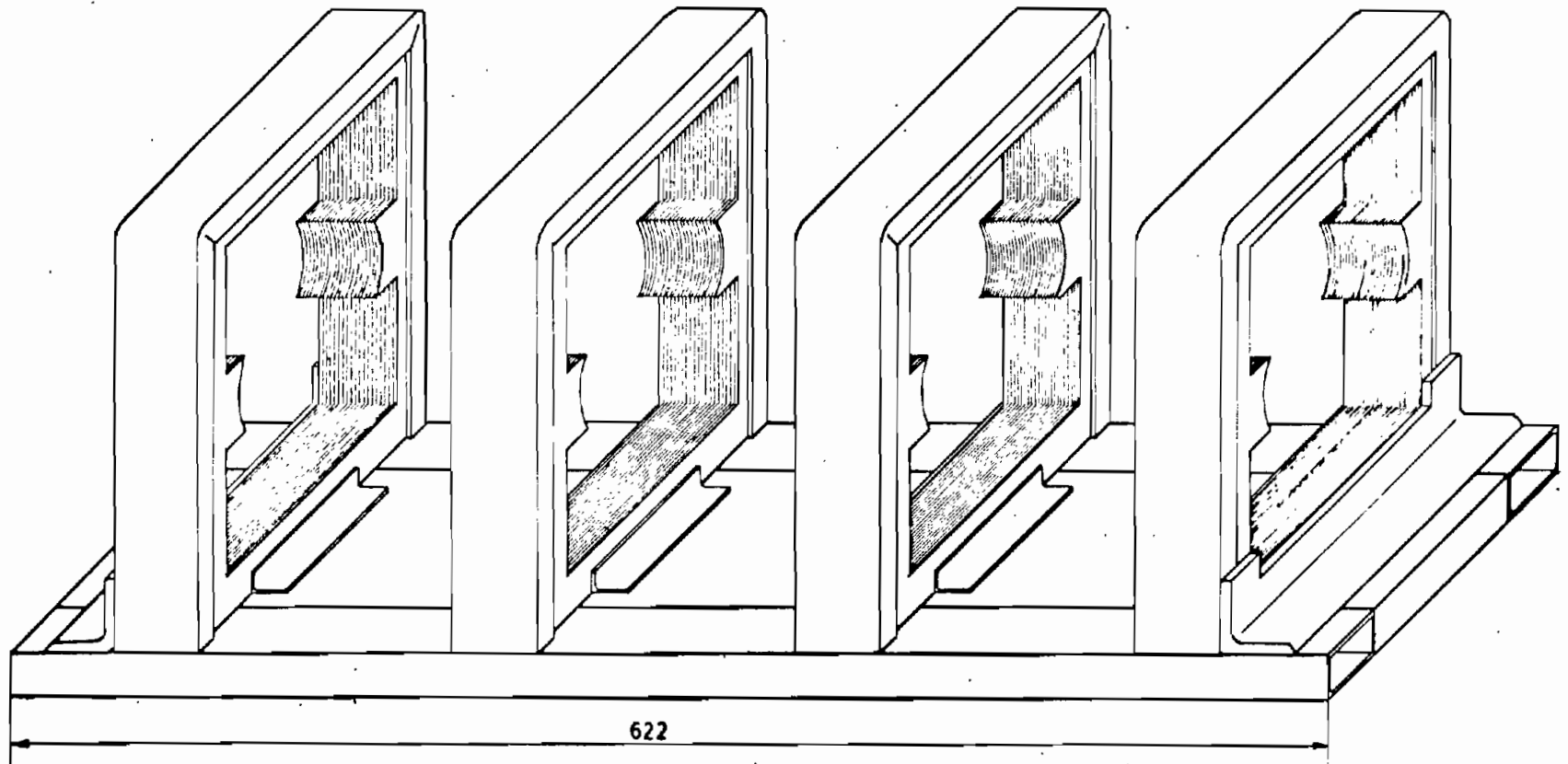
1:2

DIBUJO: Pedro Tolinga V.

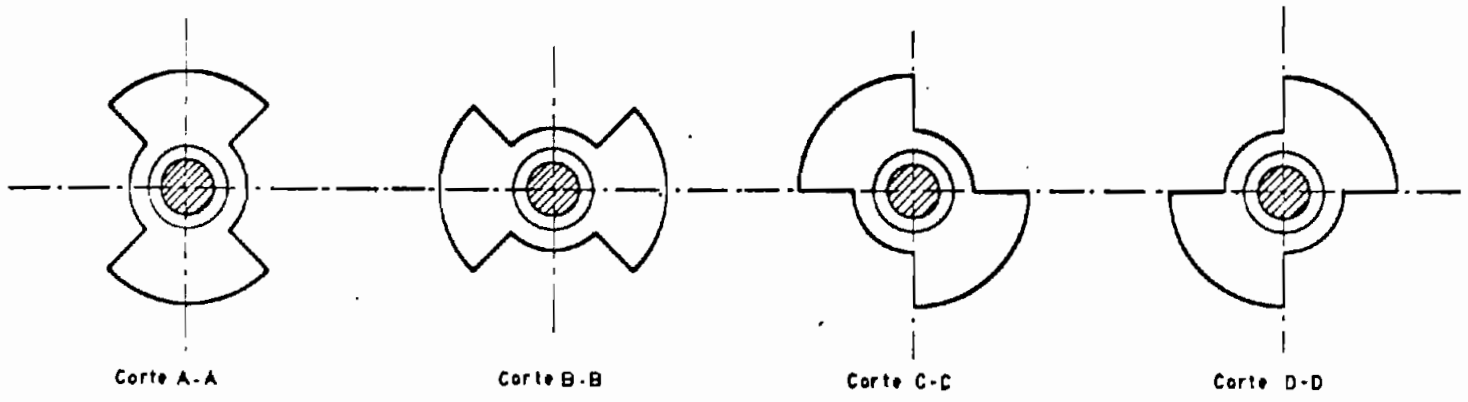
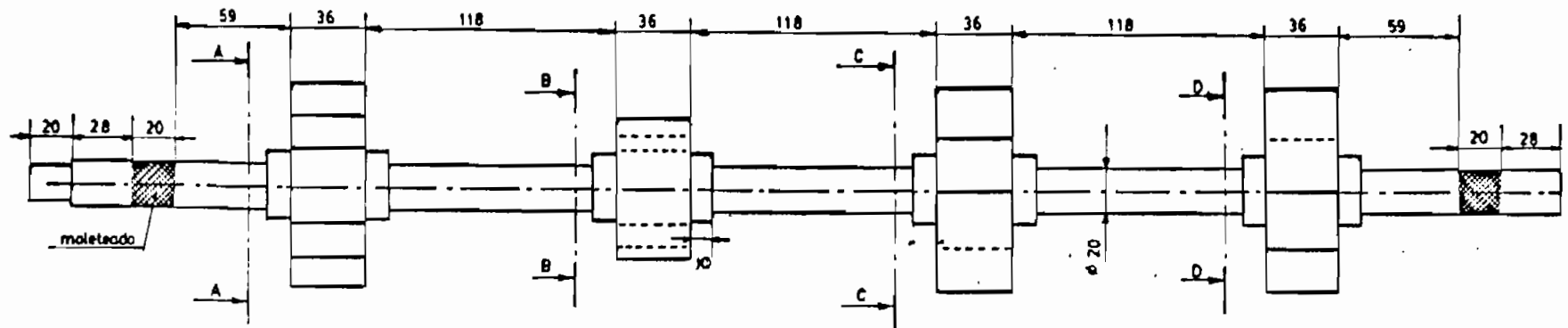
S O P O R T E T I P O

E.P.N.

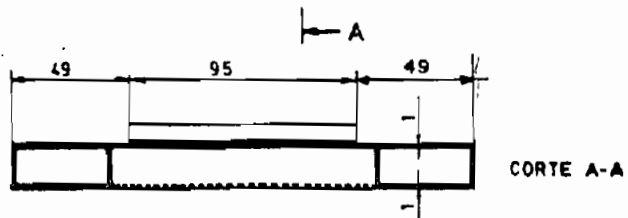
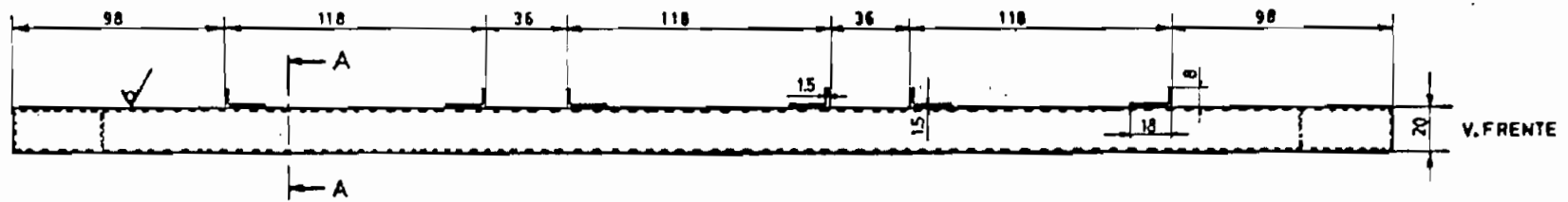
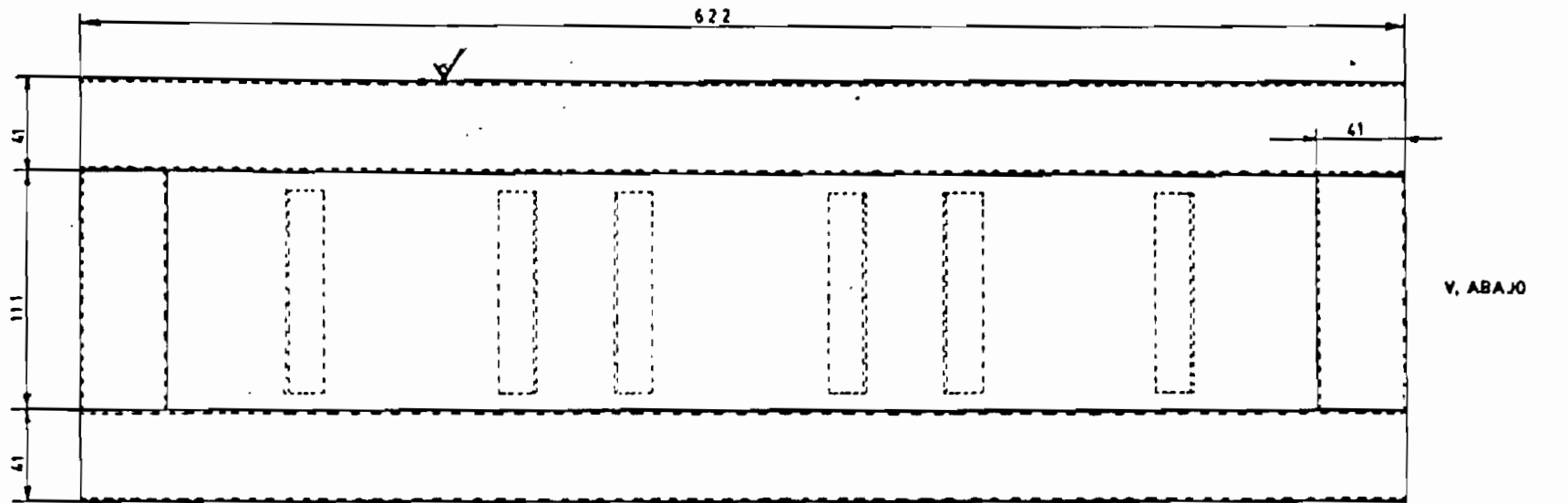
FACULTAD DE INGENIERIA  
ELECTRICA - POTENCIA



		TESIS DE GRADO	
GENERADOR DE RELUCTANCIA	TOL.	ESCALA 1:2	LAMINA Nº 70    FECHA: 7/85
GRUPO — ESTATOR		E.P.N.	DIBUJO: Pedro Tolaga V. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA — POTENCIA



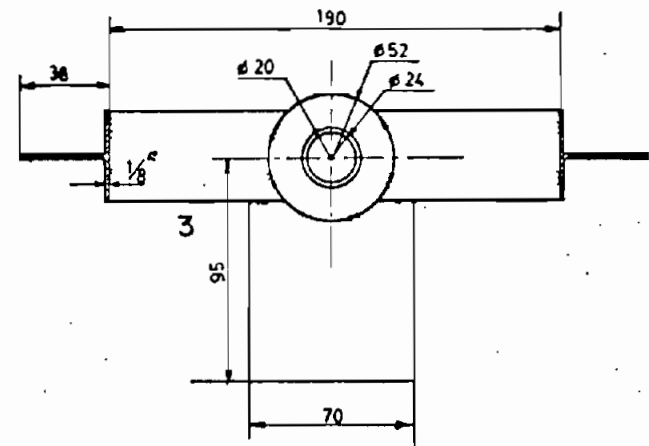
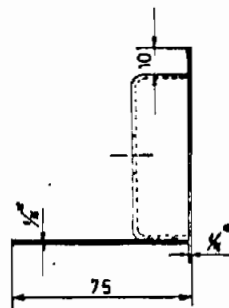
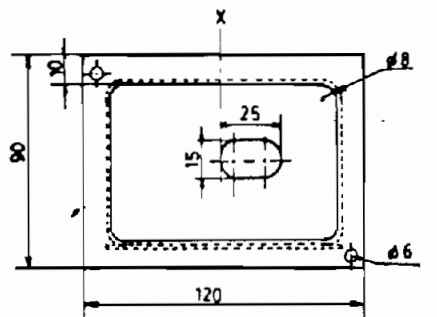
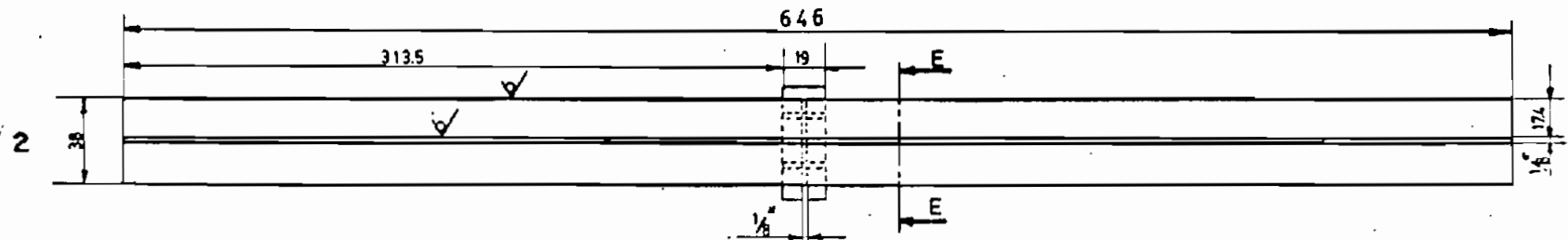
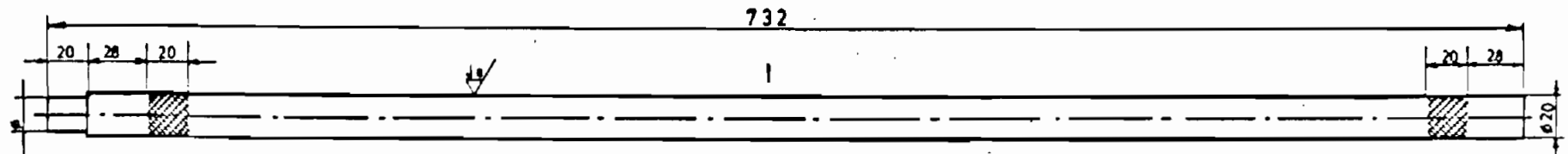
		<b>TESIS DE GRADO</b>	
<b>GENERADOR DE RELUCTANCIA</b>	TOL. 0.05	ESCALA	LAMINA Nº 88
		1:2	FECHA: 7 / 85
<b>GRUPO — ROTOR</b>		E.P.N.	DIBUJO: Pedro Toinga V.
		FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA - POTENCIA	



MATERIAL: Acero ST-37

TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA	TOL. 0.10	ESCALA	LAMINA N° 80	FECHA: 7/85
		1 : 2	DIBUJO: Pedro Tolgo V.	
BASE		E.P.N.	FAULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA — POTENCIA	



MATERIAL:

1.- Acero CEA  
2,3y4 Acero ST-37

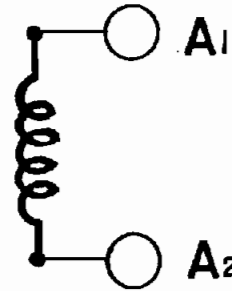
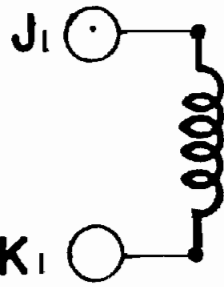
TESIS DE GRADO

GENERADOR DE RELUCTANCIA	TOL. 0.05	ESCALA: 1:2	LAMINA N° 108	FECHA: 7/85
1.- EJE 2.- SUJETADOR LATERAL TIPO (2 U) 3.- APOYO CENTRAL 4.- GUIA PORTABORNERA		E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA — POTENCIA	
			DIBUJO: Pedro Tolme V.	

GENERADOR DE RELUCTANCIA

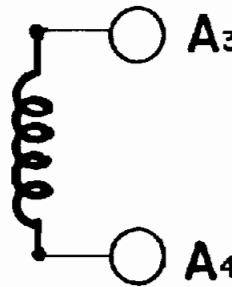
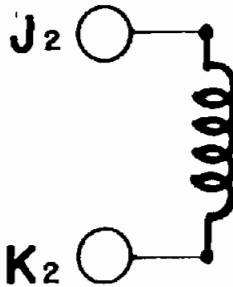
**ME - m03**

ESTATOR  
**1**

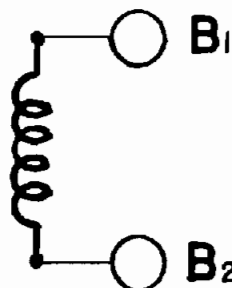
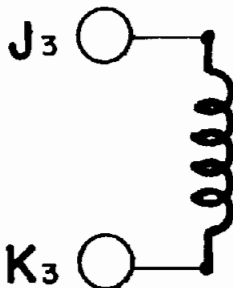


FASE  
**A**

ESTATOR  
**2**

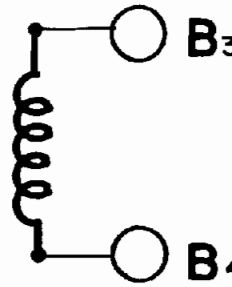
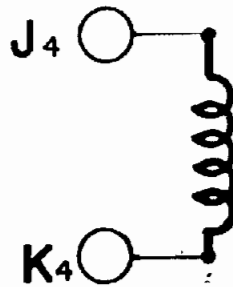


ESTATOR  
**3**



FASE  
**B**

ESTATOR  
**4**



CAMPO

ARMADURA

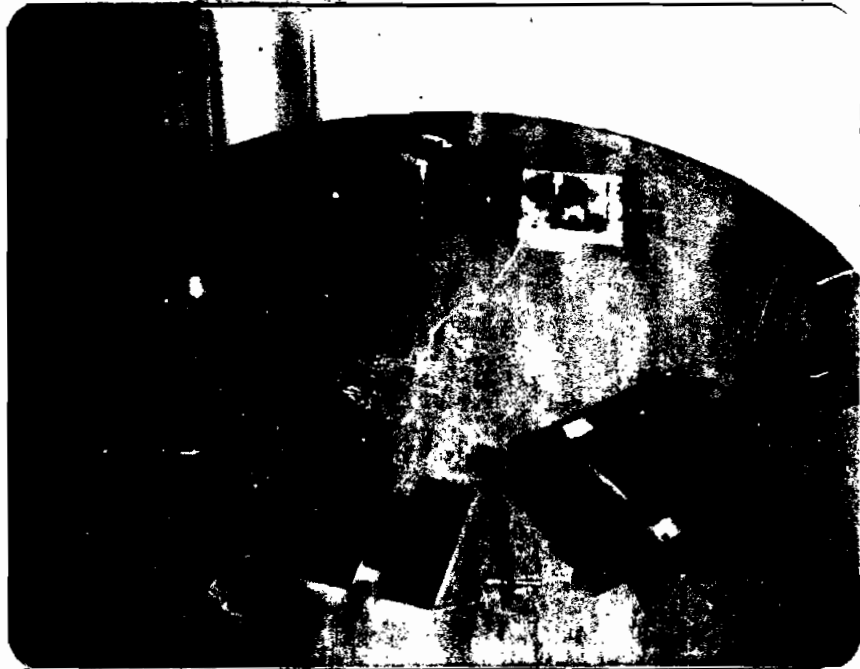
**E. P. N.**  
Quito - Ecuador  
**GENERADOR**

W	VI
Ia	IV
S	COS φ

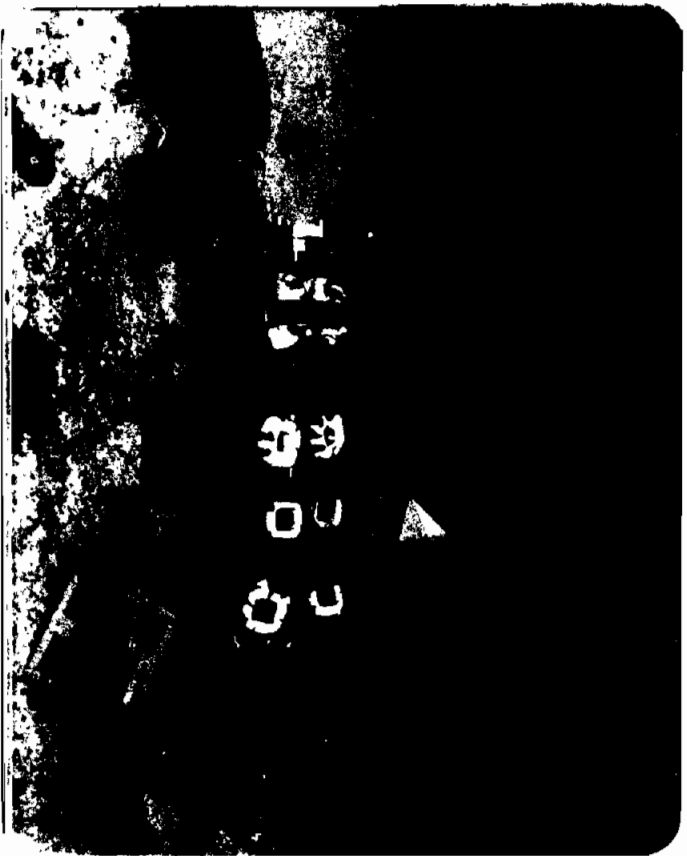
TESIS DE GRADO  
Pedro F Toinga V.



3.7.4 Fotografías



Matrices Mecánicas

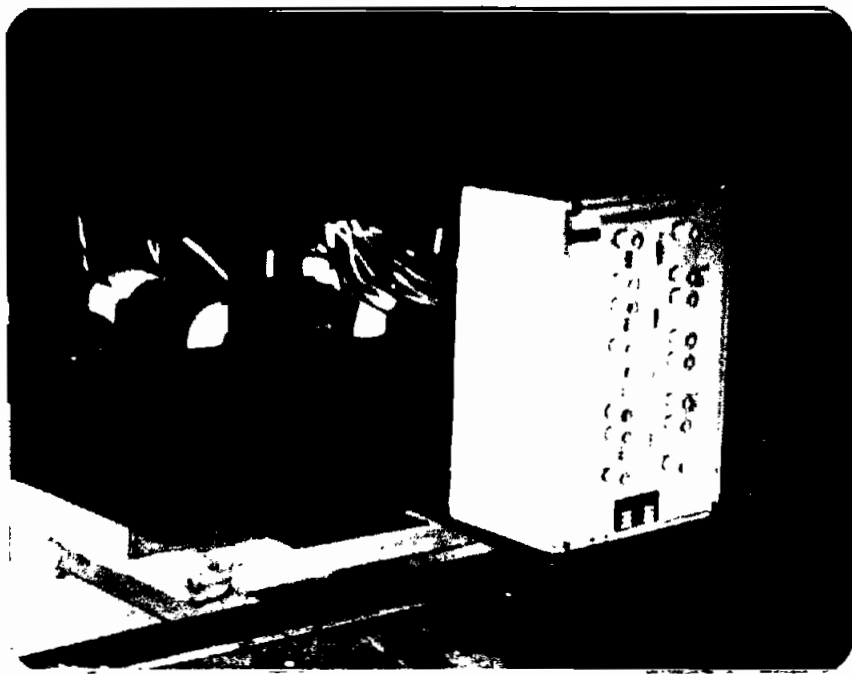


(a)



(b)





(c)

El generador de reluctancia

(a), (b), (c)

Etapas finales de la construcción

(a) generador despiezado

(b) generador armado

(c) generador montado en la máquina impulsora.



## CAPITULO IV: PRUEBAS DE LABORATORIO

### 4.1 GENERALIDADES.

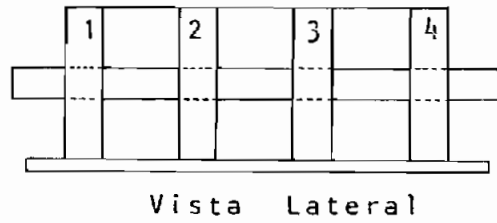
Las pruebas en el laboratorio se realizan con 6 bobinados diferentes (en número de espiras) para el caso monofásico, y para un mismo número de espiras en cada estator para el caso bifásico.

En el capítulo 3 se realiza un cálculo tentativo del número de espiras de los bobinados, pero en la práctica no es posible colocarlas debido a que el espacio físico no lo permite; por consiguiente, se han armado distintos bobinados con diferente número de espiras cada uno, para luego realizar las pruebas en el laboratorio y así sacar las conclusiones que serán características de este tipo de generador.

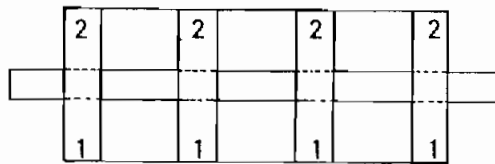
Se realizan pruebas de vacío, cortocircuito, velocidad y de carga (R,L,C), y luego se dan los parámetros nominales reales y además la regulación.

4.1.1 Diagrama del generador.

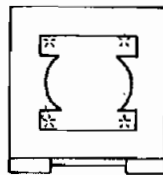
Las partes constitutivas del generador están asignadas de la manera que se indica en la Fig. 4.1 (numeración señalada en el prototipo).



Vista Lateral

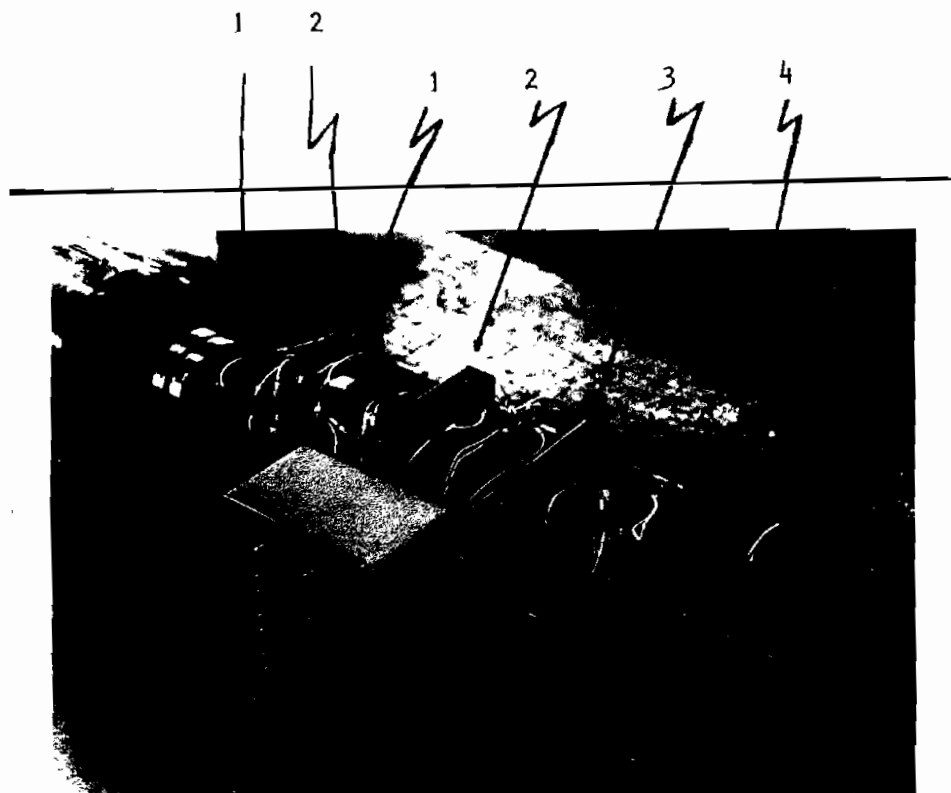


Vista Superior



Vista Frontal

(a)



(b)





(c) Pruebas en el laboratorio

Fig. 4.1 Diagrama del generador de reluctancia.

(a) especificación del generador

(b) indicaciones en el generador

(c) pruebas en el laboratorio

\* Ubicación de los bobinados de campo y de armadura.

1,2,3,4, grupos estator - rotor (vista lateral)

1,2 bobinados del mismo grupo estator - rotor (vista superior).



#### 4.1.2 Instrumentos y elementos utilizados

Para las pruebas se ha dispuesto del laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, y por ende de la precisión que éste dispone en sus instrumentos y elementos.

Se utilizó:

Multímetro digital 8060A Fluke

Osciloscopio (orc) TEKTRONIX

Voltímetro de corriente continua tipo 0.5

Amperímetro de corriente continua tipo 0.5

Medidor de velocidad

Panel de fuente de voltaje continuo variable

Panel de frecuencia variable

Como máquina impulsora un motor de inducción

Un reóstato de 5.9 A de capacidad

Cargas - Resistivas  
- Inductivas  
- Capacitivas.

#### 4.1.3 Pruebas preliminares

Primeramente se realizaron pruebas de generación con distintas bobinas, para así tener una referencia de los posibles voltajes de generación, y estas fueron las que determinaron a cuales se debían tomar en cuenta para el análisis que se detalla más adelante.

Los bobinados fueron armados en la máquina rebobinadora del taller de la Facultad de Ingeniería eléctrica de las siguientes maneras:

- a) El un bobinado interno, es decir, que está mas cerca al núcleo, y el otro sobre este bobinado.

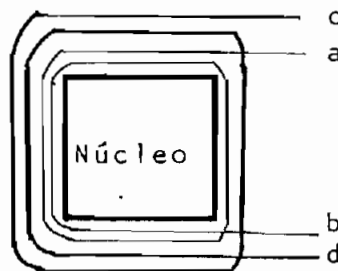


Fig. 4.2 Vista frontal de la saliente del estator con la disposición física de las bobinas.

- a y b terminales de la bobina interna
- c y d terminales de la bobina externa.

- b) El un bobinado a continuación del otro, es decir que ambos bobinados se encuentran junto al núcleo.

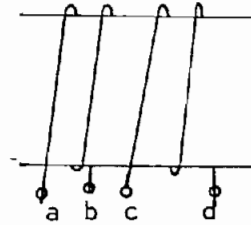


Fig. 4.3 Vista lateral de la saliente del estator con la disposición de las bobinas.

- c) Con respecto al tipo de conexión que puede realizarse entre la bobina que se encuentra en el un polo con la otra del otro polo, se tienen dos posibilidades, que se conecten en paralelo o que se conecten en serie; se siguió la información del paper, en el cual están conectadas en serie.

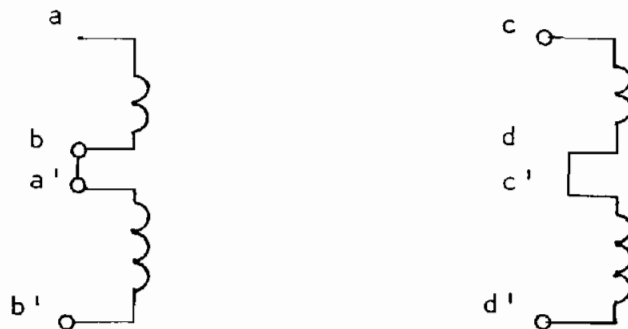


Fig. 4.4 Conexión en serie de las bobinas

#### 4.2 PRUEBAS COMO GENERADOR MONOFÁSICO Y COMO GENERADOR BIFÁSICO.

Luego de haber realizado varias pruebas preliminares se armaron bobinas con distinto número de espiras para realizar las pruebas correspondientes, esto para el caso monofásico. Después de realizadas las pruebas como generador monofásico se realizó un análisis comparativo de los voltajes generados y formas de onda para asignar un número de espiras tentativo para el caso bifásico, los mismos que constarán del mismo número de espiras para cada grupo estator-rotor.

#### 4.3 PRUEBAS MONOFÁSICAS.

Para realizar estas pruebas se armaron seis pares de bobinas, las mismas que están especificadas en el cuadro 4.1

##### 4.3.1 Medida de la resistencia de los bobinados

Se utilizandos métodos:

- a) Método voltímetro-amperímetro
- b) Método con el ohmetro digital

Los valores se tabulan en el cuadro 4.2

CUADRO 4.1

BOBINADO	$N_p$	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$I_N$	BOBINAS
Armadura	100	200	22	0.91	9 y 10
Campo	80	160	15	4.62	
Armadura	100	200	22	0.91	11 y 12
Campo	80	160	15	4.62	
Armadura	350	700	22	0.91	13 y 14
Campo	80	160	15	4.62	
Armadura	700	1400	22	0.91	15 y 16
Campo	80	160	15	4.62	
Armadura	1500	3000	22	0.91	17 y 18
Campo	160	320	15	4.62	
Armadura	350	700	22	0.91	19 y 20
Campo	400	800	22	4.62	

$I_N$ : Ver apéndice 2

CONTIENE: Tipos de Bobinados y sus características.

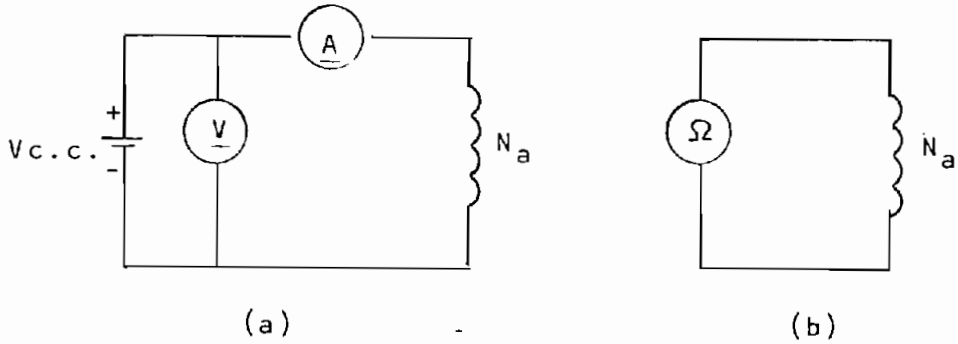


Fig. 4.6 Circuitos para la medida de la resistencia a) Método voltímetro-amperímetro b) Ohmetro digital.

#### 4.3.1.1 Voltaje máximo permisible en cada bobinado.

En el cuadro 4.2 se tiene los diferentes valores de resistencia de los bobinados de prueba, en los cuales se puede observar que difieren debido al método utilizado. Para el cálculo del voltaje máximo permisible se utilizará la resistencia medida por el método voltímetro-amperímetro ya que experimentalmente es el que proporciona valores que son más próximos a la realidad. Los valores se presentan en el cuadro 4.3



CUADRO 4.3

BOBINADO	CONDUCTOR AWG #	BOBINA	V <sub>pe</sub>
Armadura	22	9 y 10	2.09
Campo	15		2.44
Armadura	22	11 y 12	1.80
campo	15		2.17
Armadura	22	13 y 14	6.93
Campo	15		2.59
Armadura	22	15 y 16	15.28
campo	15		2.81
Armadura	22	17 y 18	41.36
Campo	15		6.93
Armadura	22	19 y 20	9.32
Campo	22		6.38

NOTA:  $V_{pe} = I_N * R_{VA}$

V<sub>pe</sub> - Voltaje máximo permisible de las bobinas.

#### 4.3.1.2 Selección del voltaje de campo

Para la elección de este voltaje se toman en cuenta los siguientes factores:

- a) El reóstato disponible del laboratorio.
- b) El voltaje de campo será utilizado en todas las bobinas construidas, el mismo que debe proporcionar un rango de corriente de campo similar para todas las bobinas de prueba.
- c) No sobrepasará el voltaje máximo permisible indicado en el cuadro 4.3
- d) El voltaje utilizado será múltiplo de doce, logrando así tener flexibilidad de usarse una batería o un banco de baterías.

Tomando como base los puntos anteriormente nombrados y con las debidas pruebas preliminares de laboratorio se concluye que el voltaje de 48 voltios es el indicado para voltaje de excitación en la máquina.

#### 4.3.2 Prueba de generación de voltaje.

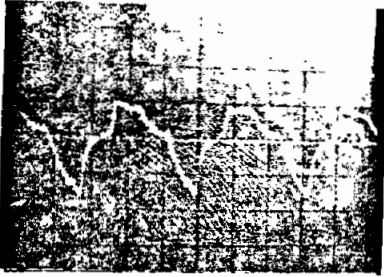
La presente prueba demuestra el efecto que surgirá si la armadura se encuentra alejada o cercana al núcleo; es decir, aquí se toma como armadura los bobinados exteriores y como campo los bobinados interiores (Fig. 4.7).

En esta prueba no se presentan cuadros de valores porque mientras más número de espiras contenga el bobinado de campo la armadura se aleja más del núcleo, el mismo que ocasiona una mala concatenación de flujo y por ende un voltaje cada vez menor por lo que el flujo sigue el camino de menor reluctancia.

Esta prueba nos afirma que la bobina de armadura debe estar ubicada lo más cerca al núcleo (camino de menor reluctancia) para que tenga una buena concatenación de flujo.

Para el caso de:

el bobinado interior utilizado como armadura y el bobinado exterior como campo se detallan en los numerales posteriores.



a) Bobinas 9 y 10

$$V_a = 3.50 \text{ V}$$

$$V_f = 24 \text{ V} \quad I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_a} = 160 \text{ e} \quad N_{T_c} = 200 \text{ e}$$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 5\text{V/div}$



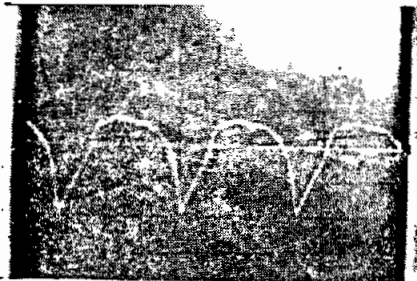
b) Bobinas 11 y 12

$$V_a = 3.90 \text{ V}$$

$$V_f = 24 \text{ V} \quad I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_a} = 160 \text{ e} \quad N_{T_c} = 200 \text{ e}$$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 5\text{V/div}$



c) Bobinas 13 y 14

$$V_a = 3.70 \text{ V}$$

$$V_f = 24 \text{ V} \quad I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_a} = 160 \text{ e} \quad N_{T_c} = 700 \text{ e}$$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 5\text{V/div}$



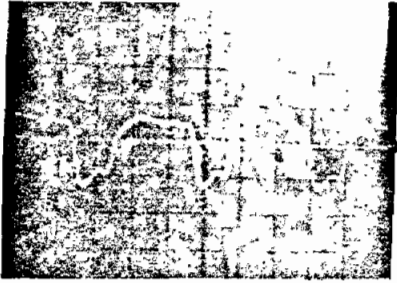
d) Bobinas 15 y 16

$$V_a = 2.25 \text{ V}$$

$$V_f = 24 \text{ V} \quad I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_a} = 160 \text{ e} \quad N_{T_c} = 1400 \text{ e}$$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 5\text{V/div}$



e) Bobinas 17 y 18

$$V_a = 3.30 \text{ V}$$

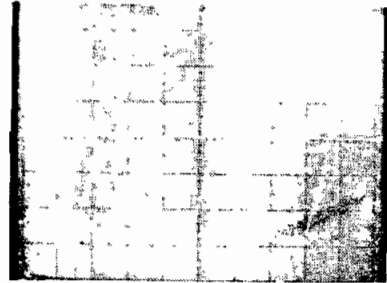
$$V_f = 24 \text{ V}$$

$$N_{T_a} = 320 \text{ e}$$

$$\text{Escalas: } H_o = 5\text{ms/div; } V_e = 5\text{V/div}$$

$$I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_c} = 3000 \text{ e}$$



f) Bobinas 19 y 20

$$V_a = 14.9 \text{ V}$$

$$V_f = 24 \text{ V}$$

$$N_{T_a} = 800 \text{ c}$$

$$\text{Escalas: } H_o = 5\text{ms/div; } V_e = 10\text{V/div}$$

$$I_f = 0.91 \text{ A}$$

$$N_{T_c} = 700 \text{ e}$$

Fig. 4.7 Formas de onda de voltaje de armadura en vacío.

### 4.3.3 Pruebas de vacío

Para la prueba de vacío se utiliza el siguiente circuito:

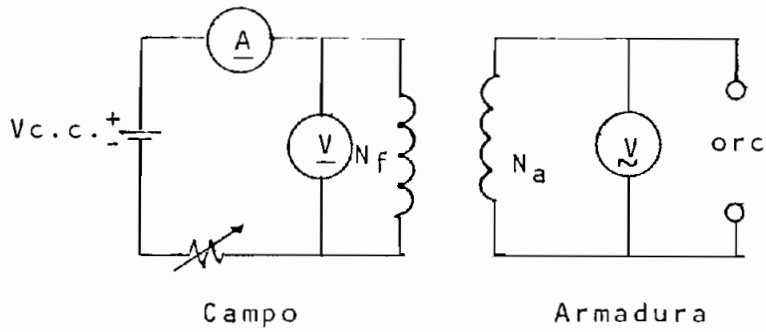


Fig. 4.8 Circuito para la prueba de vacío.

Se realiza a velocidad constante y voltaje de campo constante.

#### 4.3.3.1 Cuadros de valores

CUADRO 4.4

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	V <sub>c.c.</sub> (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$I_f$ (A)	$V_{arms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)
0.00	0.44			
1.95	7.90	2.20/3.20	5.00	27.00
2.50	10.00	1.30/2.20	10.00	35.00
3.00	11.60	1.40/2.60	10.00	40.00
3.50	13.00	1.65/3.00	10.00	46.50
4.00	14.30	1.80/3.40	10.00	52.00
4.60	15.90	0.90/1.90	20.00	56.00
5.00	16.90	1.05/2.05	20.00	62.00
5.50	18.00	1.15/2.20	20.00	67.00
6.00	19.10	1.20/2.40	20.00	72.00
6.50	19.90	1.25/2.50	20.00	75.00
7.00	20.70	1.30/2.60	20.00	78.00

Ver Fig. 4.9

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.

CUADRO 4.5

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 11 y 12

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)
0.00	0.26			
2.00	7.90	1.00/1.60	10.00	26.00
2.50	9.50	1.20/2.20	10.00	36.00
3.00	11.08	1.40/2.35	10.00	37.50
3.50	12.70	1.60/2.90	10.00	45.00
4.00	14.10	1.70/3.20	10.00	49.00
4.60	15.70	1.90/3.80	10.00	57.00
5.00	16.60	1.00/2.00	20.00	60.00
5.50	17.80	1.10/2.15	20.00	65.00
6.00	19.20	1.15/2.30	20.00	69.00
6.50	20.20	1.20/2.45	20.00	73.00
7.00	21.30	1.25/2.60	20.00	77.00

Ver Fig. 4.10

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de vacío.



CUADRO 4.6

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	700	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 13 y 14

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pr}$ (V)
0.00	0.41			
1.90	24.00	1.60/2.40	20.00	80.00
2.50	30.80	2.00/3.25	20.00	105.00
3.00	35.00	0.90/1.60	50.00	125.00
3.50	40.40	1.00/1.80	50.00	140.00
4.00	45.10	1.10/2.10	50.00	160.00
4.60	50.50	1.20/2.40	50.00	180.00
5.00	53.70	1.30/2.60	50.00	195.00
5.50	57.00	1.40/2.80	50.00	210.00
6.00	60.00	1.50/3.05	50.00	227.50
6.50	64.30	1.60/3.20	50.00	240.00
7.00	67.00	1.65/3.40	50.00	252.50

Ver. Fig. 4.11

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.

CUADRO 4.7

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)
0.00	0.59			
1.95	50.10	1.30/2.20	50.00	175.00
2.50	64.50	1.60/2.90	50.00	225.00
3.00	75.20	1.80/3.40	50.00	260.00
3.50	85.00	2.00/4.00	50.00	300.00
4.00	93.70	1.15/2.20	100.00	335.00
4.60	104.50	1.25/2.50	100.00	375.00
5.00	111.80	1.35/2.70	100.00	405.00
5.50	118.80	1.45/2.90	100.00	435.00
6.00	126.30	1.50/3.10	100.00	460.00
6.50	133.00	1.65/3.20	100.00	485.00
7.00	140.10	1.70/3.40	100.00	510.00

Ver. Fig. 4.12

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.

CUADRO 4.8

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	V <sub>c.c.</sub> (V)
Armadura	3000	22	
Campo	320	15	48

Bobinas 17 y 18

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)
0.00	1.16			
1.95	176.40	1.00/2.40	200.00	680.00
2.50	201.90	1.15/2.80	200.00	790.00
3.00	219.50	1.20/3.00	200.00	840.00
3.50	235.00	1.30/3.20	200.00	900.00
4.00	247.50	1.40/2.40	200.00	960.00
4.60	264.20	1.50/3.65	200.00	1030.00
5.00	274.00	1.75/3.70	200.00	1090.00
5.50	286.00	0.75/1.55	500.00	1150.00
6.00	295.00	0.85/1.60	500.00	1225.00
6.50	305.00	0.95/1.65	500.00	1300.00
7.00	315.60	1.00/1.65	500.00	1325.00

Ver. Fig. 4.13

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.

CUADRO 4.9

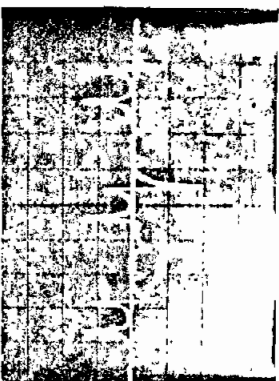
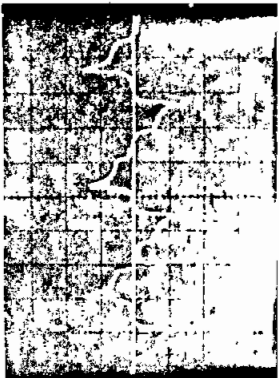
BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	800	22	12

Bobinas 19 y 20

$I_f$ (A)	$V_{a\text{rms}}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)
0.00	0.26			
0.32	7.90	0.80/1.90	10.00	27.00
0.40	8.40	0.80/1.95	10.00	27.50
0.50	8.60	0.80/2.00	10.00	28.00
0.60	8.80	0.85/2.15	10.00	30.00
0.70	9.00	0.85/2.20	10.00	30.50
0.80	9.20	0.85/2.30	10.00	31.50
0.91	9.40	0.85/2.40	10.00	32.50
1.00	9.60	0.96/2.50	10.00	34.60
1.10	9.80	1.00/2.60	10.00	36.00

Ver. Fig. 4.14

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.



a) Bobinas 13 y 14

b) Bobinas 15 y 16

$V_a = 0.29 \text{ V}$

$F = 61 \text{ Hz}$

$V_a = 0.77 \text{ V}$

$f = 61 \text{ Hz}$

$V_f = 0.00 \text{ V}$

$I_f = 0.00 \text{ A}$

$V_f = 0.00 \text{ V}$

$I_f = 0.00 \text{ A}$

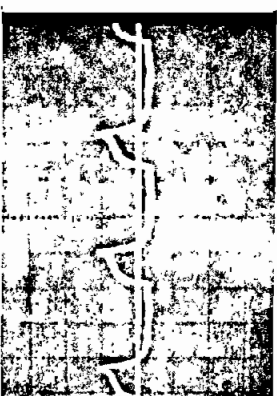
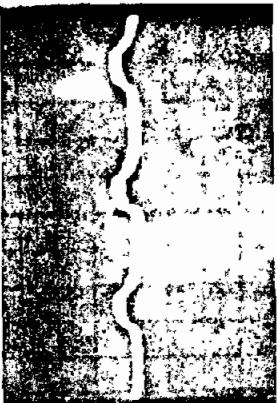
$N_{T_a} = 700 \text{ e}$

$N_{T_c} = 160 \text{ e}$

$N_{T_a} = 1400 \text{ e}$

$N_{T_c} = 160 \text{ e}$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 0.5 \text{ V/div}$ . Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 2 \text{ V/div}$



c) Bobinas 9 y 10

d) Bobinas 13 y 14

$V_a = 0.037 \text{ V}$

$F = 61.60 \text{ Hz}$

$V_a = 0.083 \text{ V}$

$f = 61.50 \text{ Hz}$

Bobina de campo cortocircuitada

Bobina de campo cortocircuitada

$N_{T_a} = 200 \text{ e}$

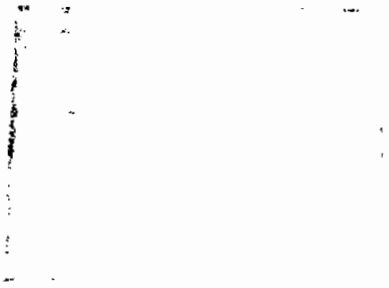
$N_{T_c} = 160 \text{ e}$

$N_{T_a} = 700 \text{ e}$

$N_{T_c} = 160 \text{ e}$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 0.2 \text{ V/div}$ .

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 0.20 \text{ V/div}$



e) Bobinas 9 y 10

$$V_a = 15.9 \text{ V}$$

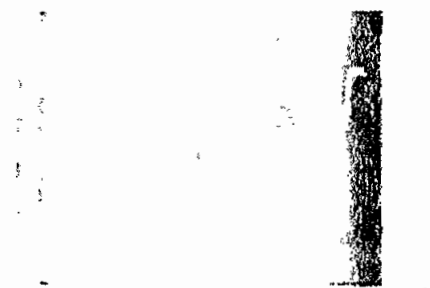
$$V_f = 48 \text{ V}$$

$$N_{Ta} = 200 \text{ e}$$

$$I_f = 4.62 \text{ A}$$

$$N_{Tc} = 160 \text{ e}$$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $20\text{V/div}$ .



f) Bobinas 9 y 10

$$V_a = 14.3 \text{ V}$$

$$V_f = 4.8 \text{ V}$$

$$N_{Ta} = 200 \text{ e}$$

$$I_f = 4.8 \text{ A}$$

$$N_{Tc} = 160 \text{ e}$$

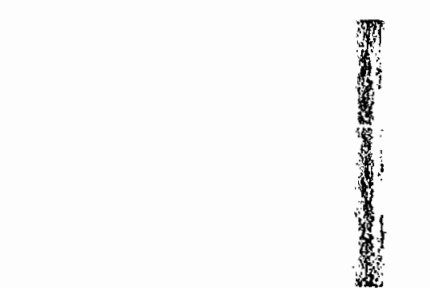
Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $20\text{V/div}$ .



g)  $N_{Ta} = 200 \text{ e}$

$$N_{Ta} = 700 \text{ e}$$

$$N_{Ta} = 1400 \text{ e}$$



h) Bobinas 17 y 18

$$V_a = 259 \text{ V}$$

$$V_f = 48 \text{ V}$$

$$N_{Ta} = 3000 \text{ e}$$

$$I_f = 4.8 \text{ A}$$

$$N_{Tc} = 160 \text{ e}$$

Escalas  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 20\text{V/div}$ .

Fig. 416 Formas de onda de voltaje de armadura en vacío

$$V_{\text{RMS}} = f(I_f(\%))$$

$V_{\text{RMS}}$   
(V)

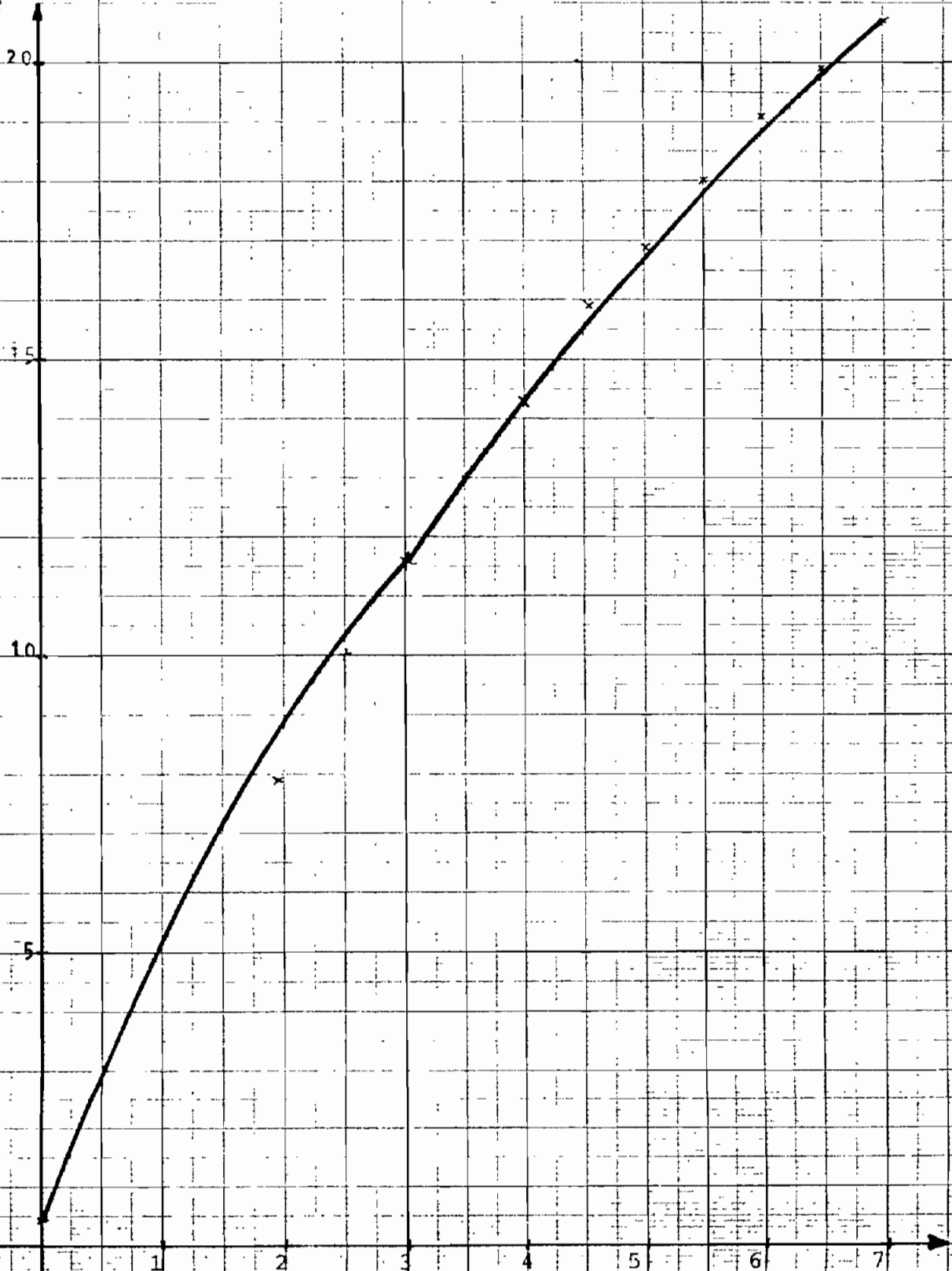


Fig. 4.9. Característica de vacío.

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 160$ , Bobinas 9 y 10)

$$V_{\text{GRMS}} = f(I_f(\text{A}))$$

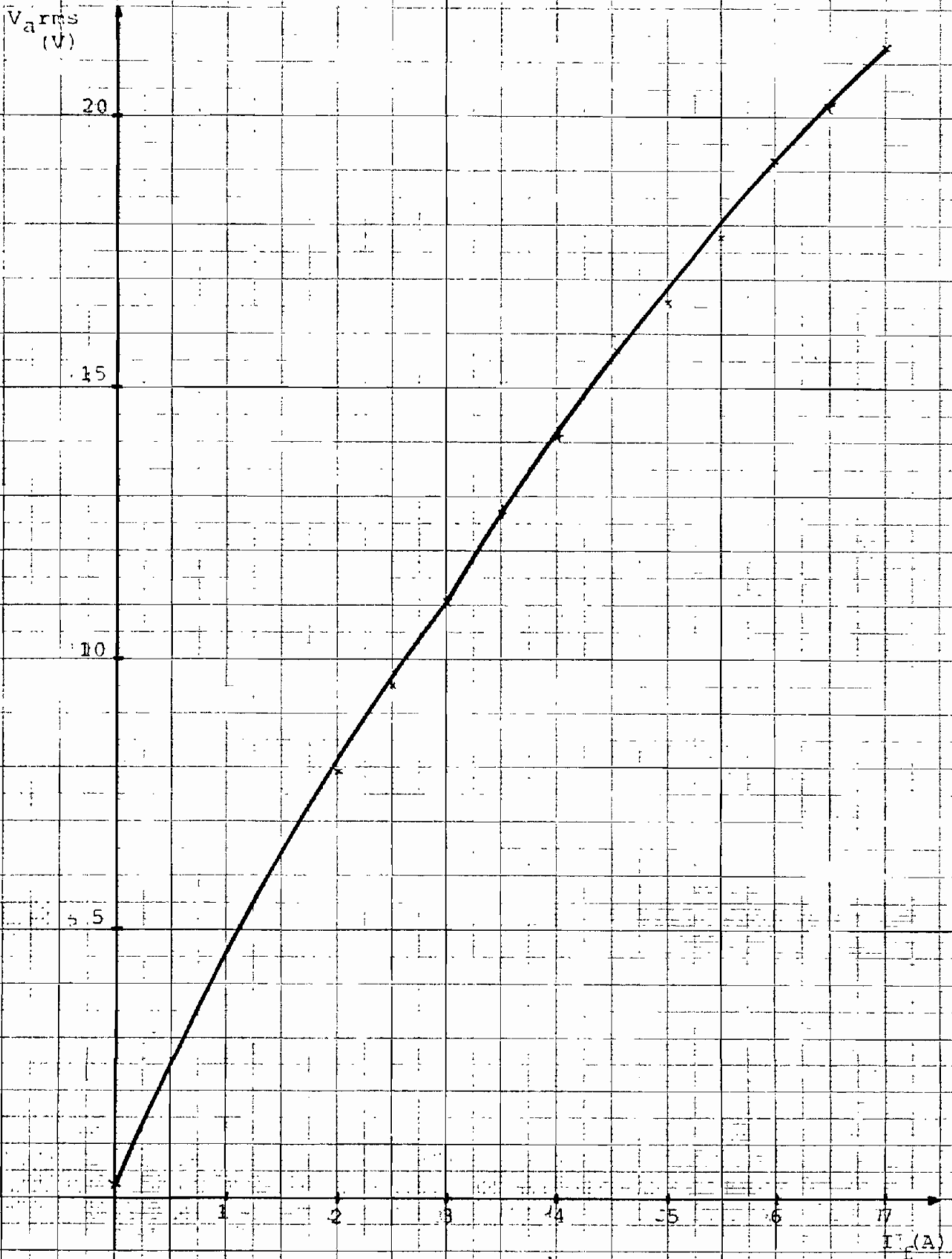


Fig. 4.10. Característica en vacío.

( $N_{Ta} = 200$ ;  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 11 y 12)



$$V_{0\text{rms}} = f(I_f(\text{A}))$$

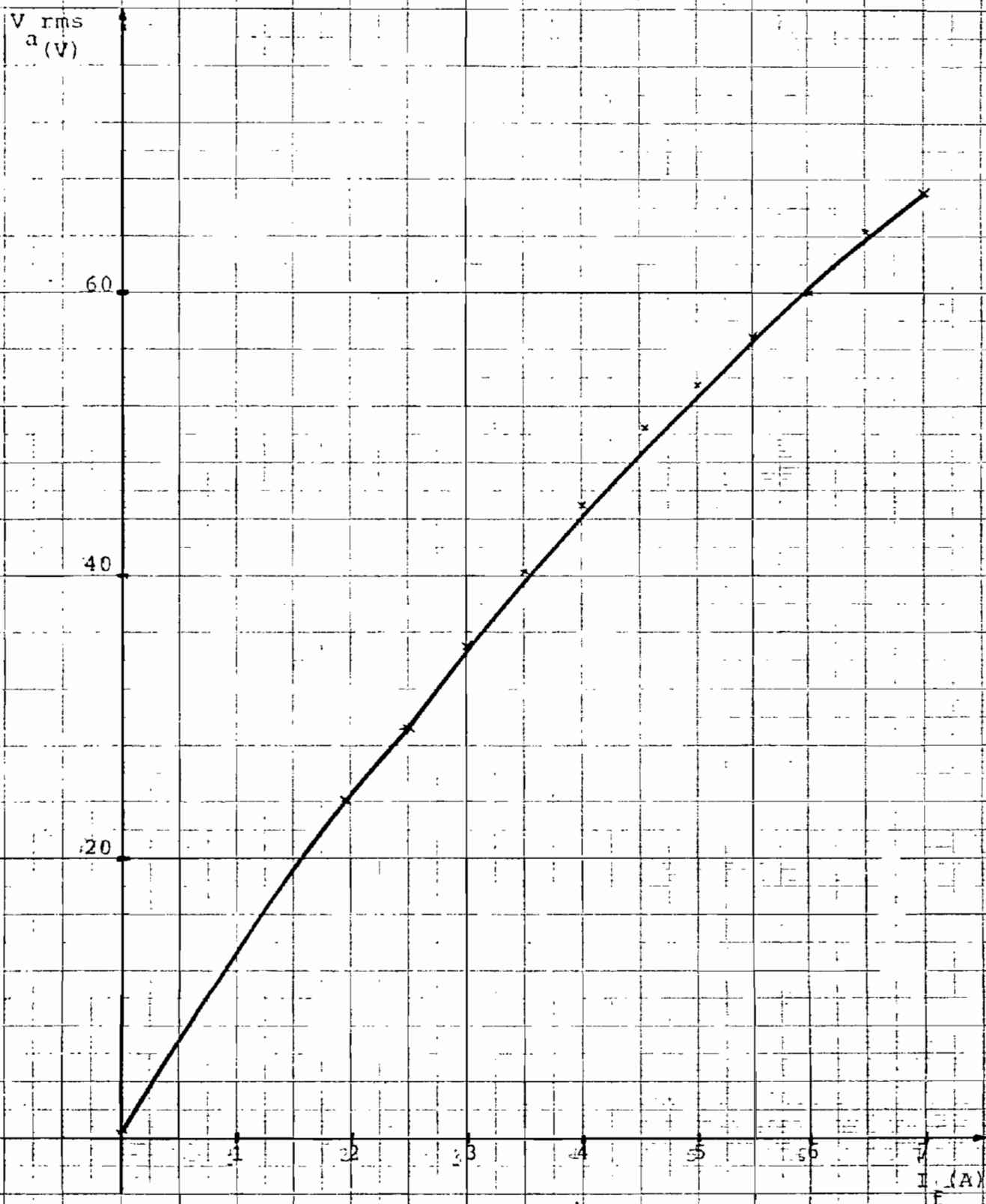


Fig. 4.11. Característica en vacío.

( $N_{Ta} = 700$ ;  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 13 y 14)

$$V_d^{rms} = f(I_f(A))$$

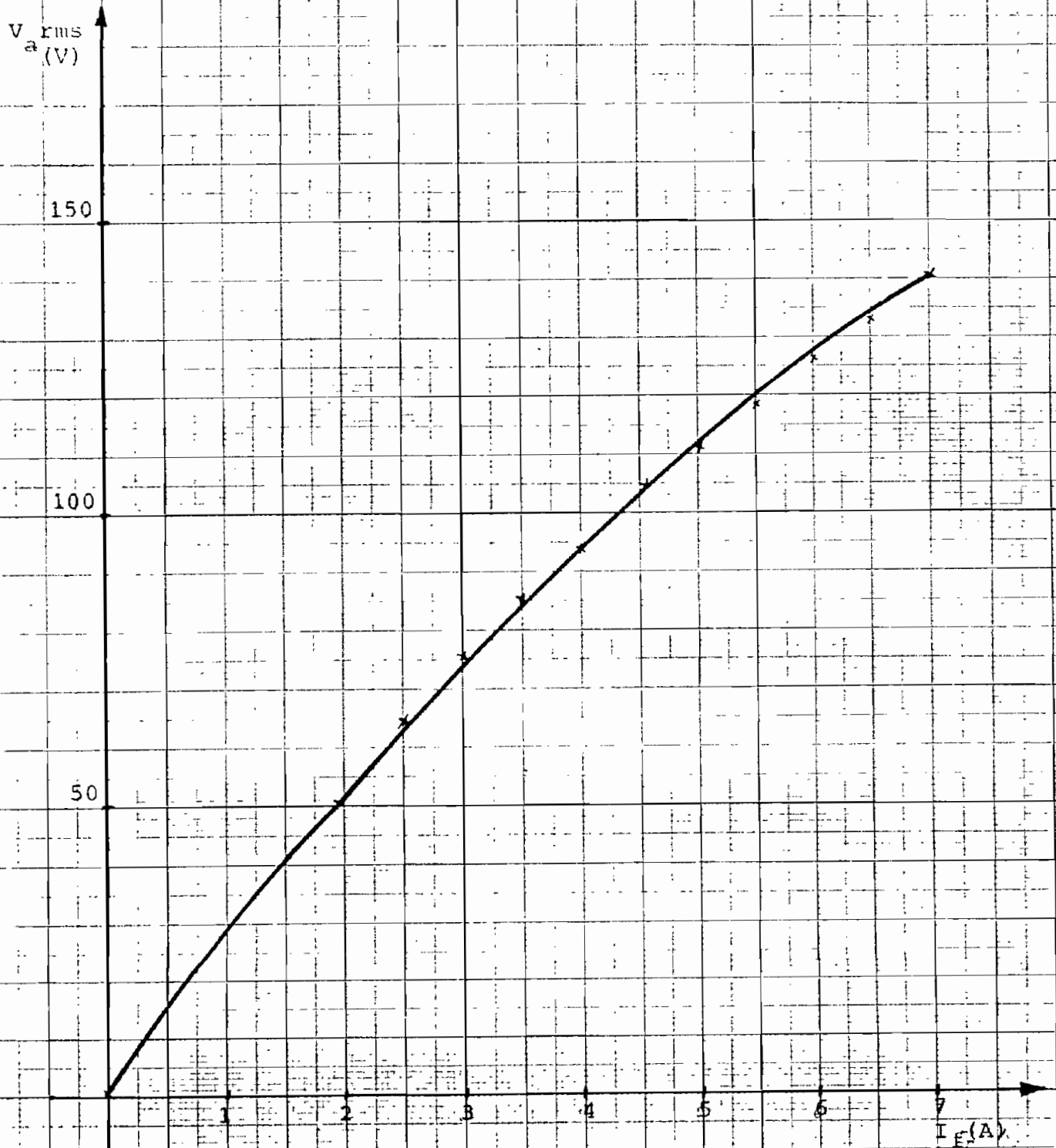


Fig. 4.12, Característica en vacío.

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 15 y 16)

$$V_{a\text{rms}} = f(I_f(A))$$

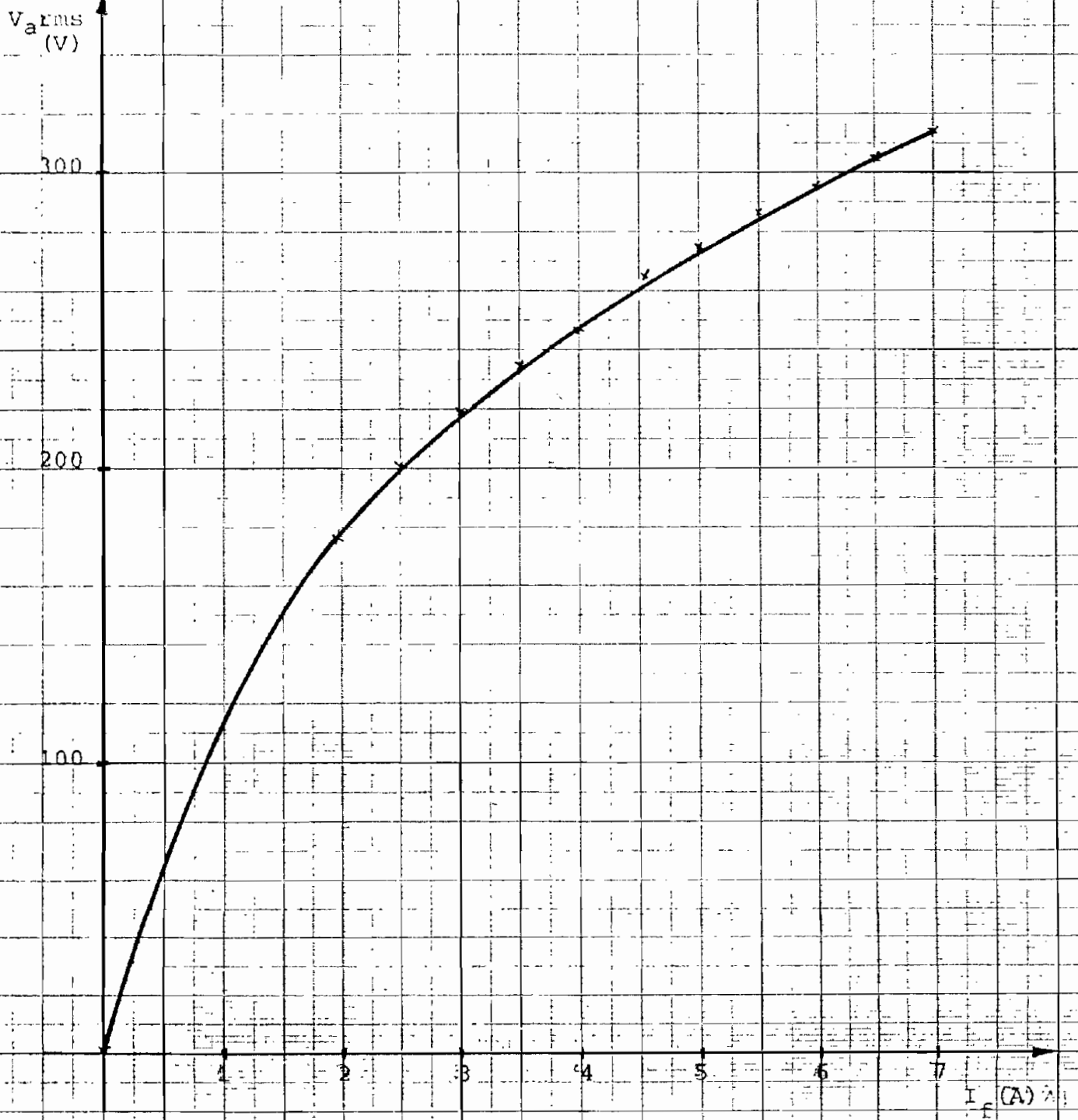


Fig. 4.13. Característica en vacío.

( $N_{Ta} = 3000$ ,  $N_{Tc} = 320$ . Bobinas 17 y 18)

$$V_{0\text{ rms}} = f(I_f(\text{A}))$$

$V_{0\text{ rms}}$   
(V)

10.0

7.5

5.0

2.5

0.2

0.4

0.6

0.8

1.0

1.2

$I_f$  (A)

Fig. 4.14. Característica en vacío.

( $N_{Ta} = 700$ ,  $N_{Tc} = 800$ . Bobinas 19 y 20)

Ta

Tc

$$V_{GRIS} = f(I_f(A))$$

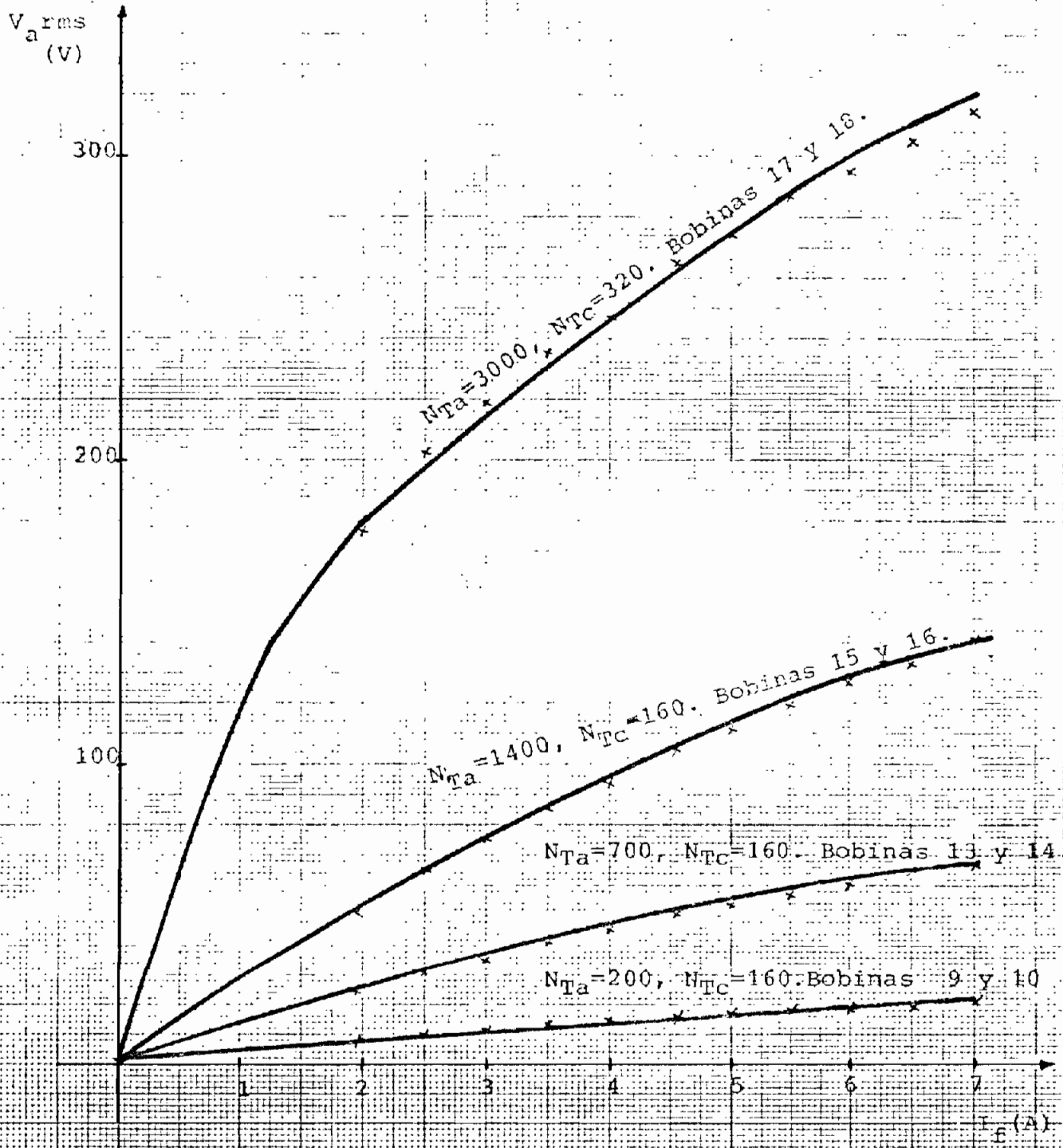


Fig. 4.15. Características en vacío.

La figura 4.16 numerales a y b se tiene la generación de voltaje debido al magnetismo residual, que es una componente por la velocidad relativa.

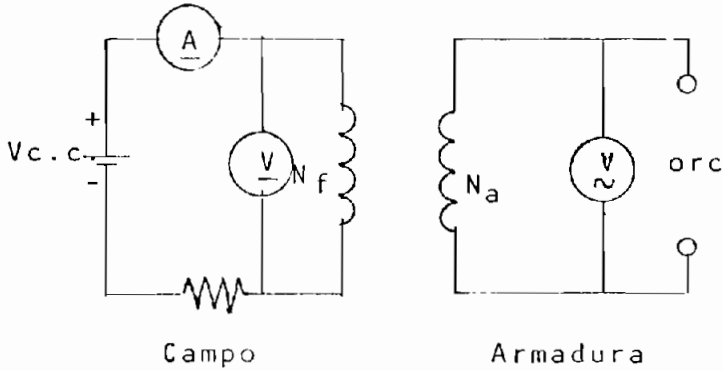
La figura 4.16 numerales c y d, muestran las formas de onda de voltaje en la armadura con la bobina de campo cortocircuitada; el valor rms de éstas, es menor que el caso cuando la bobina de campo no está cortocircuitada, porque se presenta la reacción de inducido.

Cuando se alimenta la bobina de campo, la forma de onda no varía; pero en valor si cambia dependiendo del número de espiras de la armadura. La figura 4.16 numeral g nos muestra claramente la variación indicada anteriormente, y en los numerales e, f, y h se ve las formas de ondas para los diferentes bobinados.

Con las características de vacío que se presentan de la figura 4.9 a la 4.15 se afirma que el voltaje generado es proporcional a la corriente de campo. En estas curvas se observa que no existe el codo de saturación y esto se debe a que es difícil saturar el aire. Existe una pequeña variación en éstas curvas y es por la presencia de las pérdidas en el núcleo y por saturaciones en las esquinas.

#### 4.3.4 Influencia de la velocidad en las formas de onda de voltaje de armadura.

El circuito utilizado es:



(velocidad variable por medio de la máquina impulsora. Variando la frecuencia en la alimentación del motor de inducción)

Fig. 4.17 Circuito para la prueba de velocidad.

Se realiza a corriente de campo constante y nominal. La velocidad variable se la realiza por medio de la frecuencia variable alimentada al motor de inducción que se utiliza como máquina impulsora y a voltaje de campo constante.

##### 4.3.4.1 Cuadros de valores

CUADRO 4.10

	BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)	
	Armadura	200	22		
	Campo	160	15	48	
Bobinas 9 y 10					
n (r.p.m.)	$V_{a rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	f (Hz)
530.00	5.30	0.80/1.00	10.00	18.00	18.00
910.00	8.70	1.15/1.85	10.00	30.00	30.70
1400.00	12.40	1.60/2.85	10.00	44.50	46.40
1830.00	15.70	1.80/3.70	10.00	55.00	61.00
2360.00	19.30	1.20/2.45	20.00	73.00	80.30
2880.00	22.30	1.45/2.95	20.00	88.00	98.50
3440.00	25.00	1.70/3.40	20.00	102.00	117.00

Ver. Fig. 4.18

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Influencia de la velocidad.



CUADRO 4.11

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 11 y 12

n (r.p.m.)	$V_{a\text{rms}}$ (V)	RE	ES	Vpp (V)	f (Hz)
650.00	6.61	1.00/1.20	10.00	22.00	22.04
980.00	9.38	1.40/2.00	10.00	24.00	33.34
1430.00	12.98	1.80/3.00	10.00	48.00	48.75
1800.00	15.70	1.90/3.80	10.00	57.00	60.00
2430.00	19.50	1.40/2.45	20.00	77.00	82.20
3070.00	23.20	1.60/3.00	20.00	92.00	104.50
3480.00	25.30	1.80/3.40	20.00	104.00	117.60

Ver. Fig. 4.19

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Influencia de la velocidad.

CUADRO 4.12

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	700	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 13 y 14

n (r.p.m.)	$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	f (Hz)
640.00	20.00	1.60/2.00	20.00	72.00	22.00
980.00	29.90	2.20/3.20	20.00	108.00	32.90
1440.00	42.12	1.05/1.85	50.00	145.00	48.70
1800.00	50.50	1.20/2.40	50.00	180.00	60.00
2440.00	62.80	1.55/3.20	50.00	237.50	82.20
2940.00	71.80	1.80/3.70	50.00	275.00	99.50
3400.00	79.00	1.00/2.10	100.00	310.00	115.10

Ver. Fig. 4.20

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Influencia de la velocidad.

CUADRO 4.13

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

n (r.p.m.)	$V_{arms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	f (Hz)
680.00	45.00	0.60/1.00	100.00	160.00	22.20
970.00	63.80	0.90/1.40	100.00	230.00	32.38
1430.00	89.40	1.10/2.10	100.00	320.00	47.90
1800.00	104.50	1.25/2.50	100.00	375.00	60.00
2400.00	134.00	1.60/3.40	100.00	500.00	81.80
3020.00	157.20	0.95/2.00	200.00	590.00	103.30
3380.00	168.00	1.00/2.30	200.00	660.00	114.40

Ver. Fig. 421

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Influencias de la velocidad.

CUADRO 4.14

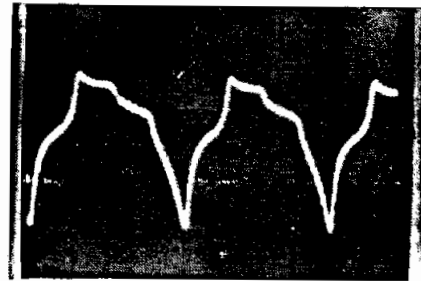
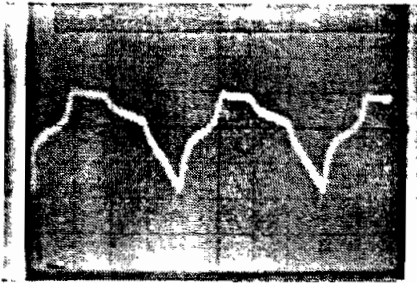
BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	700	22	
Campo	800	22	12

Bobinas 19 y 20

n (r.p.m.)	$V_{a_{rms}}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	f (Hz)
625.00	7.50	0.80/1.90	10.00	27.00	20.00
1040.00	8.40	0.90/2.10	10.00	30.00	35.40
1370.00	8.80	0.95/2.25	10.00	32.00	45.50
1800.00	9.40	0.85/2.40	10.00	32.50	60.00
2420.00	10.40	1.40/3.00	10.00	44.00	82.60
2900.00	11.16	1.70/3.20	10.00	49.00	99.30
3360.00	12.00	2.00/3.40	10.00	54.00	114.70

Ver. Fig. 4.22

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Influencia de la velocidad.



a) Bobinas 9 y 10

$n = 460$  r.p.m.  $V_a = 4.00$   $f = 14.5$  Hz

$N_{Ta} = 200$  e

$N_{Tc} = 160$  e

$V_f = 48$  V

$I_f = 4.62$  A

Escalas:  $H_o = 20$  ms/div;  $V_e = 5$  V/div.

b) Bobinas 9 y 10

$n = 3625$  r.p.m.  $V_a = 26$   $f = 125$  Hz

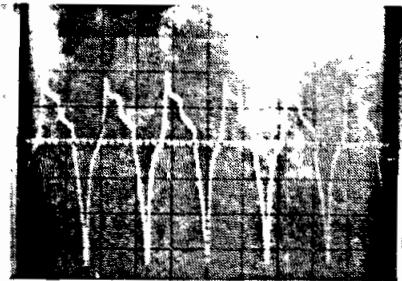
$N_{Ta} = 200$  e

$N_{Tc} = 160$  e

$V_f = 48$  V

$I_f = 4.62$  A

Escalas:  $H_o = 2$  ms/div;  $V_e = 20$  V/div.



c) Bobinas 19 y 20

$n = 3400$  r.p.m.  $V_e = 25.35$  V  $f = 117.6$  Hz

$N_{Ta} = 700$  e

$N_{Tc} = 800$  e

$V_f = 24$  V

$I_f = 0.91$  A

Escalas:  $H_o = 5$  ms/div;  $V_e = 20$  V/div.

Fig 4.24 Formas de onda de voltaje de armadura en la prueba de velocidad.

$$V_{grms} = f(n(\text{r.p.m.}))$$

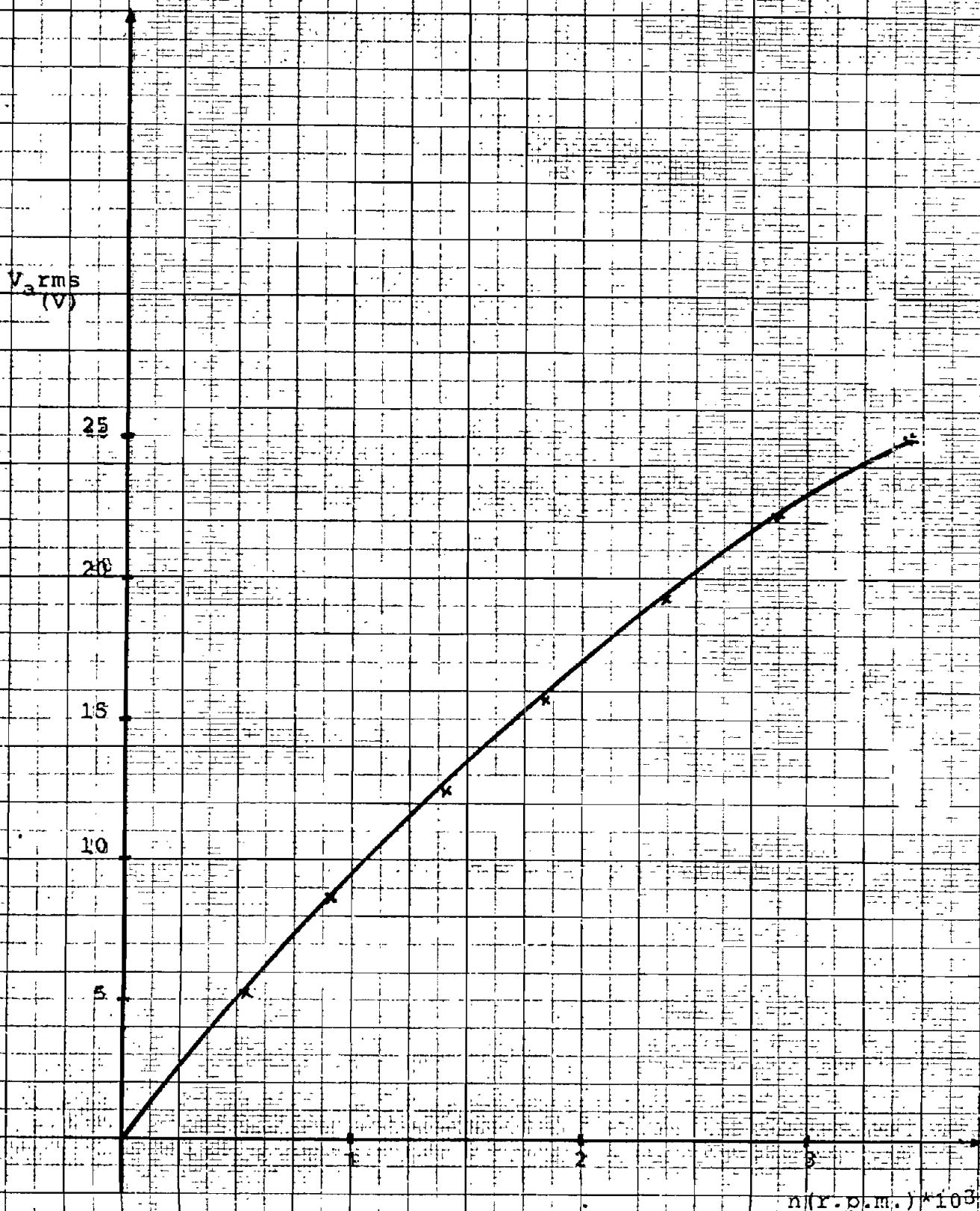


Fig. 4.18. Característica de velocidad.

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 9 y 10)

$$V_{0,rms} = f(n(r.p.m.))$$

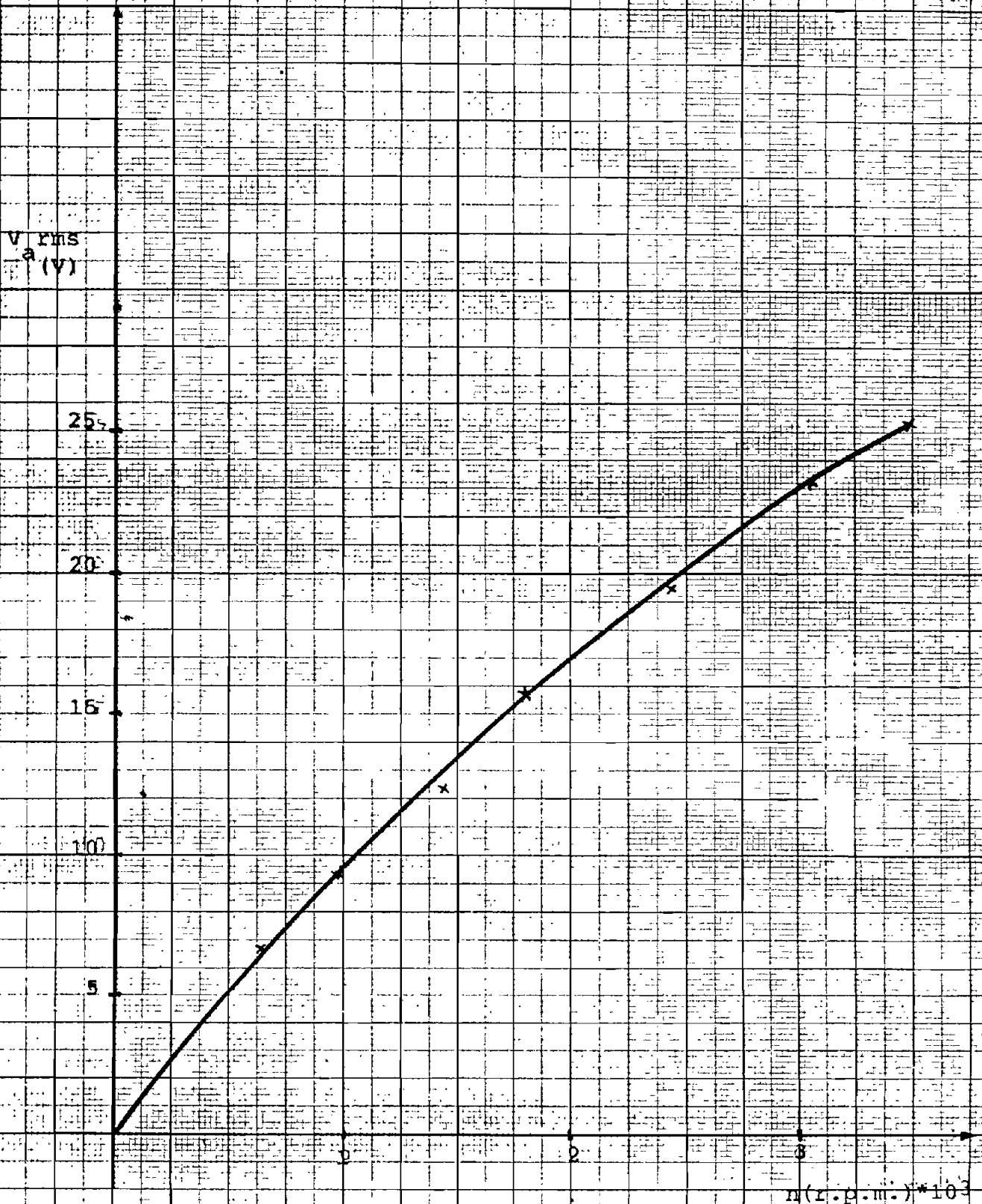


Fig. 4.19. Característica de velocidad.

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Te} = 160$ . Bobinas 11 y 12)

$$V_{a\text{ rms}} = f(n(\text{r.p.m.}))$$

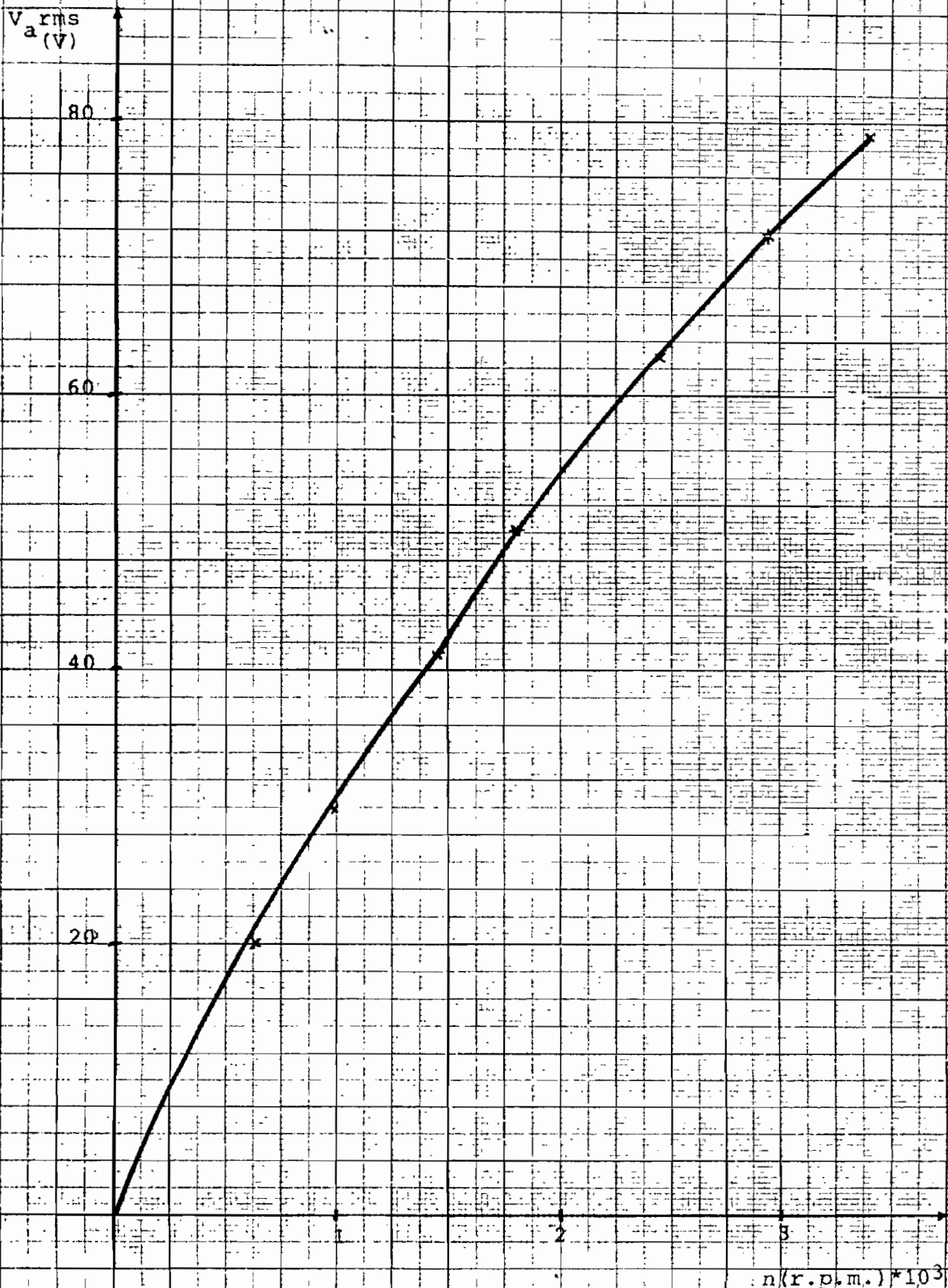


Fig. 4.20. Característica de velocidad.

( $N_{1a} = 700$ ,  $N_{1c} = 160$ . Bobinas 13 y 1)



$$V_{grms} = f(n(\text{r.p.m.}))$$

$V_a^{rms}$   
(V)

150

100

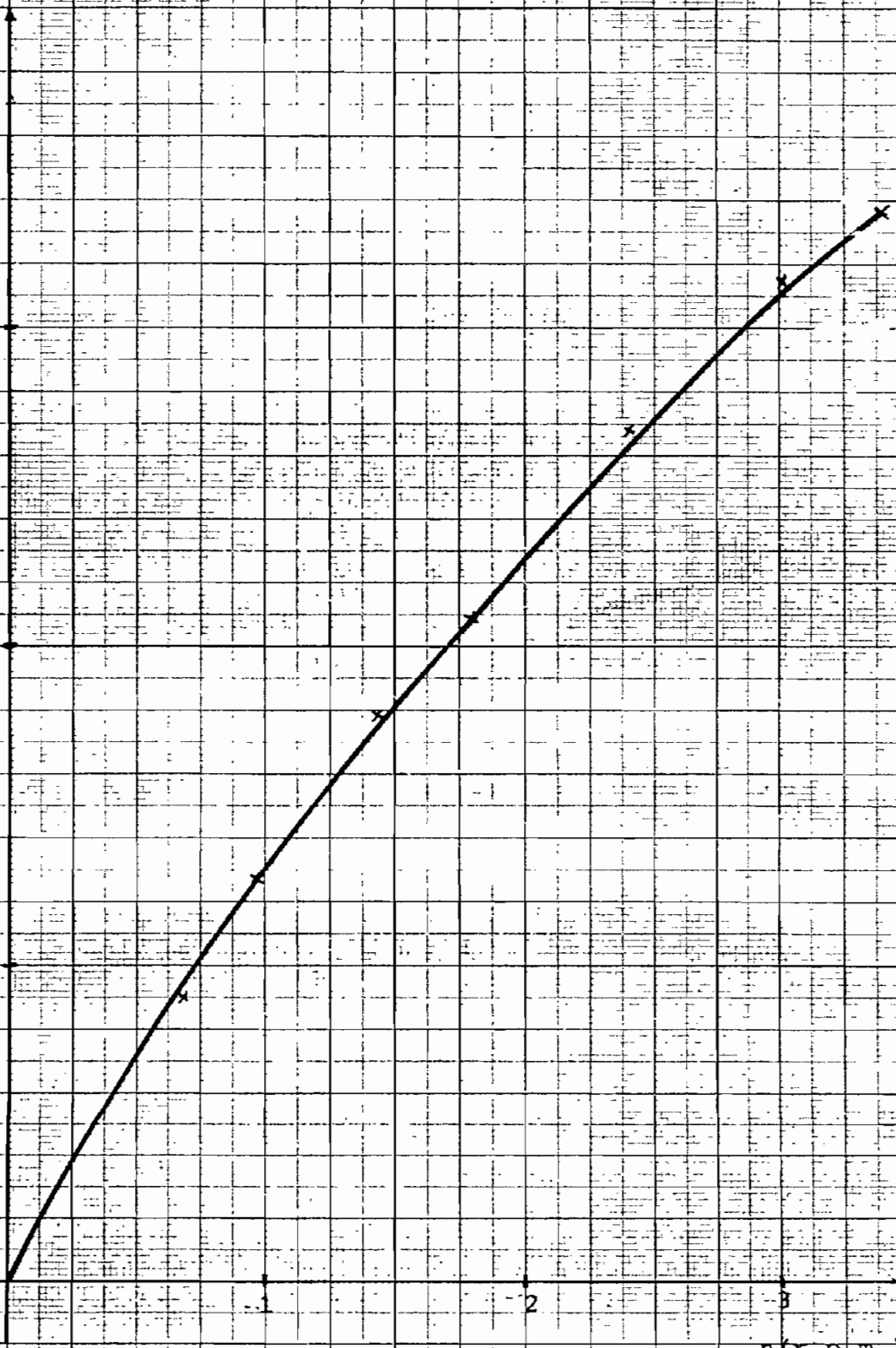
50

2

$n(\text{r.p.m.}) \cdot 10^3$

Fig. 4.21. Característica de velocidad.

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Te} = 160$ . Bobinas 15 y 16)



$$V_{a,rms} = f(n(\text{r.p.m.}))$$

$V_{a,rms}$   
(V)

12

8

4

1

2

$n(\text{r.p.m.}) \cdot 10^3$

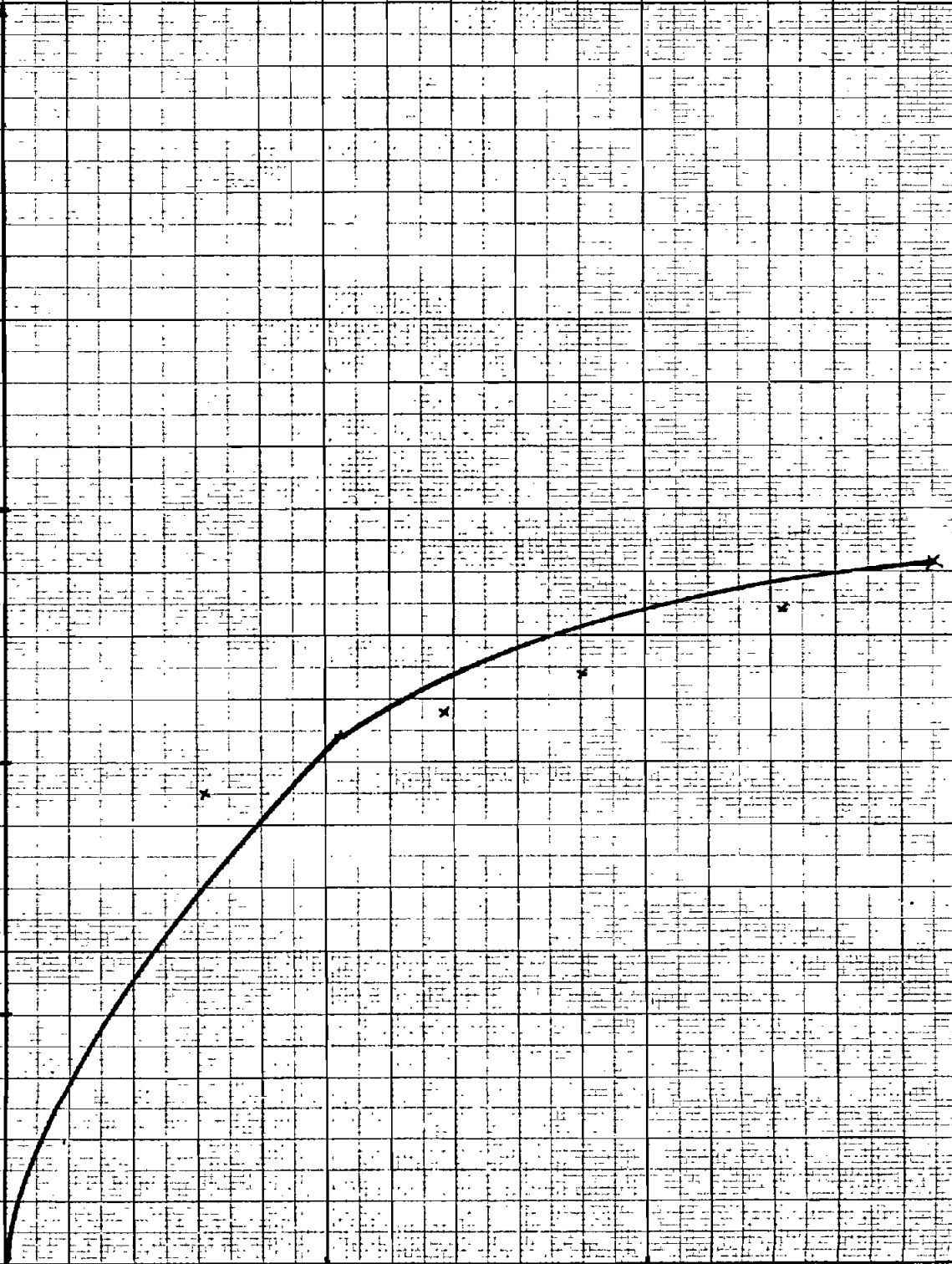


Fig. 4.22. Característica de velocidad.

( $N_{Ta} = 700$ ,  $N_{Tc} = 800$ . Bobinas: 19 y 20)

$$V_{grms} = f(n(\text{r.p.m.}))$$

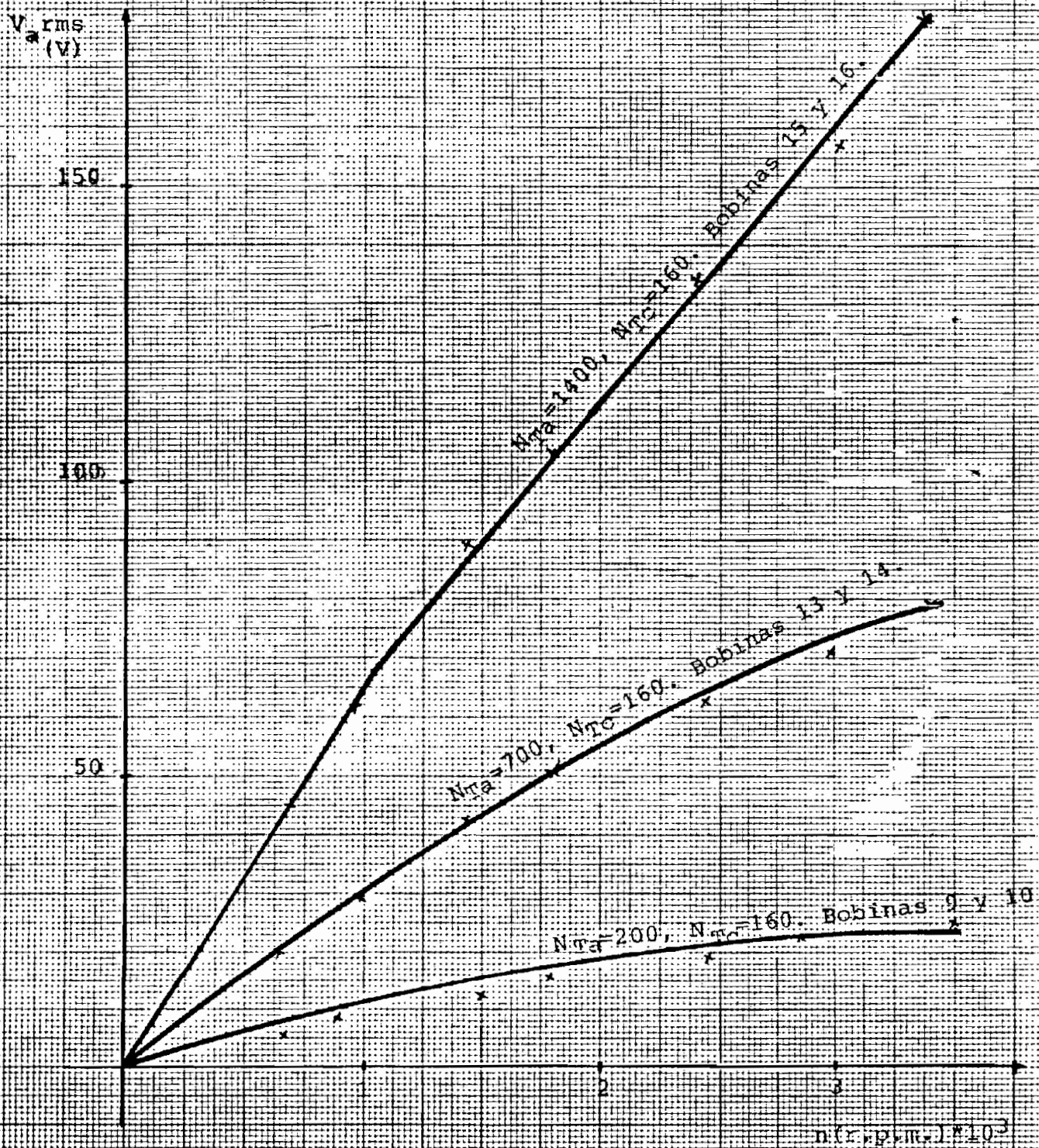


Fig. 4.23. Características de velocidad.

La forma de onda es similar a la prueba de vacío analizada anteriormente a diferencia que la frecuencia varía de acuerdo a la velocidad de funcionamiento del generador.

La frecuencia es directamente proporcional a la velocidad siendo además lineal, como se puede ver en los cuadros de valores tabulados.

El voltaje es directamente proporcional a la velocidad, en los bobinados del 9 al 18 se nota una gran diferencia en los bobinados 19 y 20, se debe a la distribución del flujo en el núcleo.

#### 4.3.5. Prueba de cortocircuito

El circuito utilizado es:

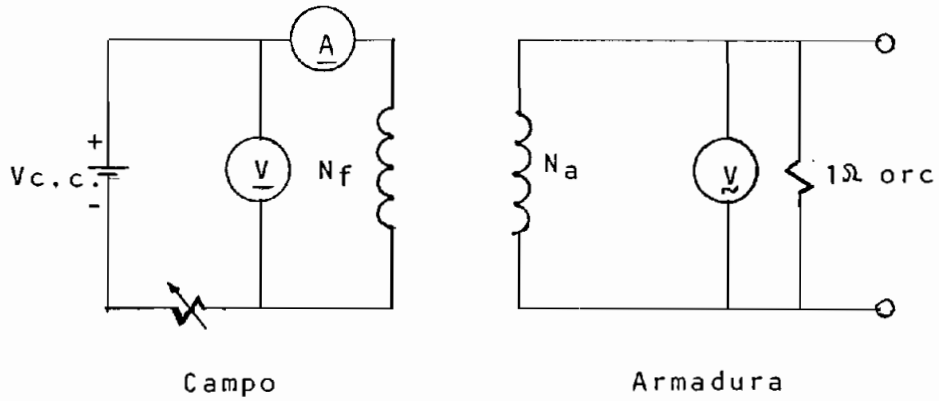


Fig. 4.25 Circuito para la prueba de cortocircuito.

Se realiza a velocidad constante nominal.

##### 4.3.5.1 Cuadros de valores.

CUADRO 4.15

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$I_f$ (A)	$I_{a\text{ rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
2.00	0.78	0.80/2.00	1.00	2.80
2.10	0.84	0.90/2.20	1.00	3.10
2.20	0.89	0.92/2.30	1.00	3.22
2.30	0.92	0.95/2.35	1.00	3.30
2.40	0.95	0.98/2.40	1.00	3.38
2.50	0.99	1.00/2.50	1.00	3.50

Ver. Fig. 4.26

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.

CUADRO 4.16

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 11 y 12

$I_f$ (A)	$I_{arms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
1.90	0.90	0.90/2.40	1.00	2.30
2.00	0.92	0.95/2.50	1.00	2.45
2.10	0.95	0.95/2.60	1.00	2.55
2.20	1.01	0.96/2.70	1.00	3.66
2.30	1.05	1.00/2.80	1.00	3.80

Ver. Fig. 4.27

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.

CUADRO 4.17

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 13 y 14

$I_f$ (A)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
2.00	0.27	0.60/1.20	0.50	0.90
3.00	0.39	0.80/1.70	0.50	2.50
4.00	0.51	1.05/2.20	0.50	1.63
4.60	0.59	1.25/2.60	0.50	1.93
5.00	0.65	1.35/2.75	0.50	2.05
6.00	0.77	1.60/3.25	0.50	2.43

Ver. Fig. 4.28

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.



CUADRO 4.18

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$I_f$ (A)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
2.00	0.15	1.40/2.80	0.10	0.42
3.00	0.22	0.95/2.15	0.20	0.62
4.00	0.29	1.15/2.80	0.20	0.72
4.60	0.33	1.40/3.20	0.20	0.92
5.00	0.36	1.55/3.40	0.20	0.99
6:00	0.42	1.85/4.10	0.20	1.19

Ver. Fig. 4.29

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.

CUADRO 4.19

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	3000	22	
Campo	320	15	48

Bobinas 17 y 18

$I_f$ (A)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
2	0.14	0.65/1.30	0.20	0.39
4	0.26	1.20/2.55	0.20	0.75
6	0.39	1.35/3.80	0.20	1.03

Ver. Fig. 4.30

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de Cortocircuito.

CUADRO 4.20

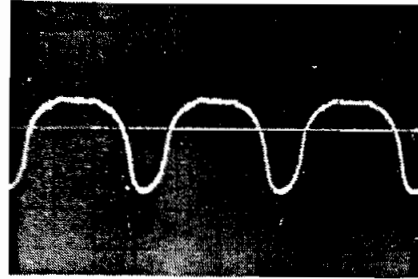
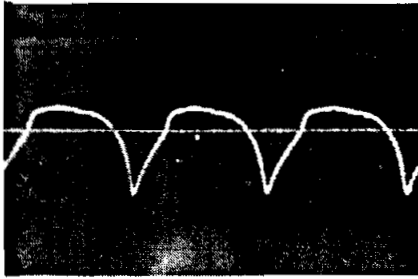
BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	800	22	24

Bobinas 19 y 20

$I_f$ (A)	$I_{a\text{ rms}}$ (A)	REI	ES	$i_{pp}$ (A)
0.65	0.33	0.60/1.40	0.50	1.00
0.70	0.36	0.65/1.43	0.50	1.04
0.75	0.37	0.70/1.50	0.50	1.10
0.80	0.39	0.75/1.52	0.50	1.14
0.90	0.43	0.80/1.60	0.50	1.20
0.95	0.44	0.82/1.75	0.50	1.30
1.00	0.46	0.85/1.80	0.50	1.33

Ver. Fig. 4.31

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.



a) Bobinas 9 y 10

$I_a = 0.78 \text{ A}$        $I_f = 2 \text{ A}$   
 $N_{Ta} = 200 \text{ e}$        $N_{Tc} = 160 \text{ e}$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 2 \text{ A/div}$ .

b) Bobinas 17 y 18

$I_a = 0.11$        $I_f = 1.45 \text{ A}$   
 $N_{Ta} = 3000 \text{ e}$        $N_{Tc} = 320 \text{ e}$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 1 \text{ A/div}$ .

Fig. 4.33 Formas de onda de corriente en la prueba de cortocircuito.

$$I_{Drms} = f(I_f(A))$$

$I_{Drms}$   
(A)

1.00

0.75

0.50

0.25

0.5

1.0

1.5

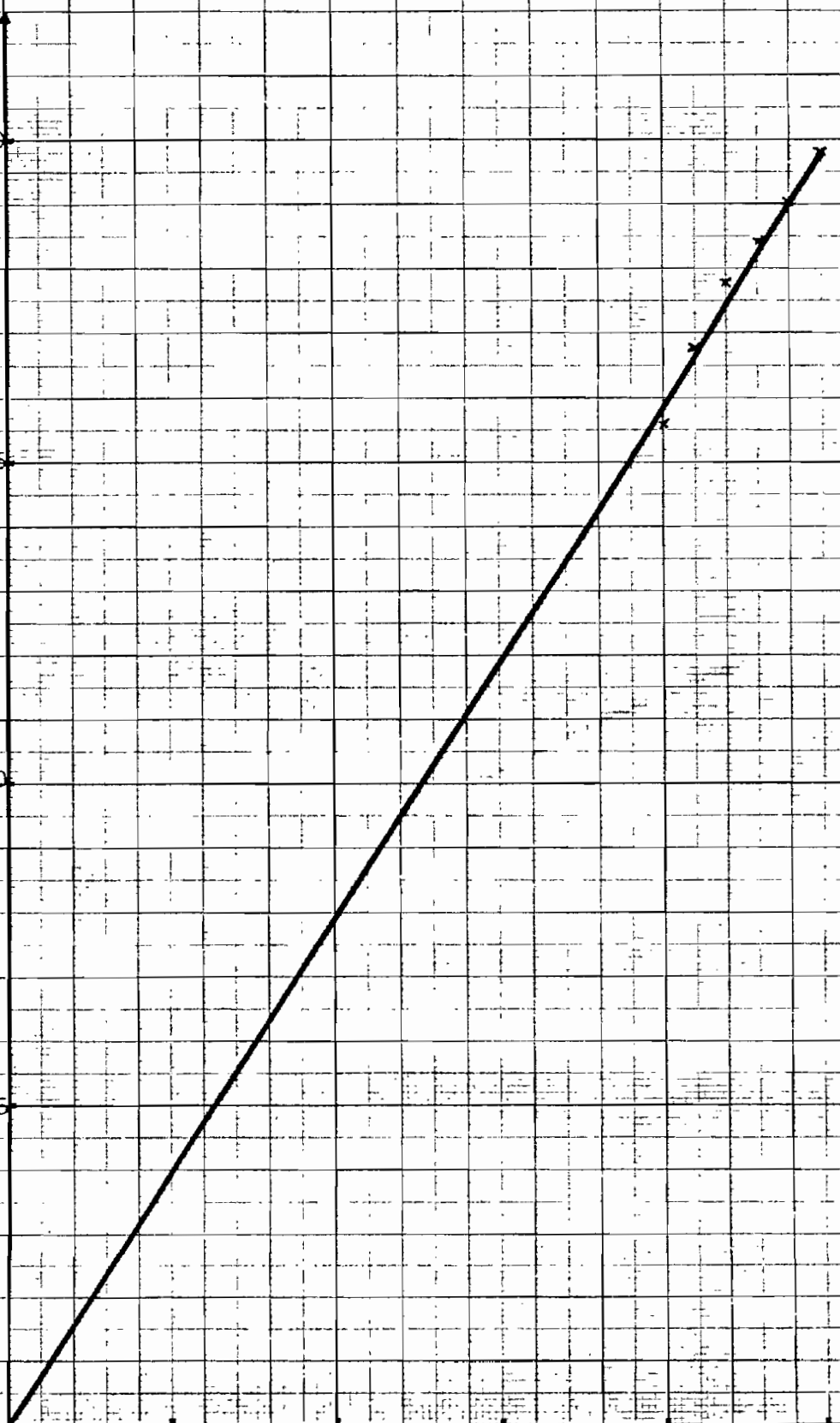
2.0

2.5

$I_f$  (A)

Fig. 4.26. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 9 y 10)



$$I_{grms} = f(I_f(A))$$

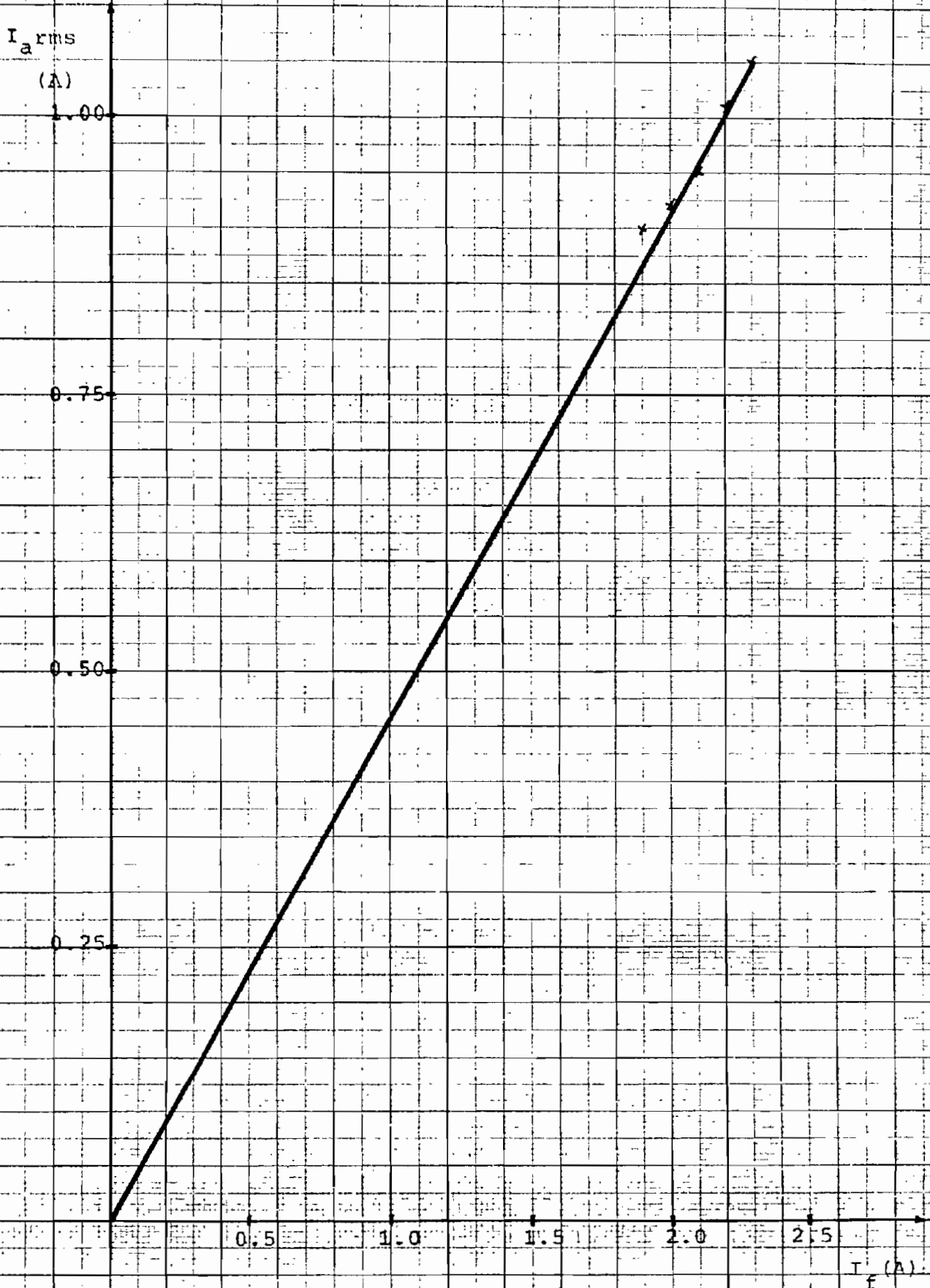


Fig. 4.27. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 160$ , Bobinas 11 y 12)

$$I_{a\text{ rms}} = f(I_f(A))$$

$I_{a\text{ rms}}$   
(A)

1.00

0.75

0.50

0.25

2

4

6

$I_f(A)$

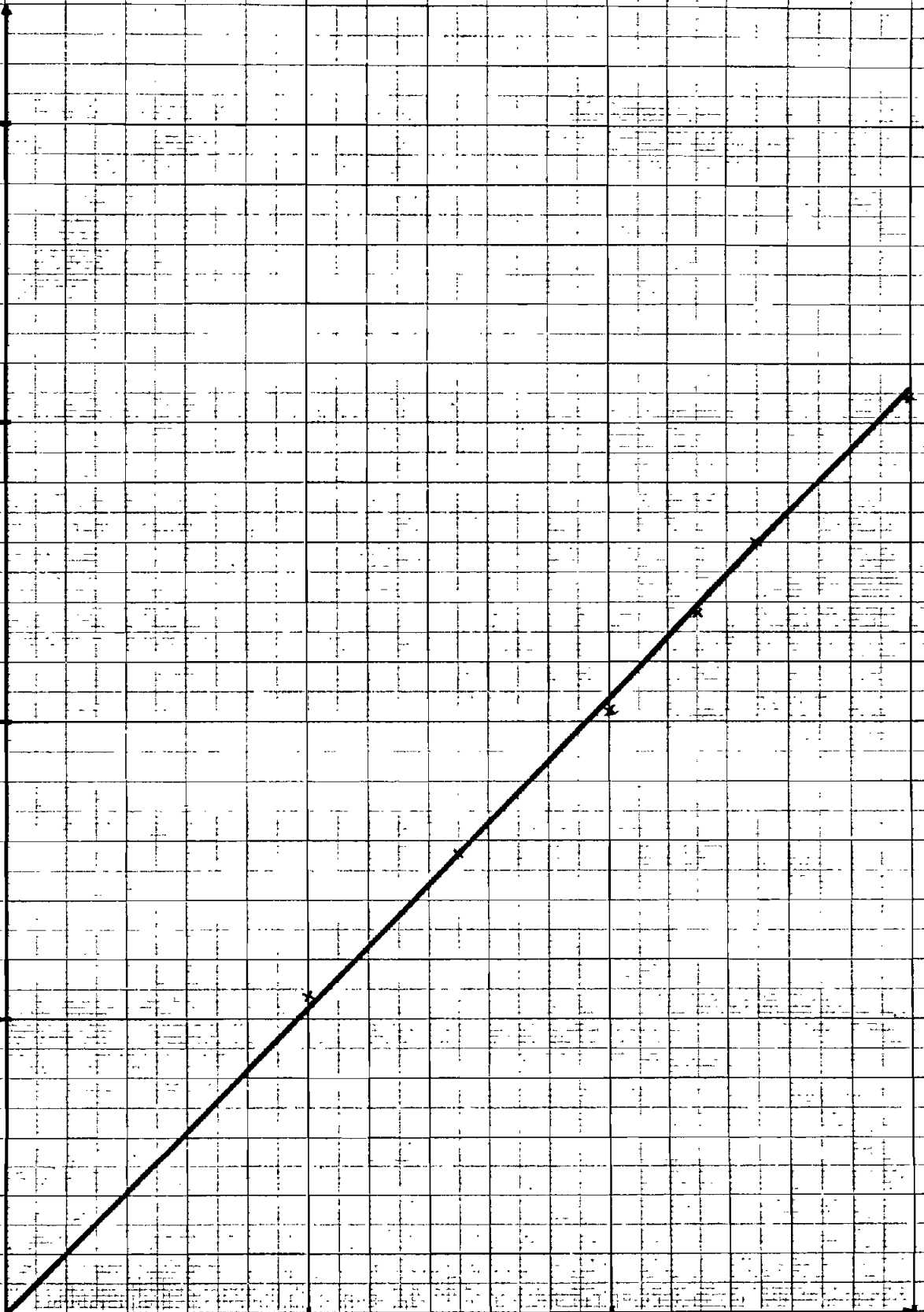


Fig. 4.28. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

( $N_{Td} = 700$ ,  $N_{Tc} = 150$ . Bobinas 13 y 14)

$$I_{a\text{rms}} = f(I_f(A))$$

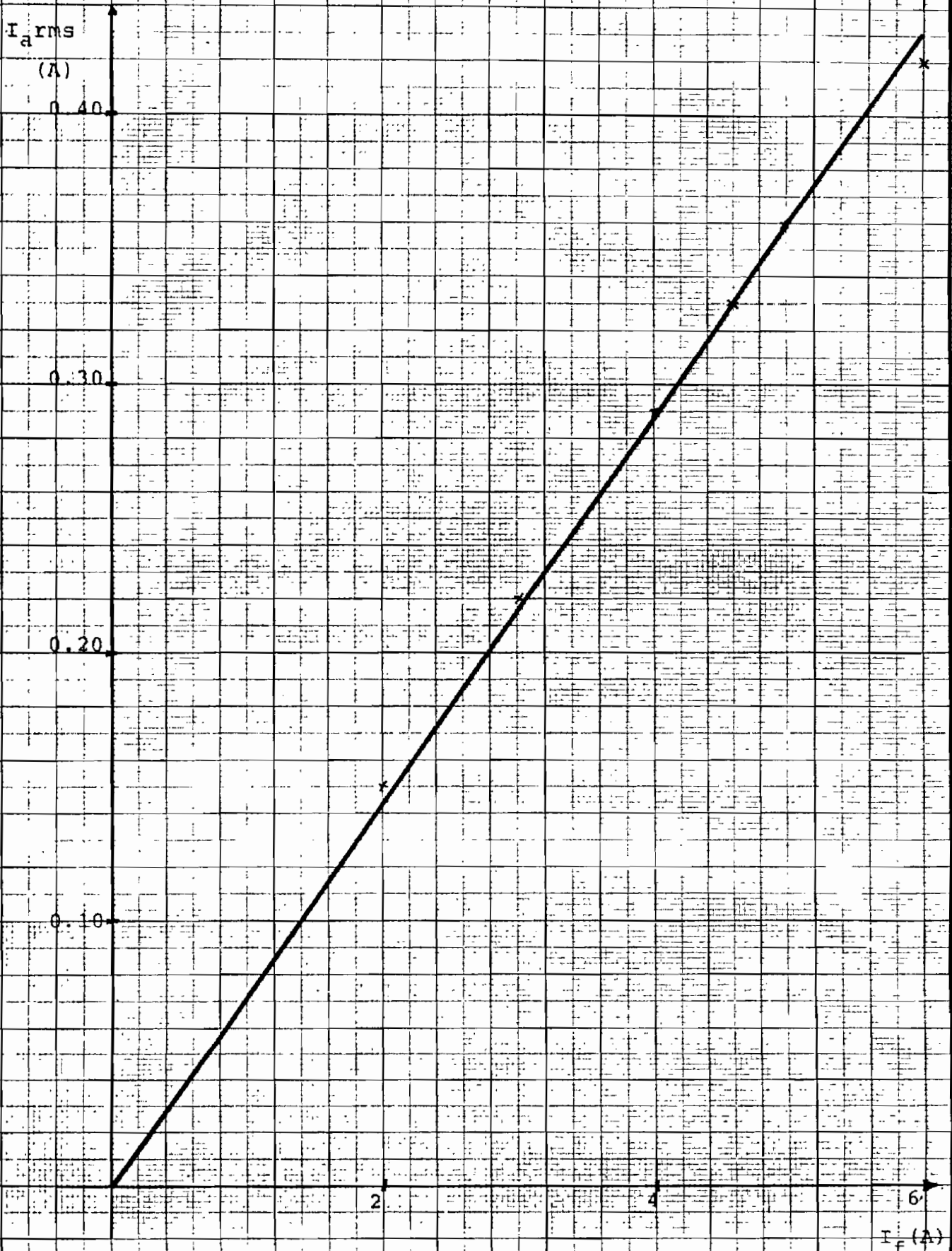


Fig. 4.29. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 15 y 16)



$$I_{D\text{rms}} = f(I_f(A))$$

$I_{D\text{rms}}$   
(A)

0.40

0.30

0.20

0.10

2

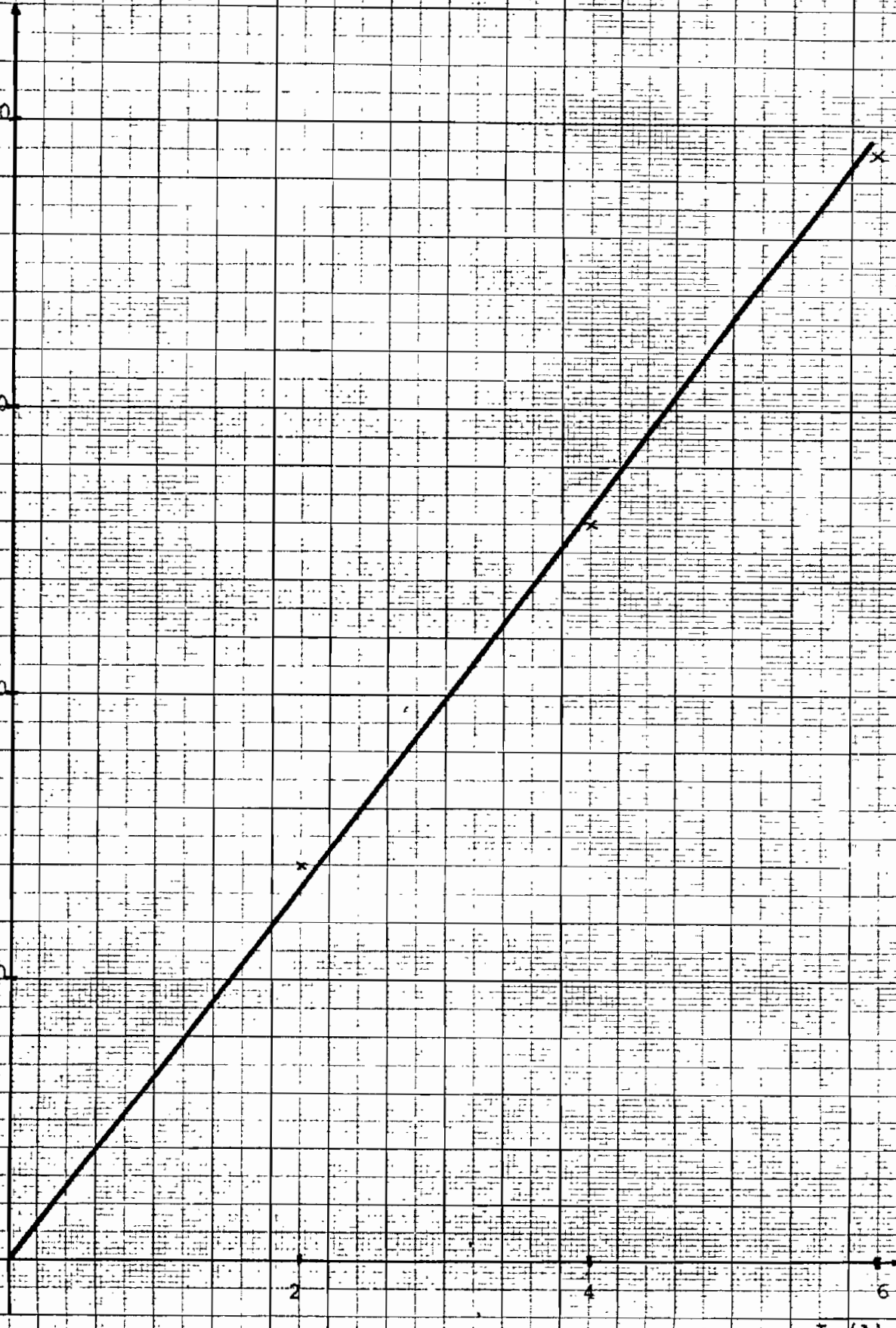
4

6

$I_f$  (A)

Fig. 4.30. Característica de corriente de campo- corriente de armadura.

( $N_{Ta} = 3000$ ,  $N_{Tc} = 320$ . Bobinas 17 y 18)



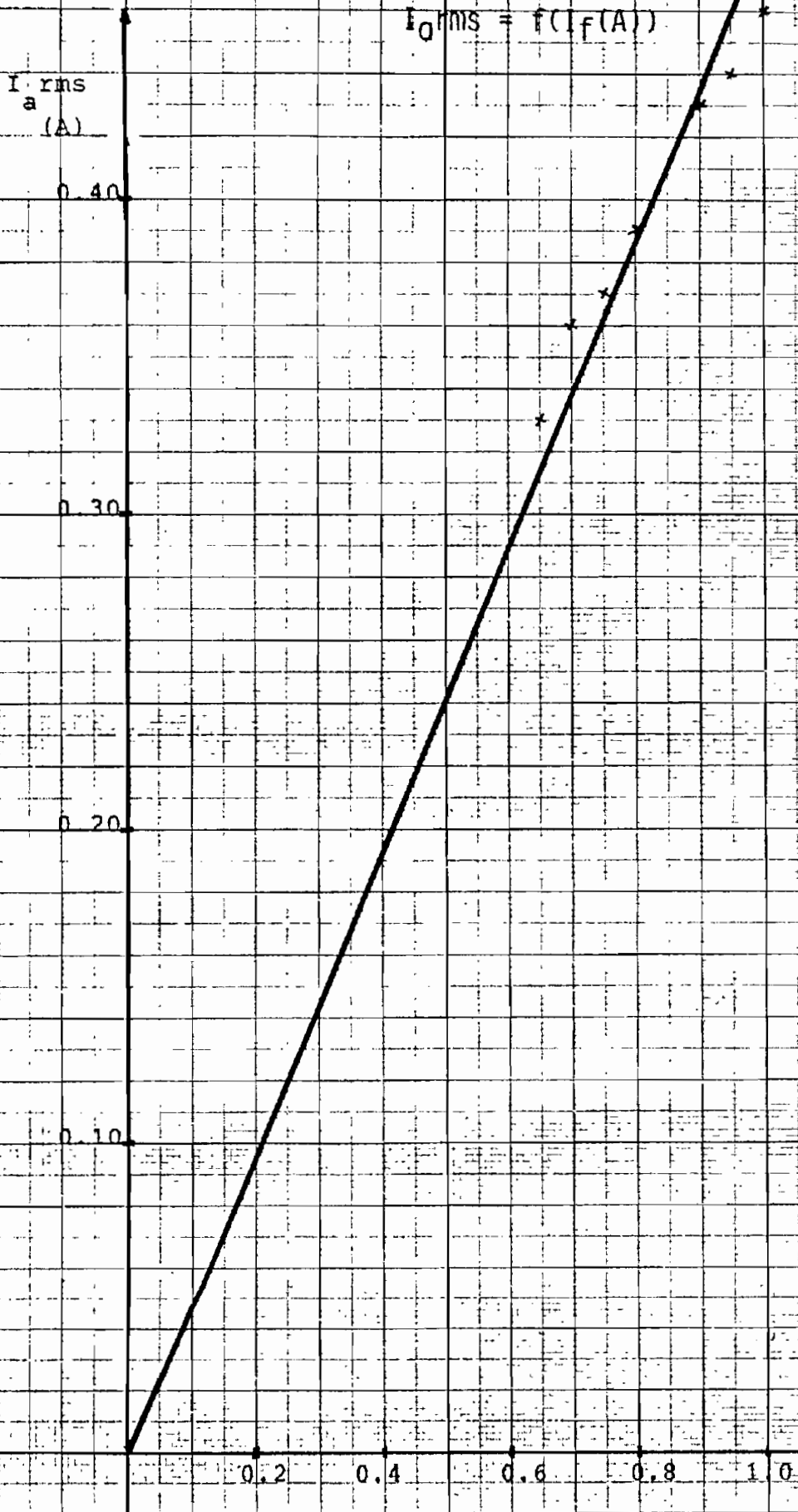


Fig. 4.31. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

( $N_{T_a} = 700$ ,  $N_{T_c} = 800$ . Bobinas 19 y 20)

$$I_{GRMS} = f(I_f(A))$$

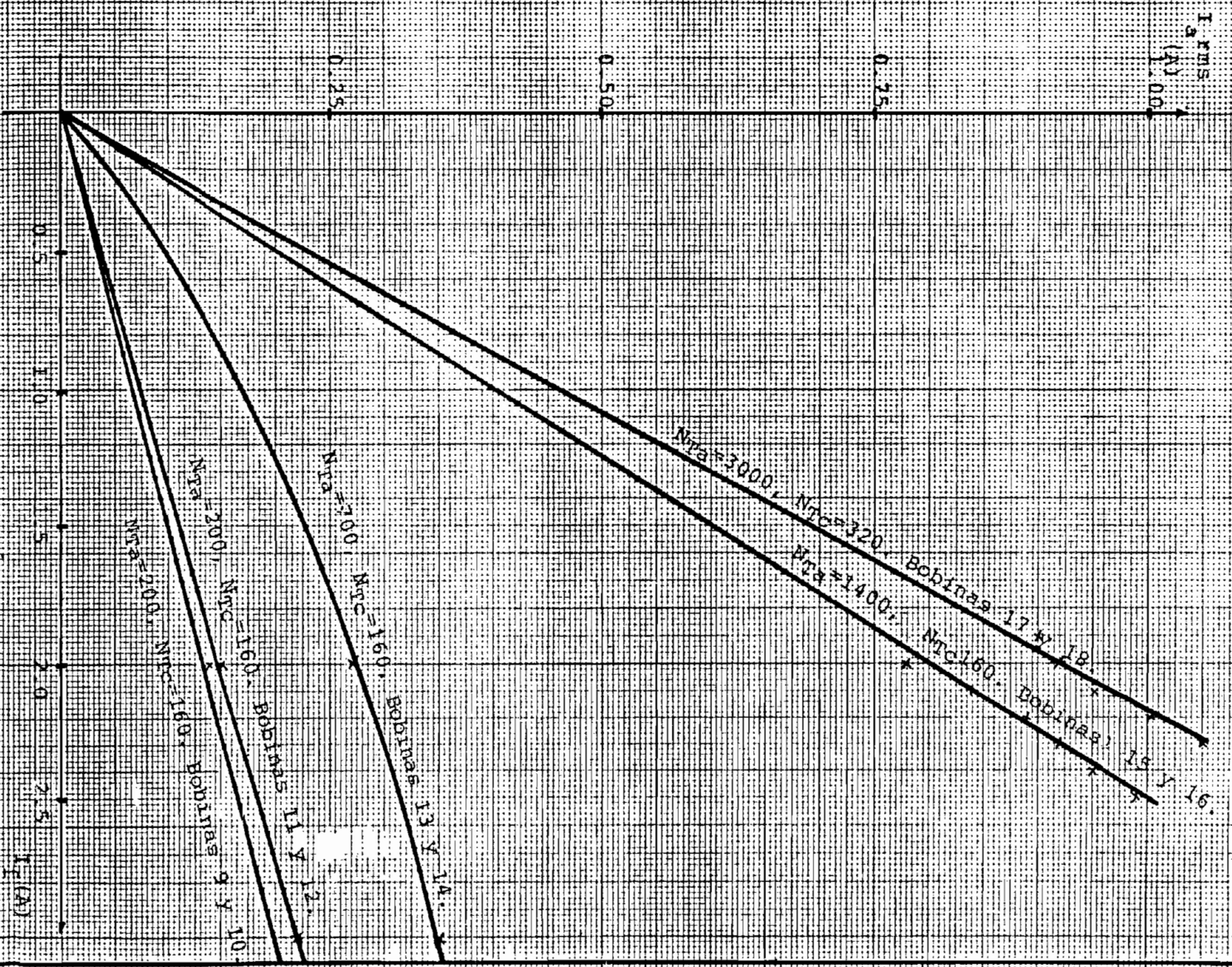


Fig. 4.32. Características de corriente de campo-coriolante de armadura

Esta prueba es significativa, porque nos proporciona la información de corriente que es posible antes que el bobinado de armadura sufra daño. Como era de esperarse la reacción de inducido hace que la corriente de armadura con respecto a la corriente de campo no sube considerablemente. Mientras más número de espiras contenga la armadura este efecto es mayor y viceversa.

La corriente de campo es directamente proporcional a la corriente de armadura, como se puede ver en las figuras 4.36 a la 4.31. En la figura 4.32 se puede observar la variación que tiene la corriente de armadura con respecto a la corriente de campo para los diferentes bobinados.

#### 4.3.6 Pruebas de carga

El circuito utilizado para las pruebas de carga es:

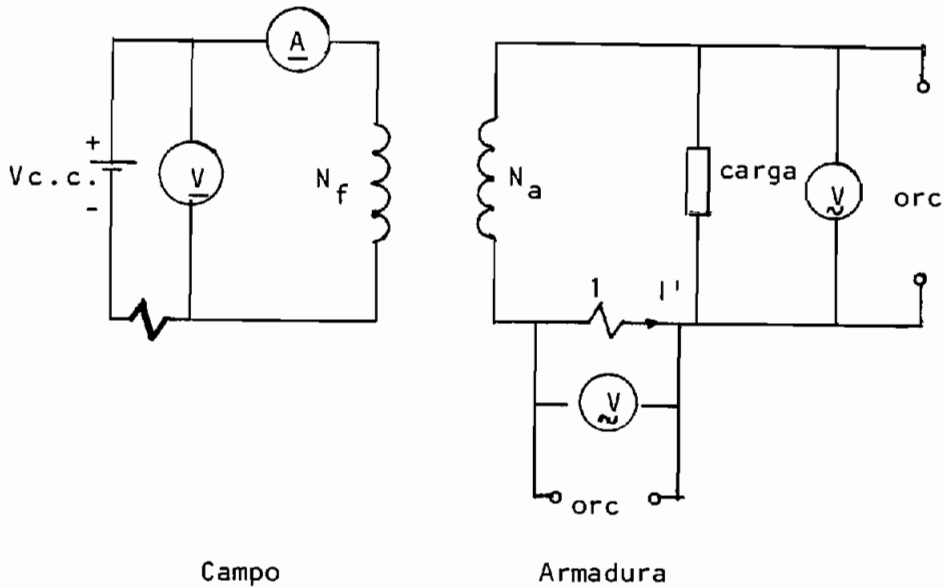


Fig. 4.34 Circuito para las pruebas de carga  
( $i' = I_{a\text{rms}}$ )

Se realiza a velocidad constante nominal, a voltaje y corriente de campo constante y nominal.

Para cargas Resistivas (R), Inductivas (L), capacitiva (C), resistiva-inductiva (R-L), resistiva-capacitiva (R-C).

##### 4.3.6.1 Cuadros de valores

1.- Con carga resistiva (R).

CUADRO 4.21

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.10	1.90/3.65	10.00	55.50	0.00			
14.30	1.60/3.60	10.00	52.00	0.15	0.40/0.85	0.50	0.63
13.20	1.40/3.50	10.00	49.00	0.34	0.25/0.45	2.00	1.40
11.58	1.20/3.20	10.00	44.00	0.60	0.38/0.90	2.00	2.56
10.30	1.05/2.90	10.00	39.50	0.80	0.45/1.15	2.00	3.20

Continuación (cuadro 4.21)

9.50	1.00/2.73	10.00	37.30	0.91	0.50/1.30	2.00	3.60
8.80	0.85/2.70	10.00	35.50	0.98	0.53/1.40	2.00	3.86
7.30	0.70/2.00	10.00	27.00	1.19	0.60/1.65	2.00	4.50

Ver. Fig. 4.35

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (R)

CUADRO 4.22

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 13 y 14

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
49.00	1.15/2.30	50.00	172.50	0.00			
44.20	0.95/2.30	50.00	162.50	0.11	0.30/0.60	0.50	0.45
39.00	0.80/2.15	50.00	147.50	0.20	0.45/1.10	0.50	0.78
33.70	0.60/1.80	50.00	120.00	0.31	0.65/1.75	0.50	1.20
26.00	0.50/1.40	50.00	95.00	0.41	0.85/2.20	0.50	1.53



Continuación (cuadro 4.22)

22.30	0.40/1.15	50.00	77.50	0.45	0.95/2.30	0.50	1.63
11.00	0.55/1.30	20.00	37.00	0.55	1.08/2.40	0.20	0.70

Ver. Fig. 4.36

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (R)

CUADRO 4.23

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
104.00	1.20/2.50	100.00	370.00	0.00			
75.36	0.80/2.00	100.00	280.00	0.16	0.35/0.85	0.50	0.60
61.60	0.60/1.60	100.00	220.00	0.20	0.40/1.15	0.50	0.78
41.70	0.40/1.00	100.00	140.00	0.26	0.50/1.30	0.50	0.90
19.00	1.00/2.20	20.00	64.00	0.30	0.65/1.40	0.50	1.03

Ver. Fig. 4.37

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de Carga (R)

CUADRO 4.24

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	3000	22	
Campo	320	15	48

Bobinas 17 y 18

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
259.00							
103.50	1.90/4.50	50.00	320.00	0.21	0.40/1.00	0.50	0.70
72.00	1.30/3.00	50.00	215.00	0.24	0.42/1.00	0.50	0.71
8.00	0.40/0.80	20.00	24.00	0.30	0.55/1.15	0.50	0.85

Ver. Fig. 4.38

CONTIENE: Datos de Laboratorio

Prueba de Carga (R)

CUADRO 4.25

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.50				0.00			
13.70	1.00/1.70	20.00	54.00	0.25	0.40/0.50	1.00	0.90
12.80	2.00/3.20	10.00	52.00	0.37	0.50/0.65	1.00	1.15
9.40	1.65/2.65	10.00	43.00	0.79	0.50/0.80	2.00	2.60
8.80	1.60/2.60	10.00	42.00	0.87	0.55/0.83	2.00	2.76
7.10	1.25/2.20	10.00	34.50	1.10	0.60/1.10	2.00	3.40

Ver. Fig. 4.40

CONTIENE: Datos de Laboratorio

Prueba de Carga (L)

CUADRO 4.26

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	700	22	
Campo	160		48

Bobinas 13 y 14

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
49.20				0.00			
44.40	1.20/2.10	50.00	165.00	0.07	0.60/0.65	0.20	0.25
35.50	1.10/1.75	50.00	142.50	0.17	1.20/1.45	0.20	0.53
31.00	1.10/1.70	50.00	140.00	0.22	0.38/0.55	1.00	0.93
26.30	0.90/1.70	50.00	130.00	0.27	0.40/0.60	1.00	1.00

Continuación (Cuadro 4.26)

23.00	1.90/3.50	20.00	108.00	0.32	0.44/0.68	1.00	1.12
18.80	1.80/2.90	20.00	94.00	0.37	0.45/0.70	1.00	1.15
3.40	0.85/1.25	10.00	21.00	0.57	0.65/1.20	1.00	1.85

Ver. Fig. 4.41

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (L)

CUADRO 4.27

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
107.00				0.00			
90.90	1.30/2.10	100.00	440.00	0.05	0.65/0.80	0.10	0.15
73.70	1.12/1.90	100.00	302.00	0.10	0.70/0.95	0.20	0.33
58.80	1.10/1.60	100.00	270.00	0.15	0.90/1.30	0.20	0.44
44.70	2.00/2.45	50.00	222.50	0.20	0.50/0.75	0.50	0.63

Continuación (Cuadro 4.27)

16.20	2.00/2.40	20.00	80.00	0.30	0.60/1.20	0.50	0.90
-------	-----------	-------	-------	------	-----------	------	------

Ver. Fig. 4.42

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (L)



CUADRO 4.28

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	3000	22	
Campo	320	15	48

Bobinas 17 y 18

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
265.50				0.00			
216.00	1.55/2.95	200.00	900.00	0.06	1.00/1.20	0.10	0.22
183.20	1.50/2.50	200.00	800.00	0.10	1.40/1.90	0.10	0.33
111.60	1.20/1.60	200.00	560.00	0.19	1.10/1.80	0.20	0.58
58.40	1.40/1.65	100.00	305.00	0.26	0.58/0.97	0.50	0.78
16.70	0.90/1.00	50.00	95.00	0.30	0.60/1.20	0.50	0.90

Ver. Fig. 4.43

(Prueba de Carga (L) )

CUADRO 4.29

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	$V_{c.c.}$ (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.90				0.00			
16.10	1.35/2.00	20.00	67.00	0.15	2.00/0.60	0.50	1.30
16.90	1.35/2.00	20.00	67.00	0.25	2.30/0.85	0.50	1.58
17.70	1.20/2.00	20.00	64.00	0.43	1.70/0.62	1.00	2.32
18.10	1.27/2.10	20.00	67.40	0.55	2.00/0.70	1.00	2.70

Continuación (Cuadro 4.29)

18.60	1.25/2.15	20.00	68.00	0.79	2.70/1.00	1.00	3.70
19.20	1.20/2.20	20.00	68.00	0.87	3.00/1.10	1.00	4.10

Ver. Fig. 4.45

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (C)

CUADRO 4.30

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 13 y 14

$V_{arms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{arms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
49.90				0.00			
56.50	1.40/2.50	50.00	195.00	0.13	2.60/1.40	0.20	0.80
69.80	1.70/3.25	50.00	247.50	0.43	1.40/0.65	1.00	3.05
76.10	2.00/3.60	50.00	280.00	0.61	1.90/1.00	1.00	2.90
85.20	2.10/3.60	50.00	285.00	0.81	2.30/1.40	1.00	3.70

Continuación (Cuadro 4.30)

92.20	2.25/3.80	50.00	302.50	0.95	2.60/1.60	1.00	4.20
-------	-----------	-------	--------	------	-----------	------	------

Ver. Fig. 4.46

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (C)

CUADRO 4.31

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$V_{a\ rms}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
107.00				0.00			
157.00	1.00/1.80	200.00	560.00	0.24	1.60/0.50	0.50	1.05
178.00	1.38/2.10	200.00	696.00	0.42	1.40/0.70	1.00	2.10
218.00	1.40/2.15	200.00	710.00	0.61	1.80/1.00	1.00	2.80
244.00	1.45/2.45	200.00	780.00	0.74	2.10/1.30	1.00	3.40

Continuación (Cuadro 4.31)

269.00	1.58/2.70	200.00	856.00	0.88	2.70/1.60	1.00	4.30
292.00	1.70/2.85	200.00	910.00	1.10	2.80/2.00	1.00	4.80

Ver. Fig. 4.47

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (C)

CUADRO 4.32

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	700	22	
Campo	800	22	24

Bobinas 19 y 20

$V_{a\text{rms}}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.10				0.00			
15.09	0.80/2.00	20.00	56.00	0.09	0.50/0.70	0.50	0.60
16.50	0.80/1.70	20.00	50.00	0.21	0.80/1.40	0.50	1.10
16.50	0.80/1.70	20.00	50.00	0.27	1.10/2.60	0.50	1.85

Ver. Fig. 4.48 (Prueba de Carga (C) )



CUADRO 4.33

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$V_{a\text{rms}}$ (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.10				0.00			
13.30	1.80/3.10	10.00	49.00	0.05	0.80/1.30	0.10	0.21
12.78	1.82/3.00	10.00	48.20	0.11	0.80/1.20	0.20	0.40
12.00	1.60/2.80	10.00	44.00	0.20	1.40/1.60	0.20	0.60

Ver. Fig. 4.50

(Prueba de Carga (R - L) )

CUADRO 4.34

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
104.00				0.00			
74.30	1.40/5.00	50.00	320.00	0.16	0.90/2.10	0.20	0.60
44.60	0.80/2.40	50.00	160.00	0.24	1.20/2.60	0.20	0.76
20.50	2.50/3.00	20.00	110.00	0.29	1.41/2.61	0.20	0.80

Ver. Fig. 4.51

(Prueba de Carga (R - L) )

CUADRO 4.35

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	200	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 9 y 10

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
15.10				0.00			
15.60	0.90/1.90	20.00	56.00	0.10	1.70/2.70	0.10	0.34
15.60	0.90/1.90	20.00	56.00	0.20	1.80/2.40	0.20	0.84
16.70	1.00/2.00	20.00	60.00	0.42	1.30/1.60	0.50	1.45
19.80	1.20/2.30	20.00	70.00	0.86	2.90/1.10	1.00	4.00

Ver. Fig. 4.52

(Prueba de Carga (R - C) )

CUADRO 4.36

BOBINADO	$N_T$	CONDUCTOR AWG #	Vc.c. (V)
Armadura	1400	22	
Campo	160	15	48

Bobinas 15 y 16

$V_a$ rms (V)	RE	ES	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	REI	ES	$I_{pp}$ (A)
104.00				0.00			
47.90	1.00/2.40	50.00	170.00	0.09	0.65/1.30	0.20	0.39
44.70	1.00/2.40	50.00	170.00	0.16	1.20/2.60	0.20	0.76
39.60	0.80/2.10	50.00	145.00	0.34	0.40/1.15	1.00	1.55
34.90	1.70/3.80	20.00	110.00	0.60	0.60/1.60	1.00	2.20

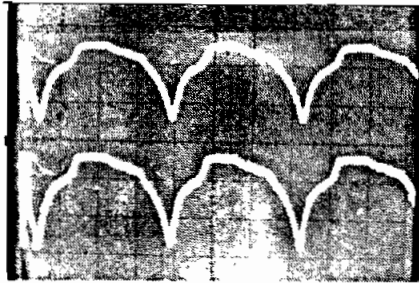
Continuación (Cuadro 4.36)

34.70	2.10/2.80	20.00	98.00	0.89	0.90/2.20	1.00	3.10
-------	-----------	-------	-------	------	-----------	------	------

Ver. Fig. 4.53

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Carga (R - C)

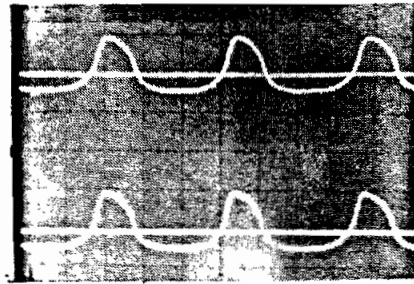
4.3.6.2 FORMAS DE ONDAS DE VOLTAJE Y DE  
CORRIENTE A TERMINALES DE LA AR-  
MADURA (PRUEBAS DE CARGA).



a) Bobinas 9 y 10

$V_a = 9.5 \text{ V}$        $I_a = 0.91 \text{ A}$

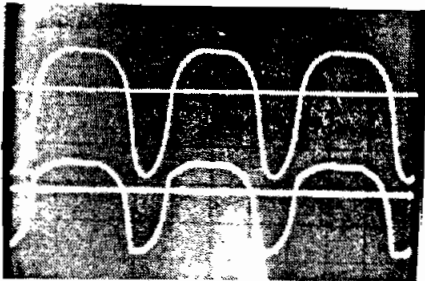
Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 20 \text{ V/div}$ .  
 $V_{e_i} = 2 \text{ A/div}$ .



b) Bobinas 13 y 14

$V_a = 26 \text{ V}$        $I_a = 0.41 \text{ A}$

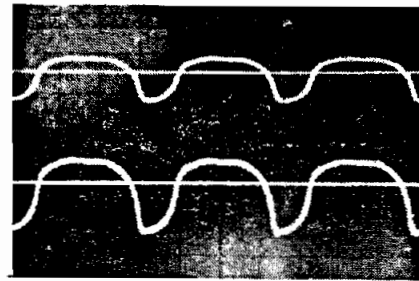
Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 20 \text{ V/div}$ .  
 $V_{e_i} = 1 \text{ A/div}$ .



c) Bobinas 17 y 18

$V_a = 10 \text{ V}$        $I_a = 0.35$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 20 \text{ V/div}$ .  
 $V_{e_i} = 1 \text{ A/div}$ .

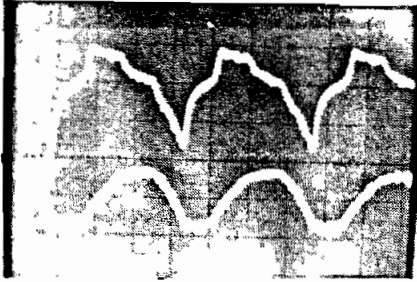


d) Bobinas 19 y 20

$V_a = 5 \text{ V}$        $I_a = 0.51 \text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 5 \text{ V/div}$ .  
 $V_{e_i} = 1 \text{ A/div}$ .

Fig. 4.56 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura . Con carga resistiva.



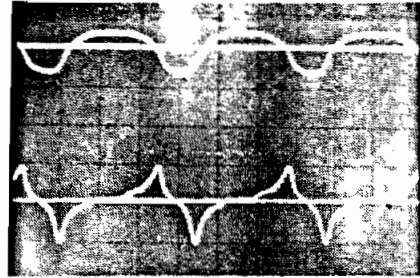
a) Bobinas 9 y 10

$V_a = 13.70$

$I_a = 0.25$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_{e_i} = 0.5\text{A/div}$ .

$V_{e_v} = 20\text{V/div}$ .



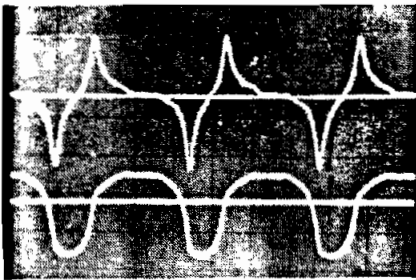
b) Bobinas 13 y 14

$V_a = 27\text{ V}$

$I_a = 0.30\text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 50\text{V/div}$ .

$V_{e_i} = 1\text{A/div}$ .



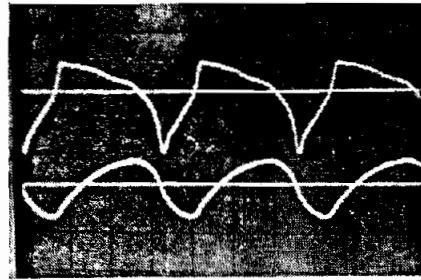
c) Bobinas 17 y 18

$V_a = 26\text{ V}$

$I_a = 0.33\text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 50\text{V/div}$ .

$V_{e_i} = 1\text{A/div}$ .



d) Bobinas 19 y 20

$V_a = 112.5\text{ V}$

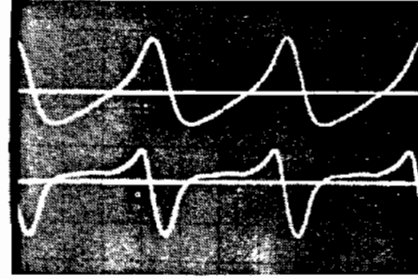
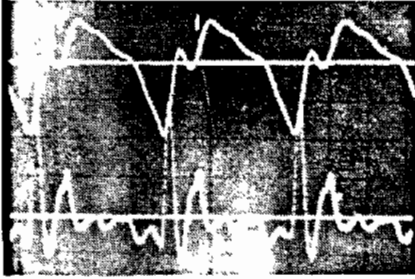
$I_a = 0.19\text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_{e_v} = 20\text{V/div}$ .

$V_{e_i} = 0.5\text{A/div}$ .

Fig. 4.57 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura. Con carga inductiva.





a) Bobinas 9 y 10

$V_a = 17.9 \text{ V.}$        $I_a = 0.45 \text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$ ;  $V_{e_v} = 20\text{V/div.}$

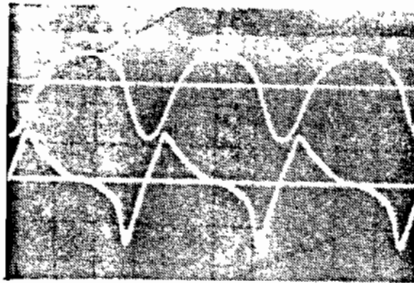
$V_{e_i} = 0.5\text{A/div.}$

b) Bobinas 13 y 14

$V_a = 87 \text{ V.}$        $I_a = 0.85 \text{ A}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$ ;  $V_{e_v} = 50\text{V/div.}$

$V_{e_i} = 2\text{A/div.}$



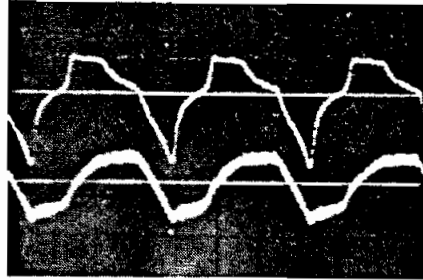
c) Bobinas 19 y 20

$V_a = 15.00 \text{ V}$        $I_a = 0.51 \text{ A.}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$ ;  $V_{e_v} = 20\text{V/div.}$

$V_{e_i} = 1\text{A/div.}$

Fig. 4.58 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura. Con carga capacitiva.



a) Bobinas 9 y 10

$V_a = 13.30V$                        $I_a = 0.05 A$

Escalas:  $H_o = 5ms/div.$

$V_{e_v} = 20 V/div.$

$V_{e_i} = 0.1 A/div.$

Fig. 4.59 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura. Con carga Resistiva - Inductiva.

$$V_{a\text{ rms}} = f(I_{a\text{ rms}}(A))$$

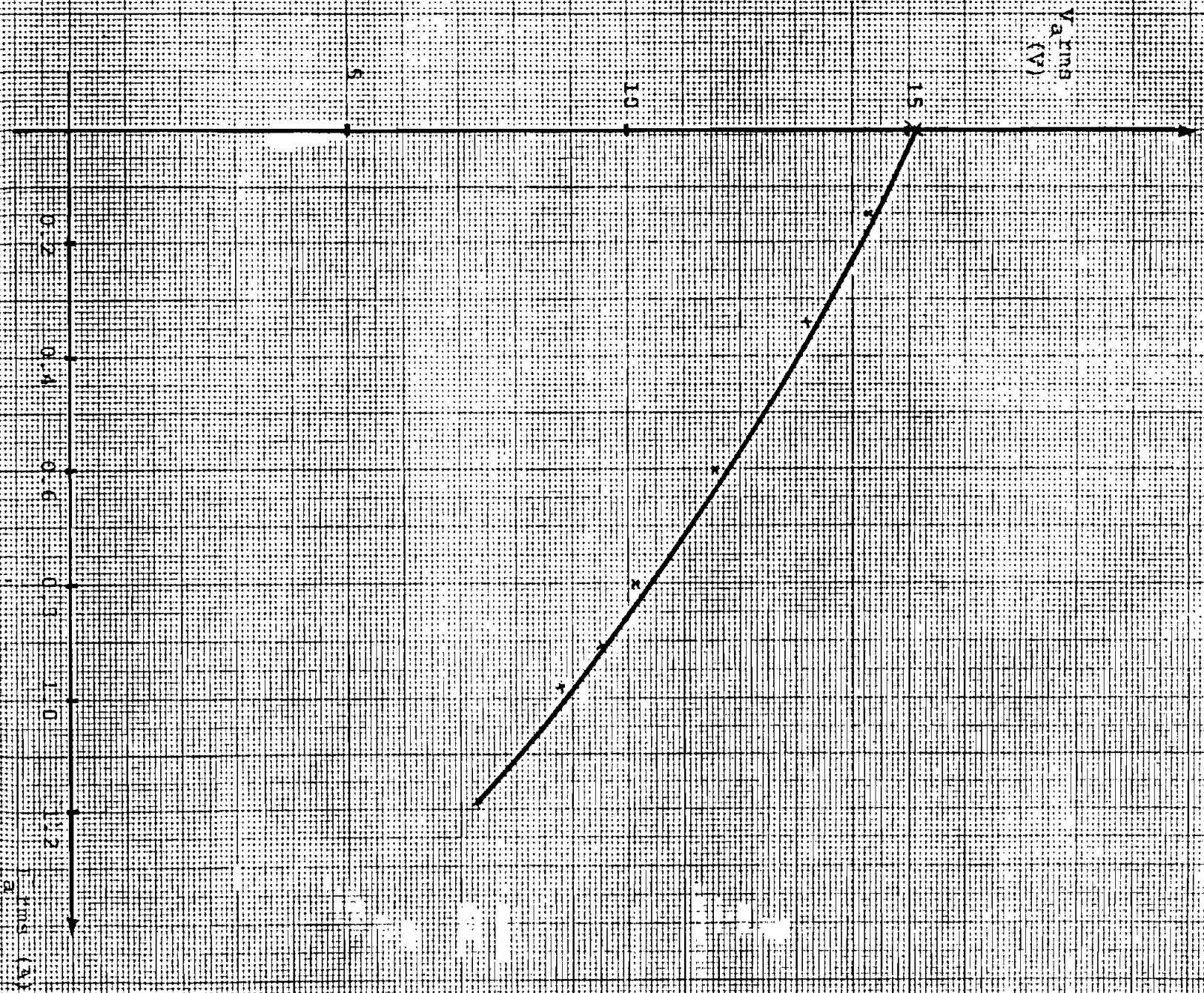


Fig. 4.35. Característica de voltaje de armadura-carga. (R)

$N_p = 200$ ,  $N_g = 160$ , Bobinas 9 y 10)

$$V_{grms} = f(I_{grms}(A))$$

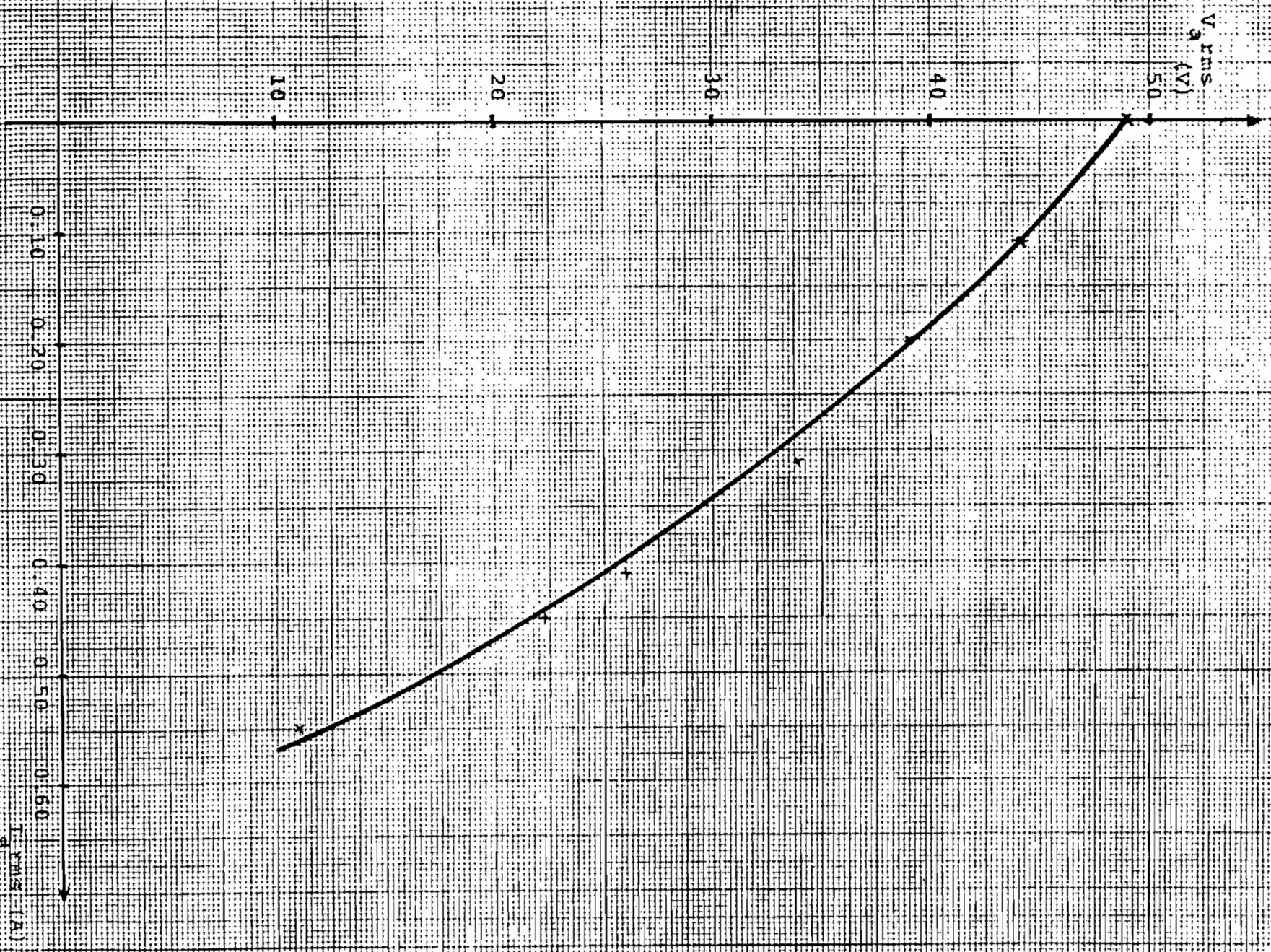


Fig. 4.36. Característica de voltaje de armadura-carga (R)  
( $N_{PB} = 700$ ,  $N_{PC} = 160$ , Bobinas 13 y 14)

$$V_{a,rms} = f(I_{a,rms}(A))$$

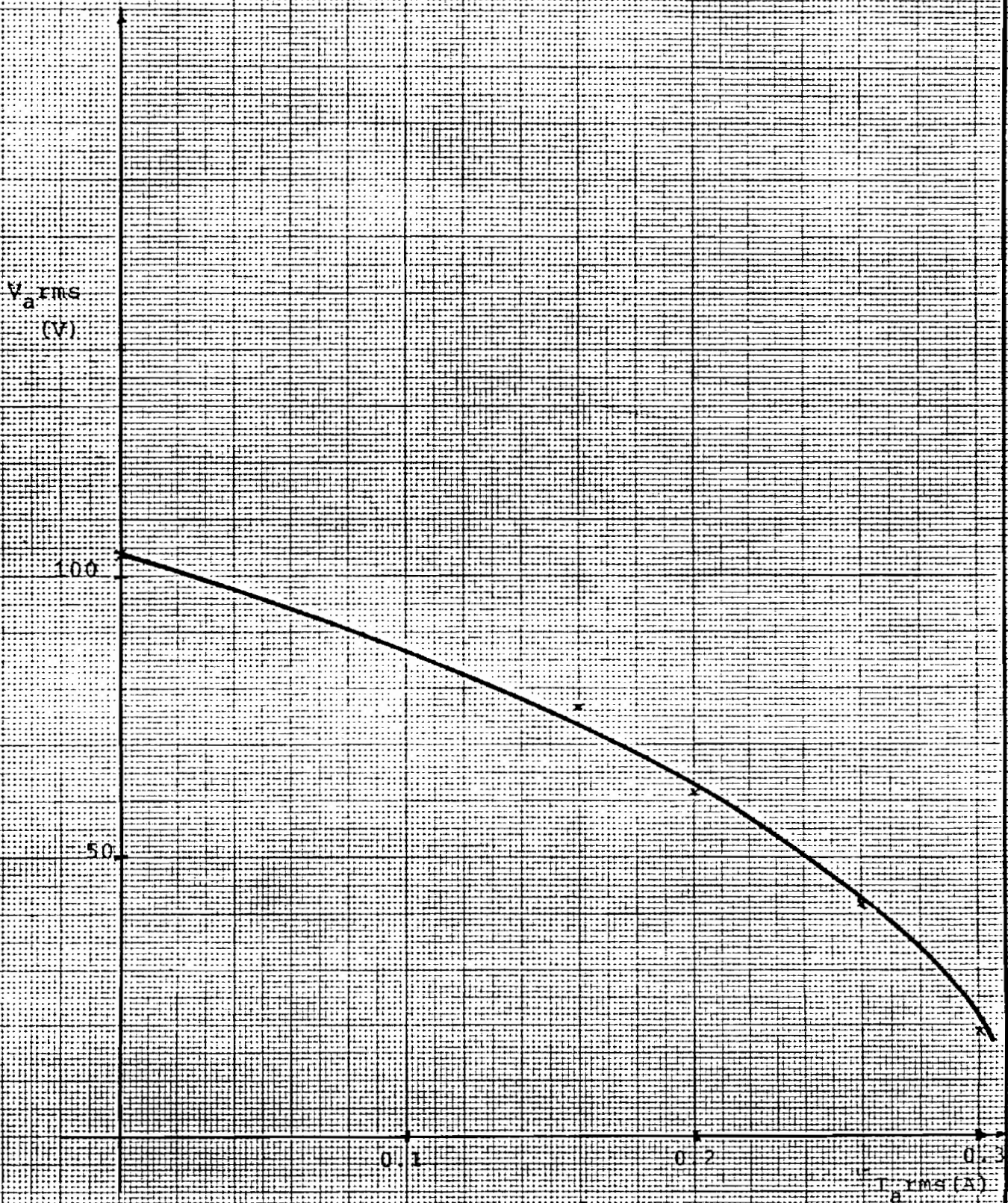


Fig. 4.37. Característica de voltaje de armadura-carga. (R)

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 15 y 16)

$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(\text{A}))$$

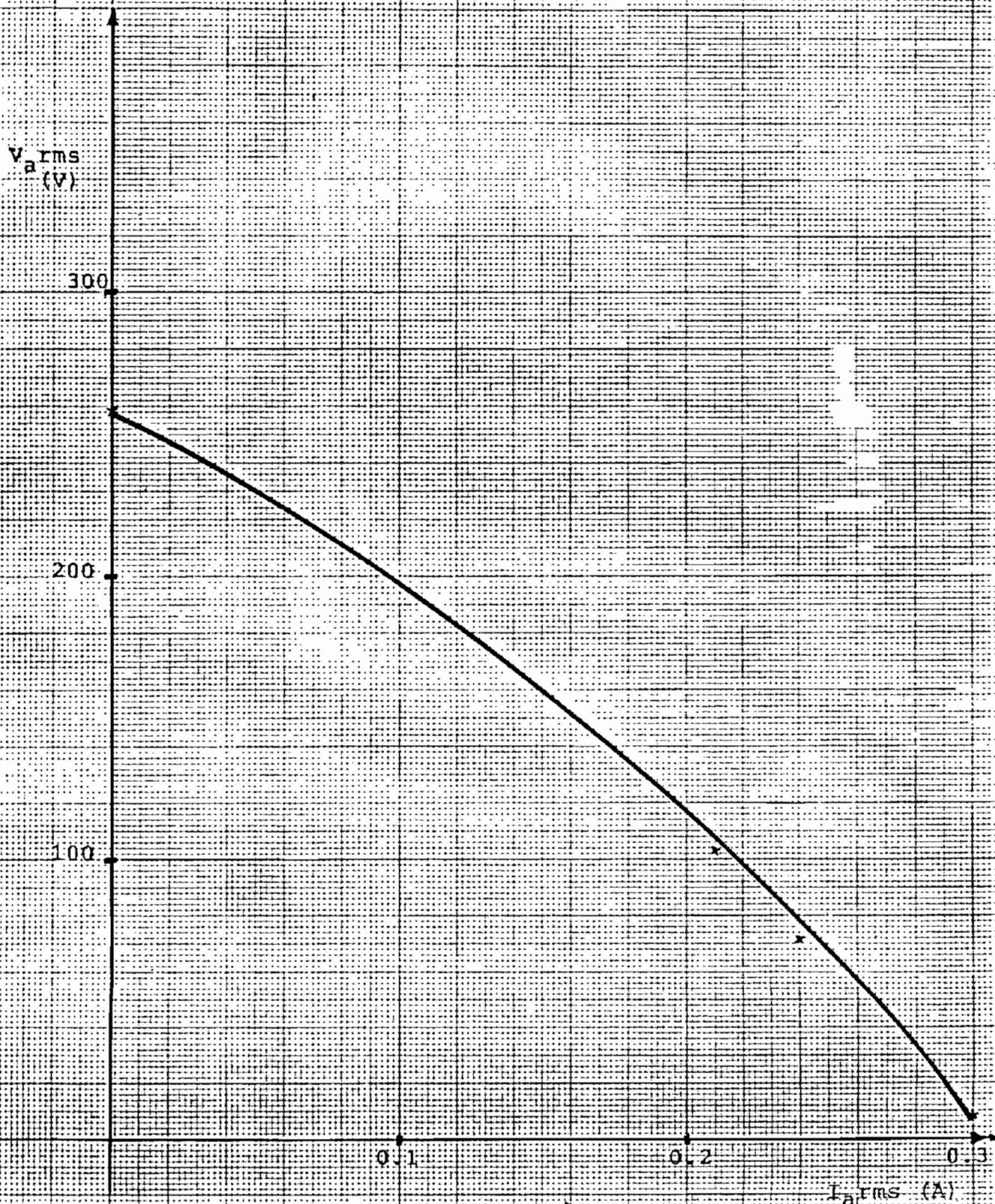


Fig. 4.38. Característica voltaje de armadura-carga. (R)

( $N_{Ta}=3000$ ,  $N_{Tc}=320$ ; Bobinas 17 y 18)

$$V_{a,rms} = f(I_{a,rms}(A))$$

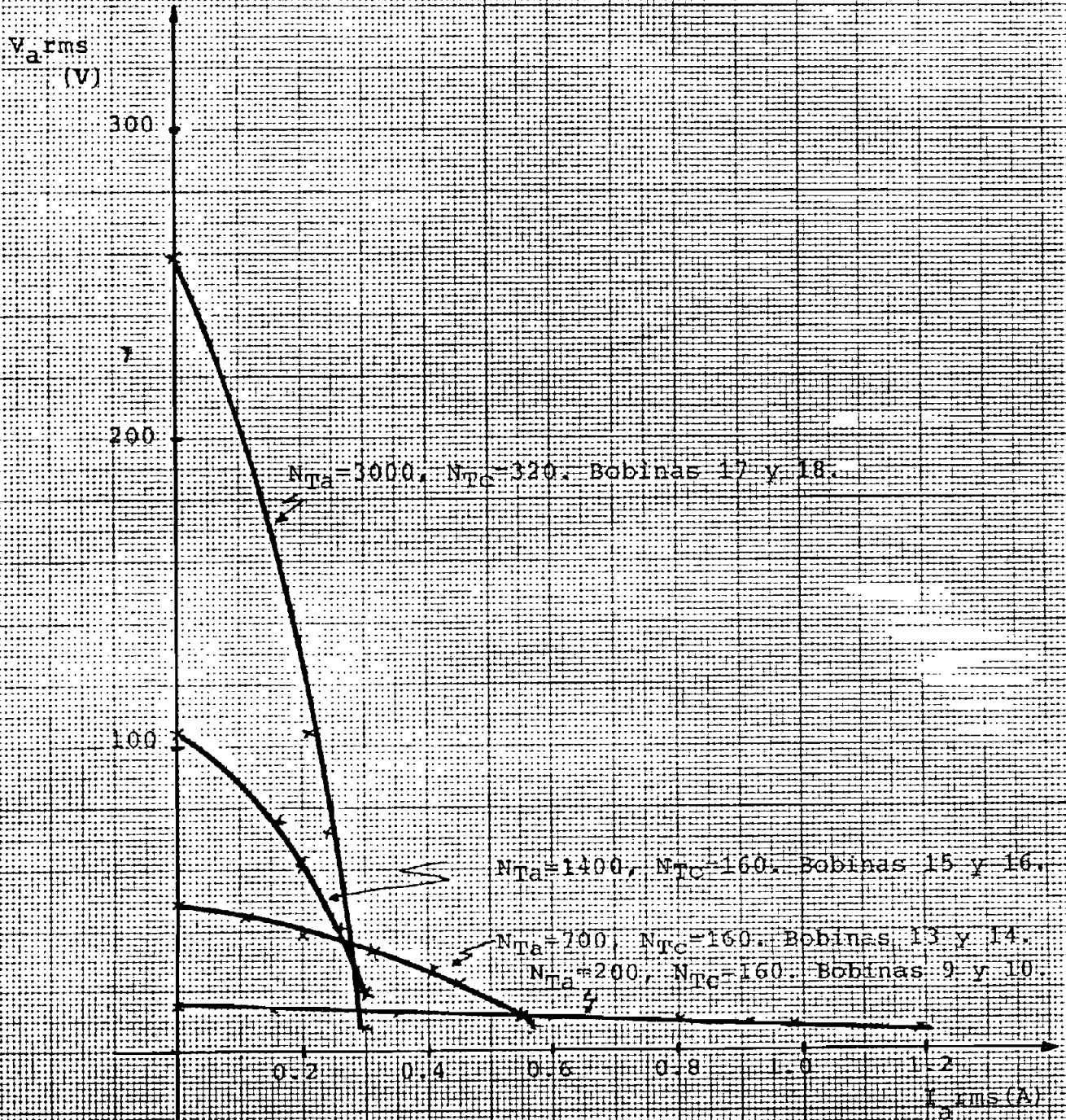


Fig. 4.39. Características voltaje de armadura-carga. (B)

$$V_{0\text{ rms}} = f(I_{0\text{ rms}}(A))$$



Fig. 4. 40. Característica voltaje de armadura-carga. (C.)

(N<sub>1</sub>=200, N<sub>2</sub>=160, Bobinas 9 y 10)



$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(\text{A}))$$

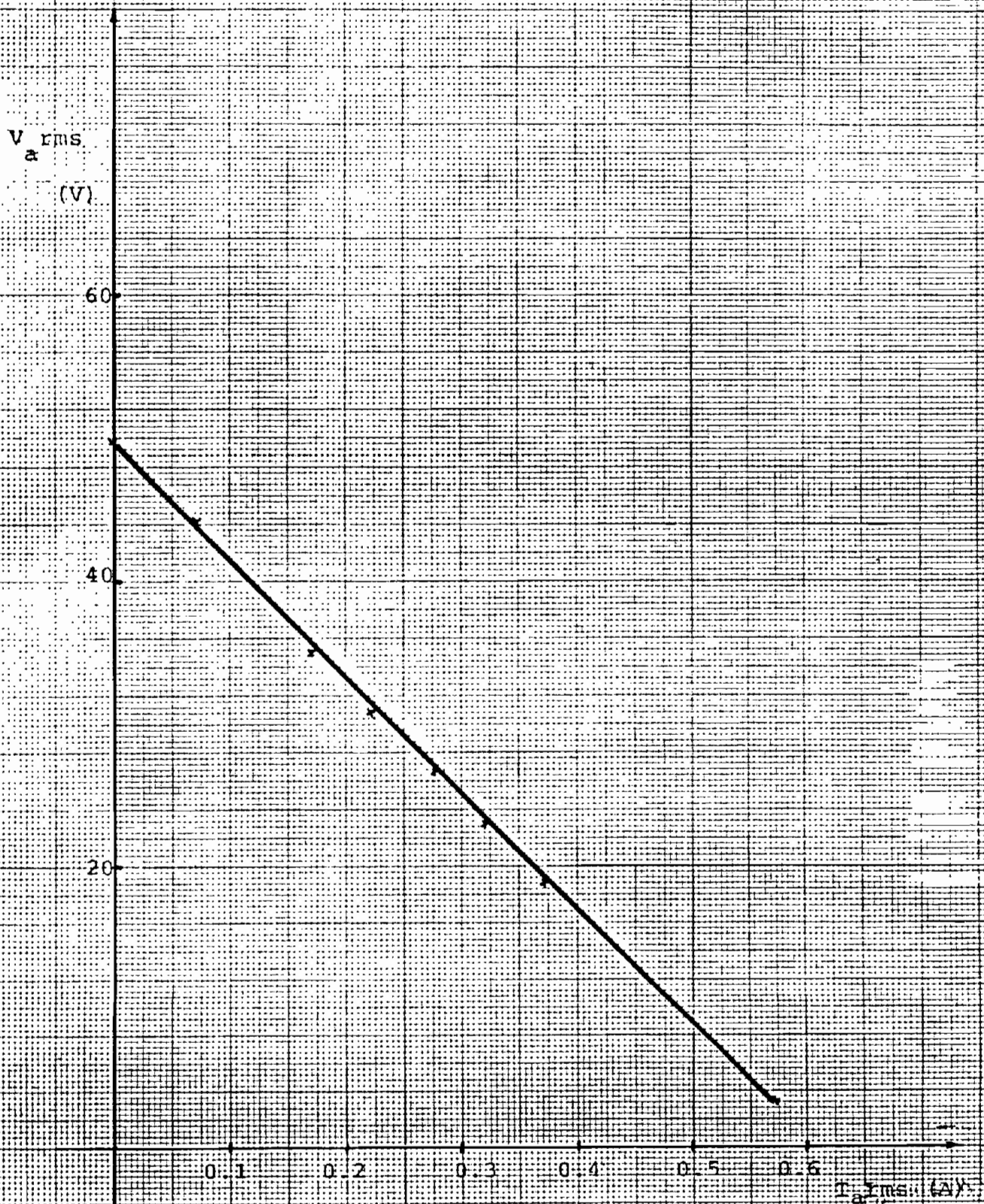


Fig. 4.41. Característica voltaje de armadura-carga. (I)

( $N_{Pa} = 100$ ,  $N_{Pc} = 160$ . Bobinas 13 y 14)

$$V_{a,rms} = f(I_{a,rms}(A))$$

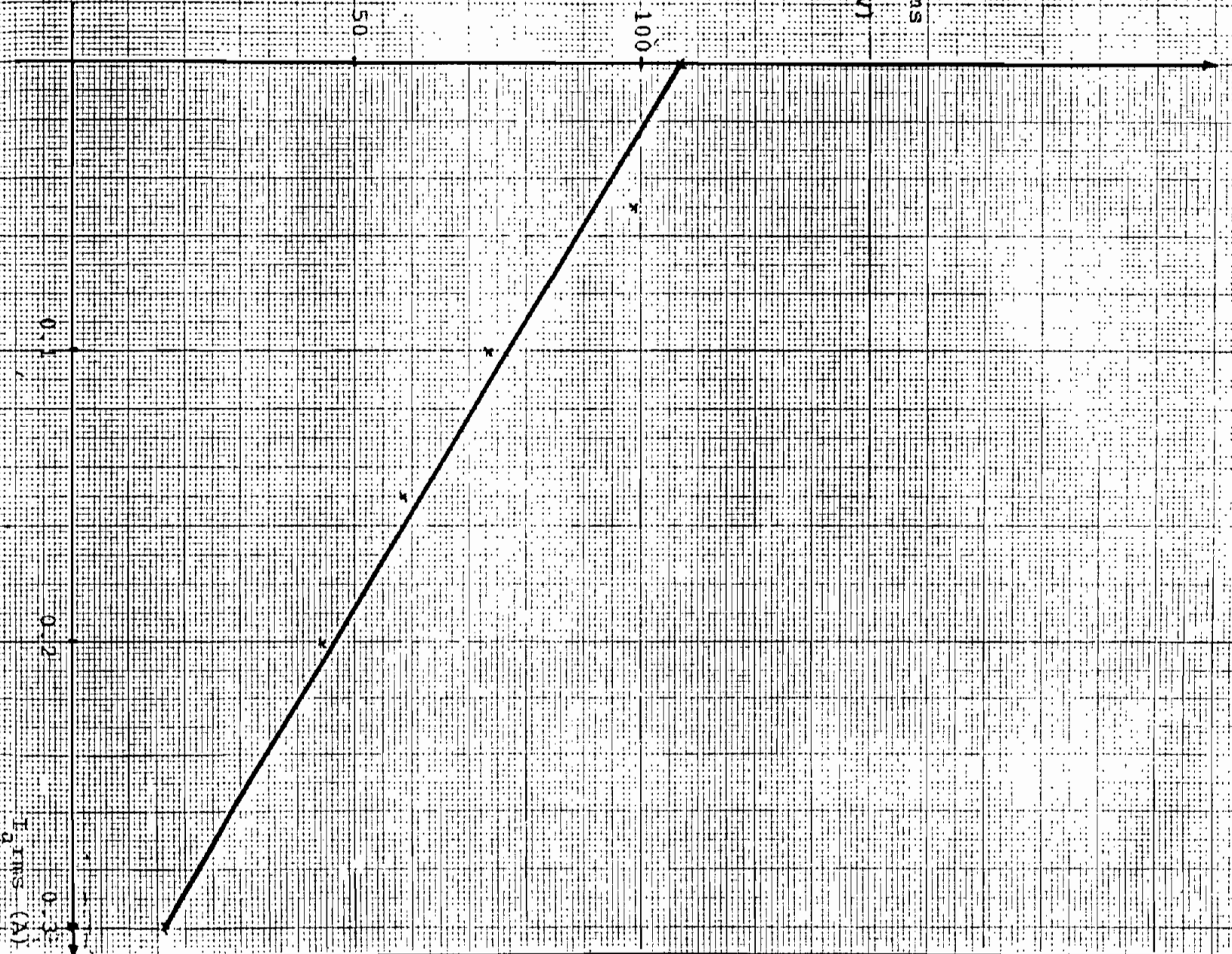


Fig. 4.42. Característica de tensão de armadura-carga. (I)

( $M_p = 1400$ ,  $N_{TC} = 160$ . Bobinas 15 y 16)

$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(A))$$

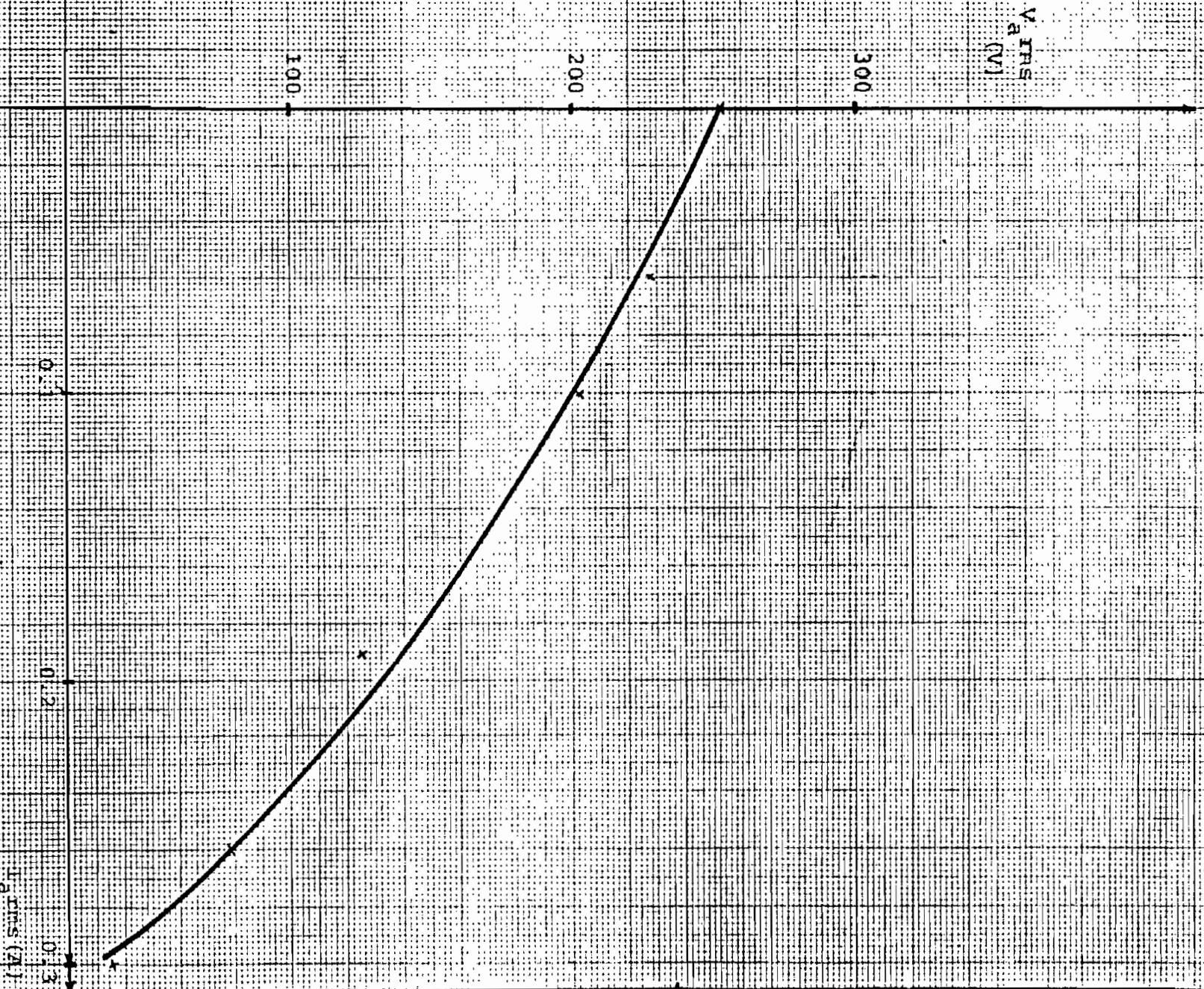


Fig. 4.43. Característica voltaje de armadura-carga. (L)  
( $N_{Pa} = 3000$ ,  $N_{Pc} = 320$ ; Bobinas 17 y 18)

$$V_{rms} = f(I_{rms}(A))$$

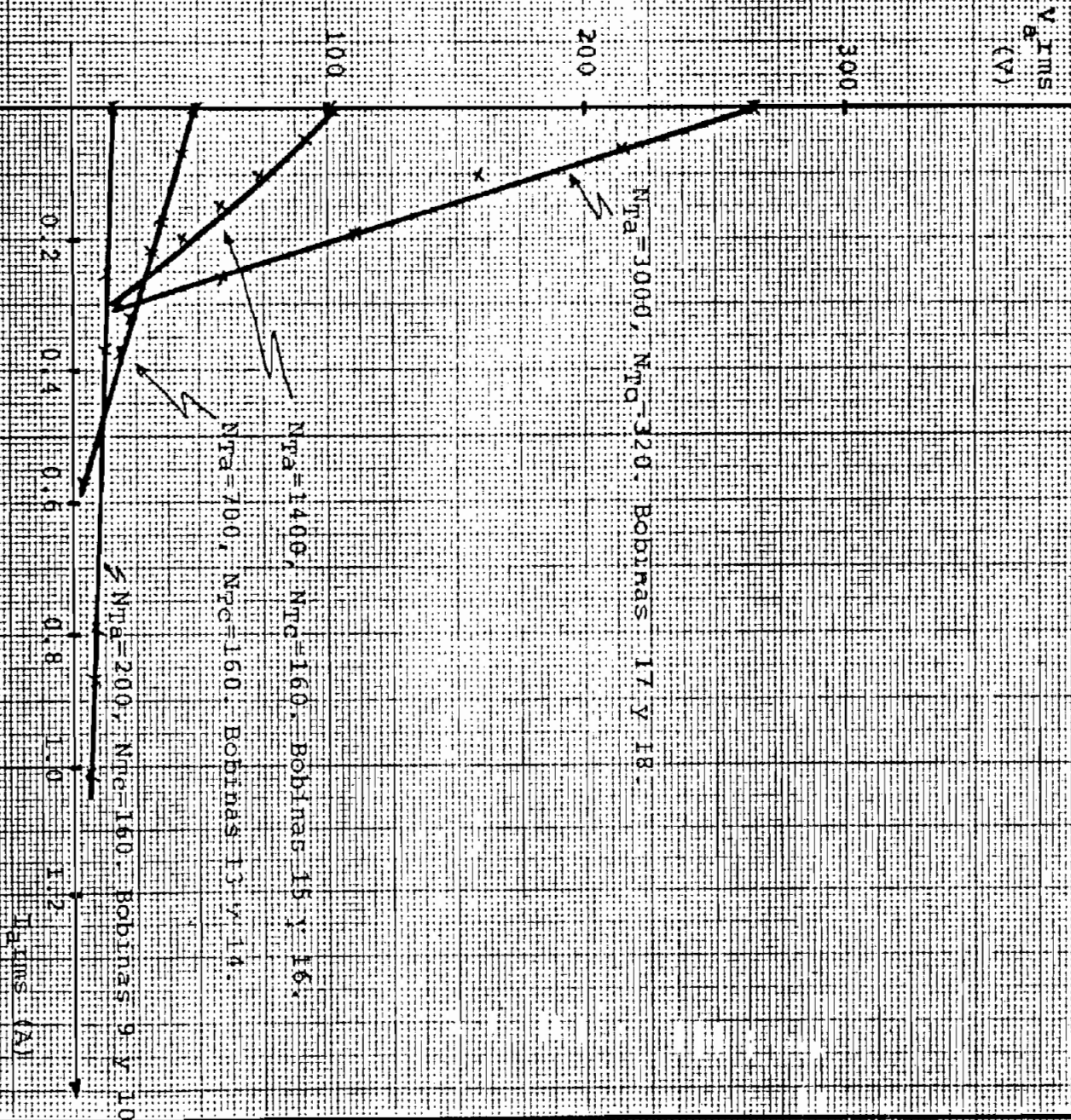


FIG. 4.44. Características voltaje de armadura carga. (A)

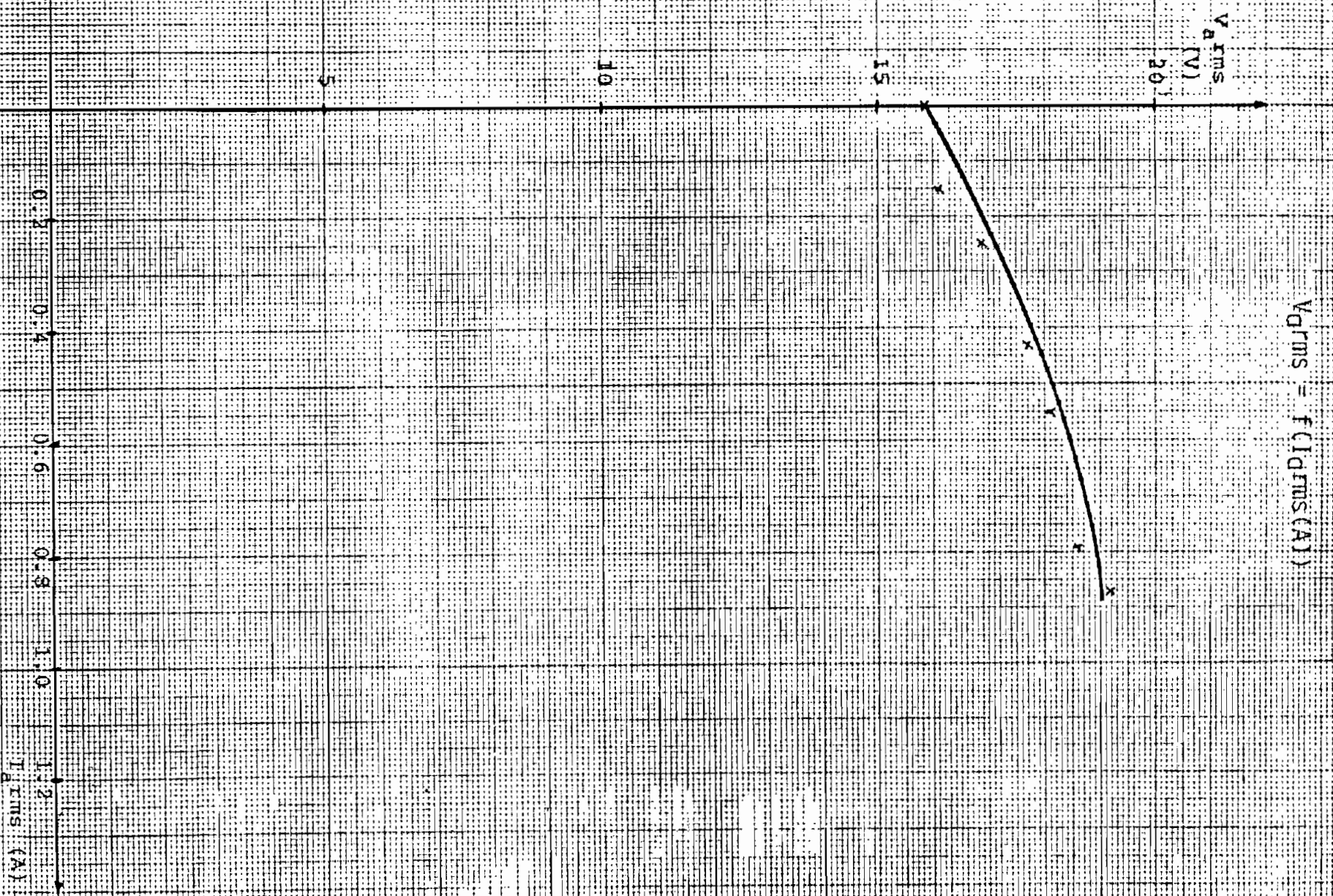


Fig. 4.45: Característica voltaje de armadura-carga. (C)

( $N_{Tp} = 200$ ,  $\tau_{Td} = 160$ , Bobinas 9 y 10)

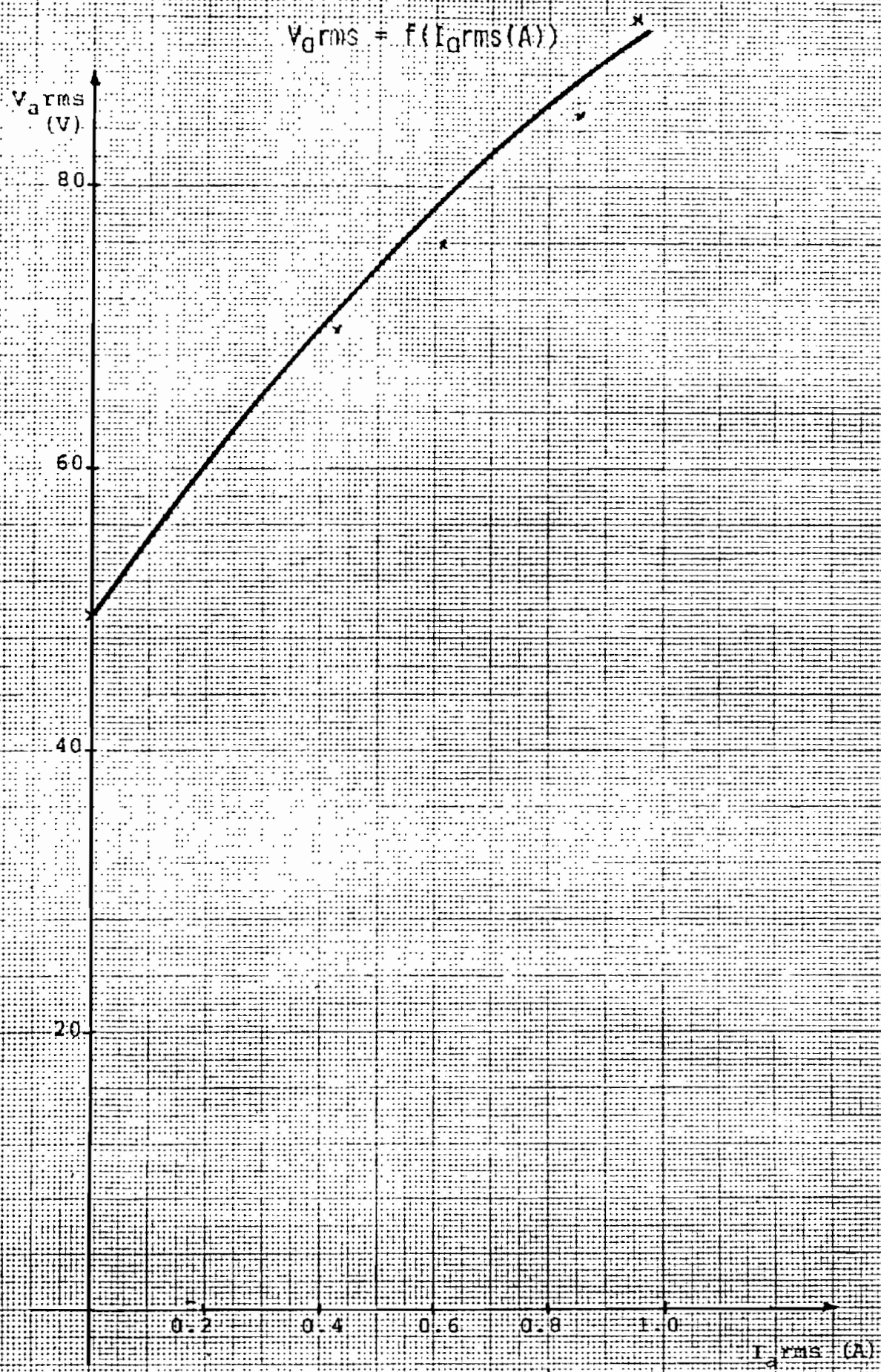


Fig. 4.46. Característica voltaje de armadura-carga. (2)

( $N_{Ta} = 700$ ,  $N_{Tc} = 160$ , Bobinas 13 y 14)

$$V_{a\text{ rms}} = f(I_{a\text{ rms}}(A))$$

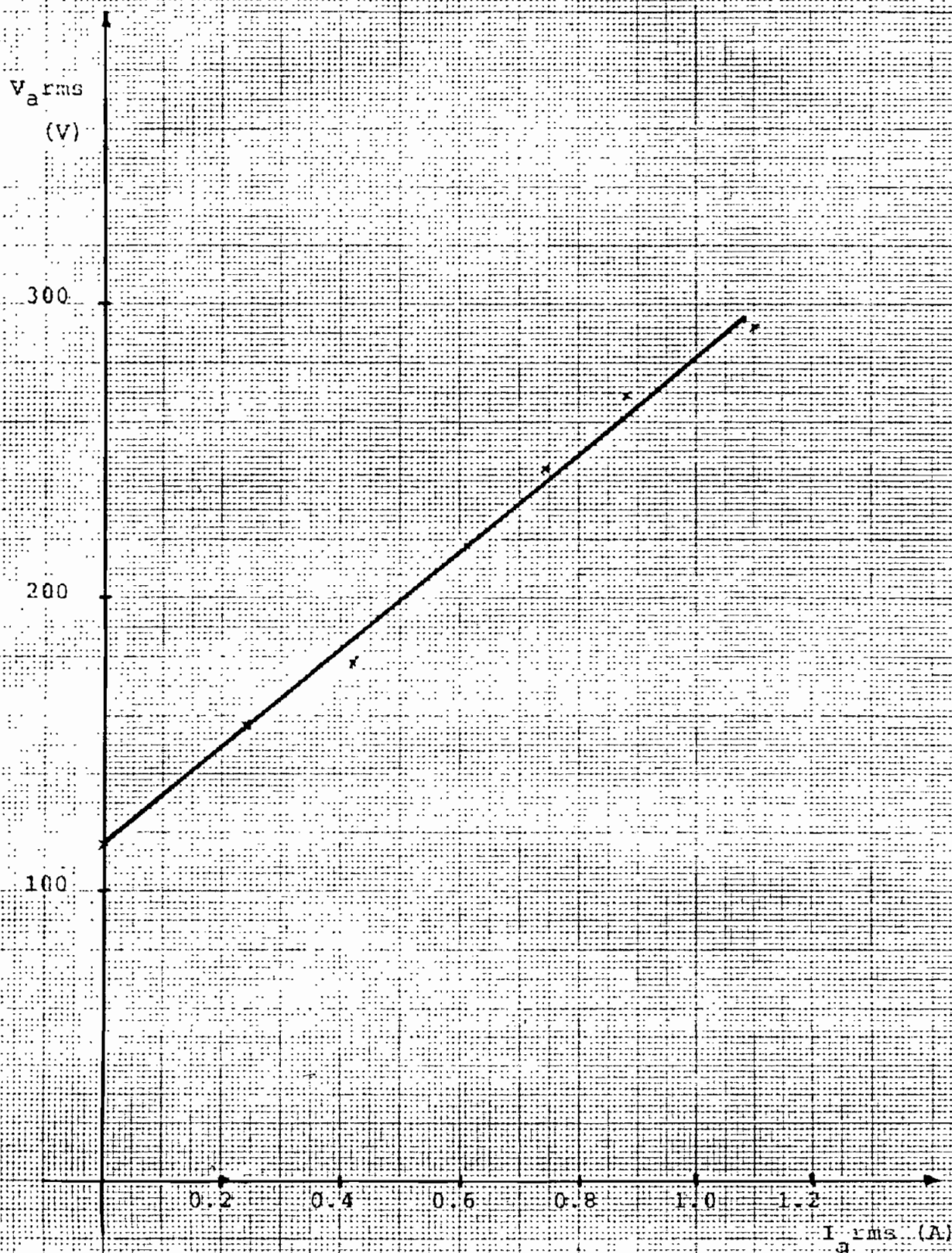


Fig. 4.47. Característica de voltaje de armadura-carga. (C)

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Tc} = 160$ , Bobinas 15 y 16)

$$V_{Drms} = F(I_{Drms}(A))$$

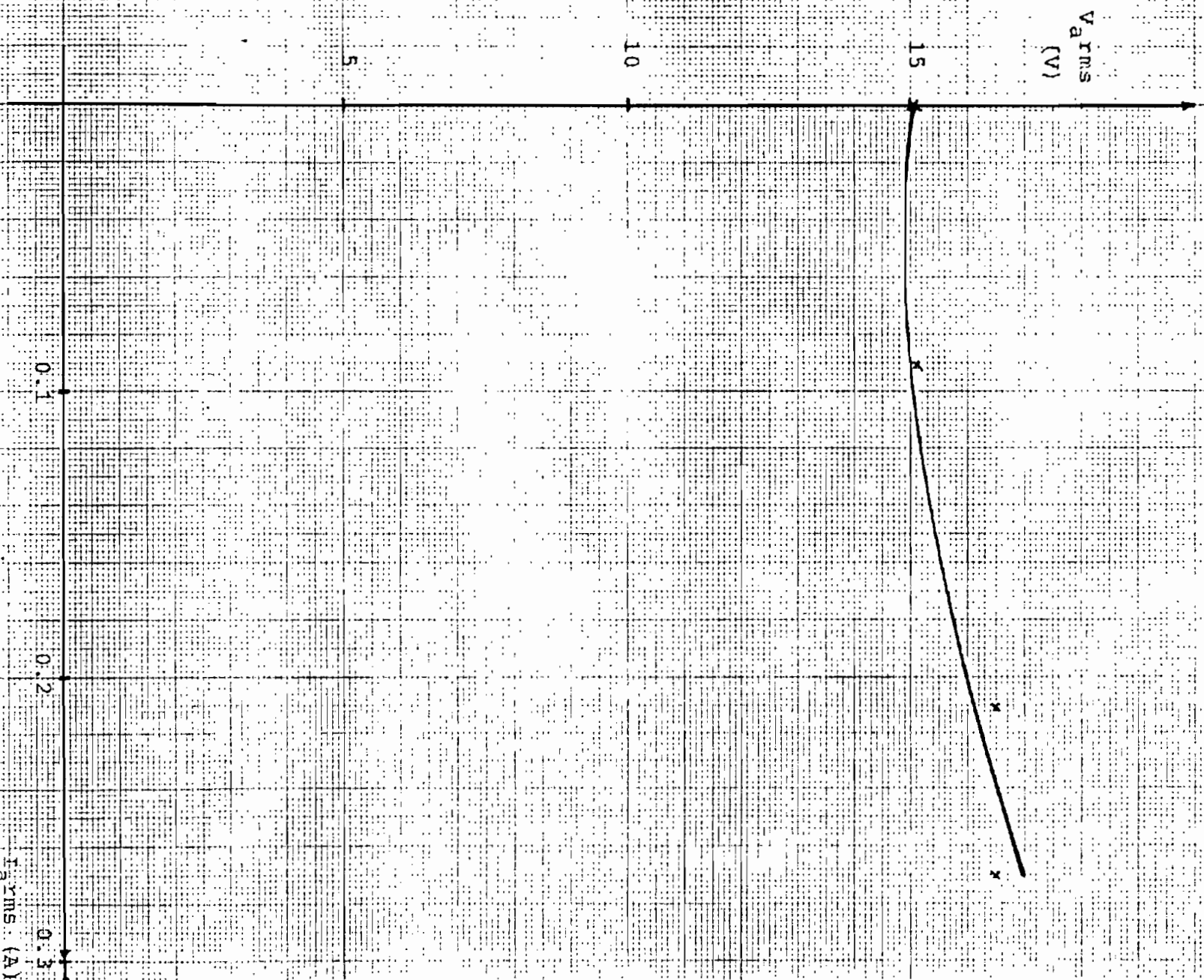


Fig. 4.48: Característica de voltaje de armadura-carga. (C)  
( $N_{1a} = 700$ ,  $R_{1c} = 100$ . Bobinas 19 y 20)



$$V_d \text{ rms} = f(I_d \text{ rms}(A))$$

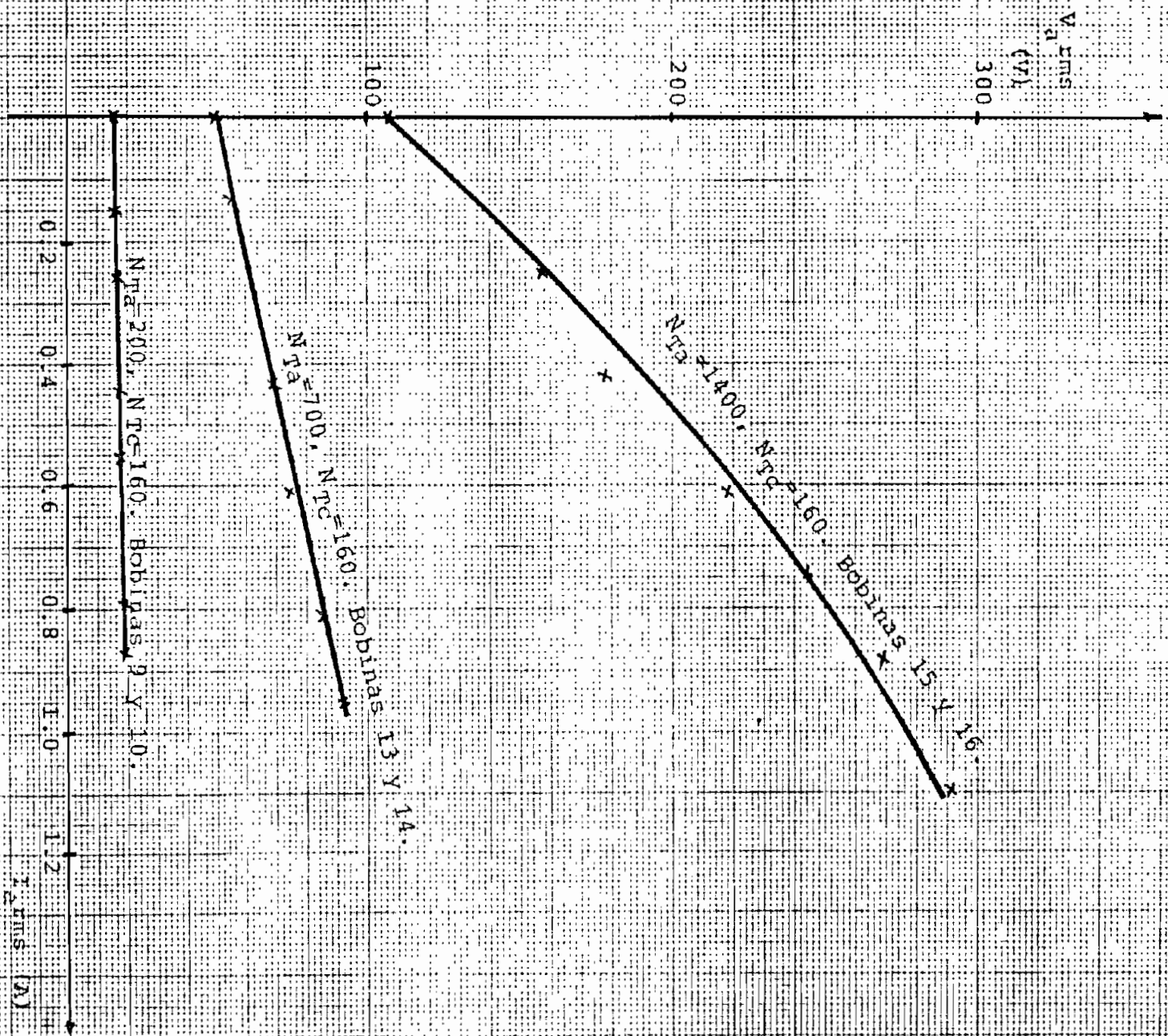


Fig. 4.49. Características voltaje de armadura-carga. (C)

$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(A))$$

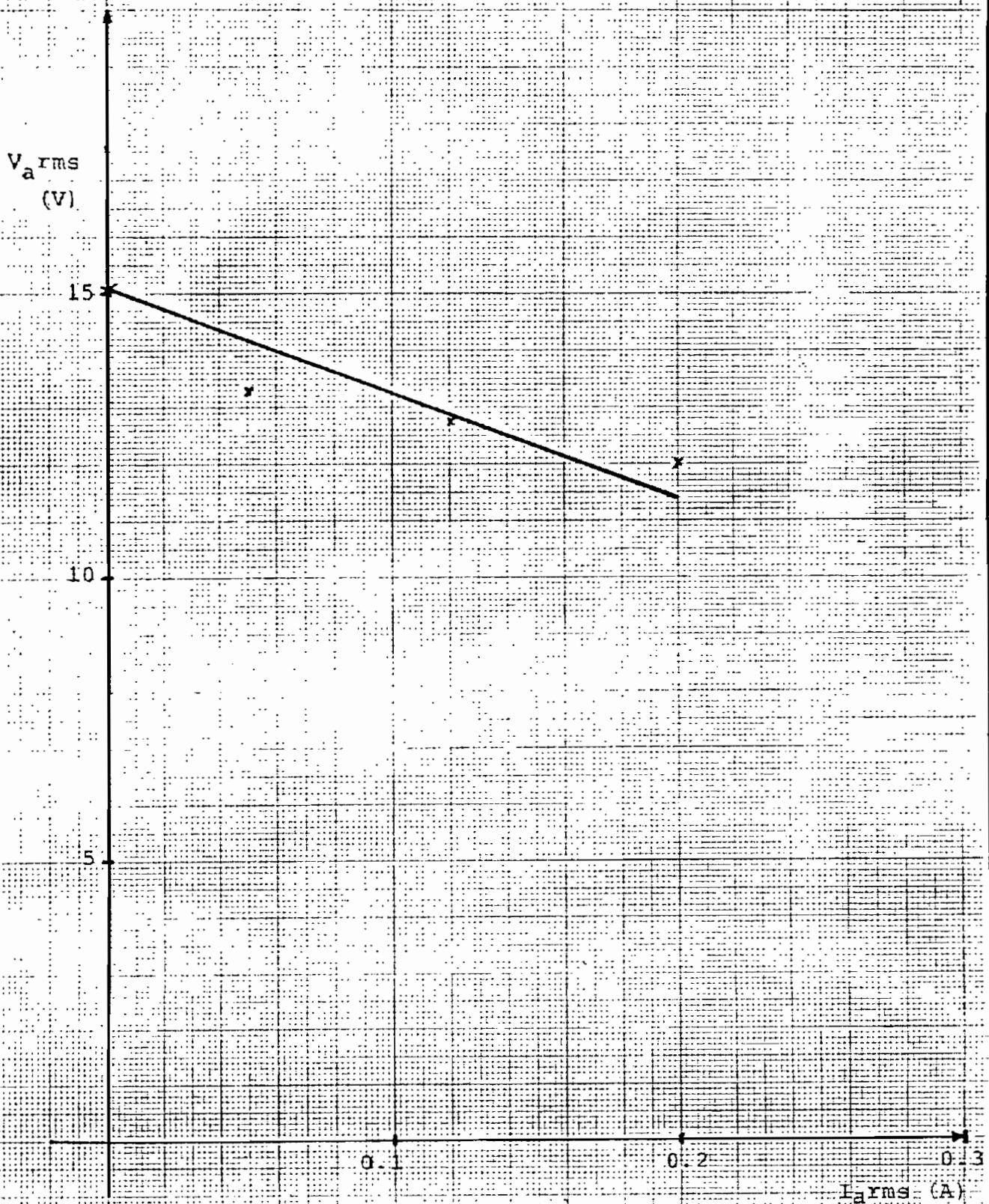


Fig. 4.50. Característica de voltaje de armadura-carga. (R-L)

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 9 y 10)

$$V_{Orms} = f(I_{Orms}(A))$$

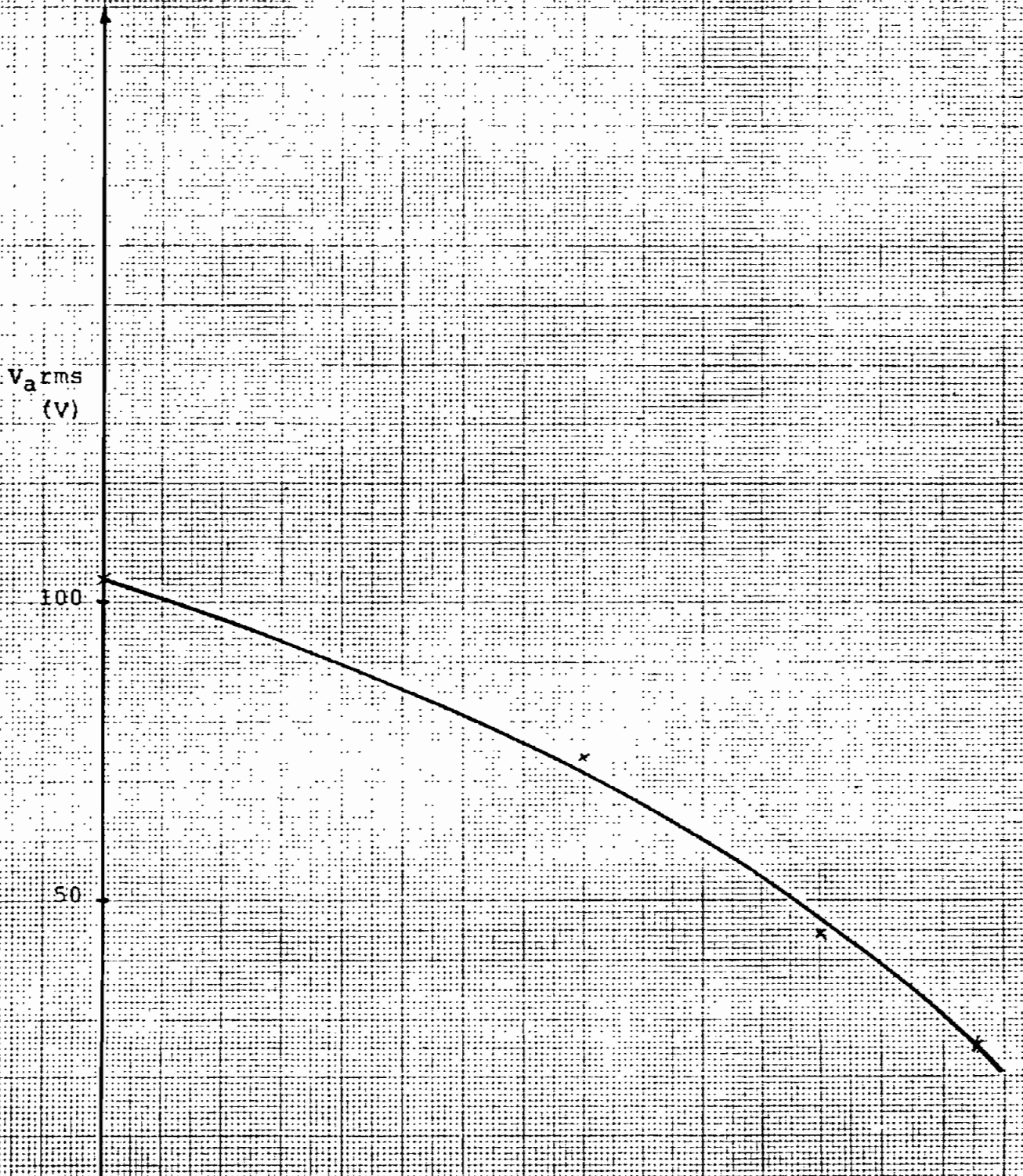


Fig. 4.51. Característica de voltaje de armadura-carga. (P-I)

( $N_{Ta}=1400$ ,  $N_{Tc}=160$ . Bobinas 15 y 16)

$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(\text{A}))$$

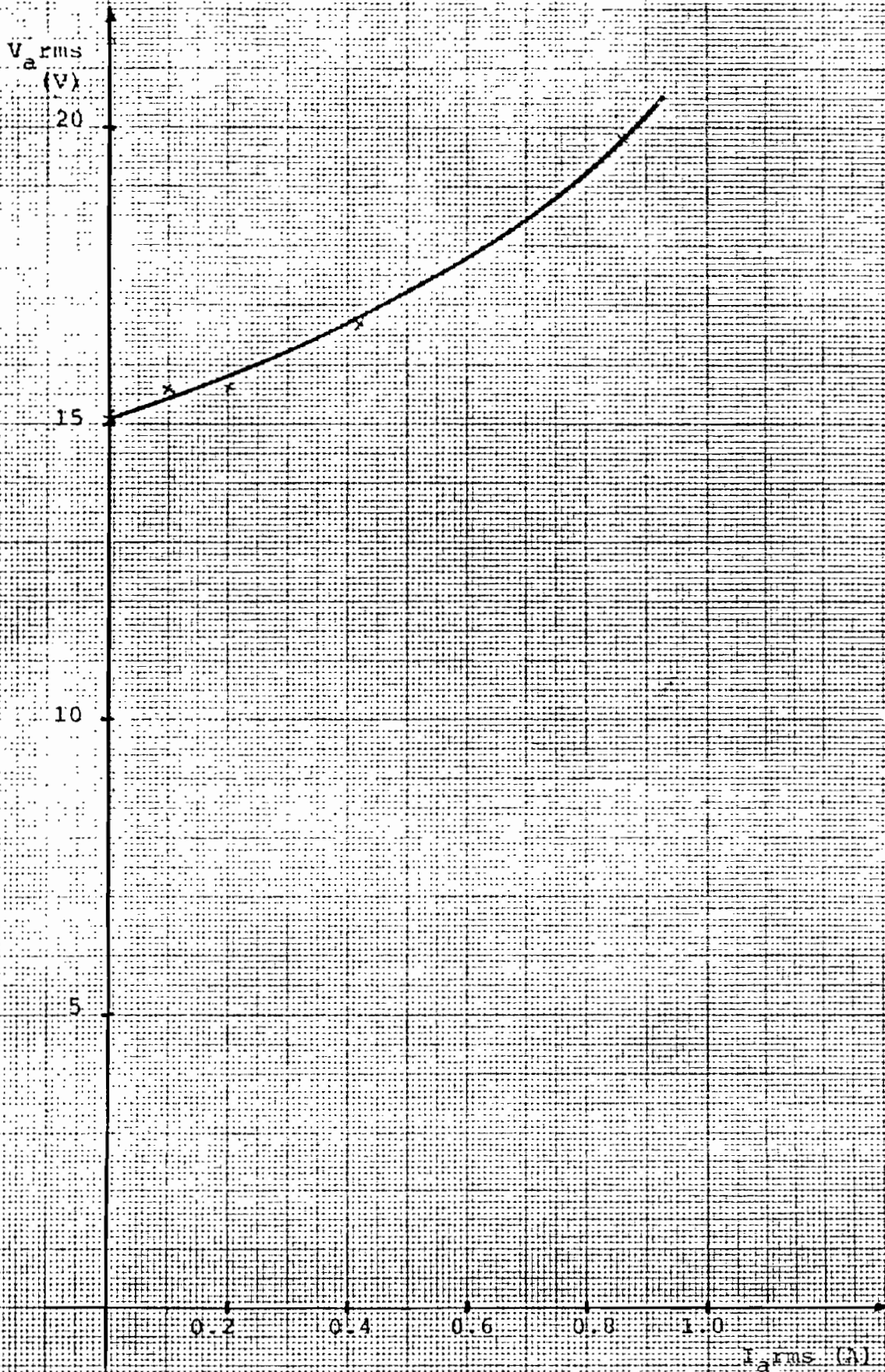


Fig. 4.52. Característica de voltaje de armadura-carga. (R-C)

( $N_{Ta} = 200$ ,  $N_{Tc} = 150$ ; Bobinas 9 y 10)

$$V_{Qrms} = f(I_{Qrms}(A))$$

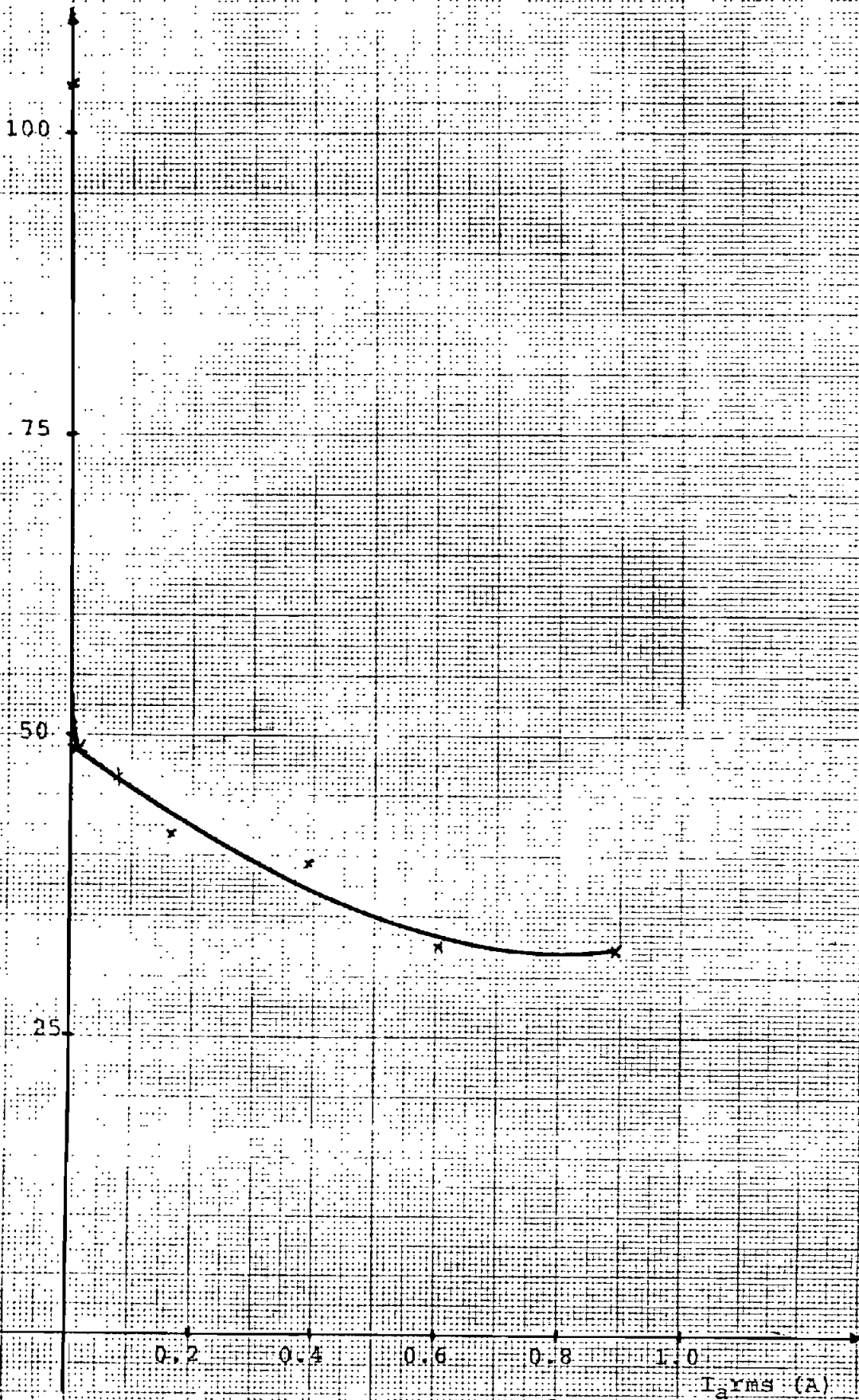


Fig. 4.53. Característica de voltaje de armadura-carga. (R-C)

( $N_{Ta} = 1400$ ,  $N_{Tc} = 160$ . Bobinas 15 y 16)

$$V_{drms} = f(I_{drms}(A))$$



Fig. 4.54. Característica de voltaje de armadura - corriente de armadura.  
 $N_{TA} = 200$ ,  $N_{TC} = 160$ . Bobinas 9 y 10.

$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(A))$$

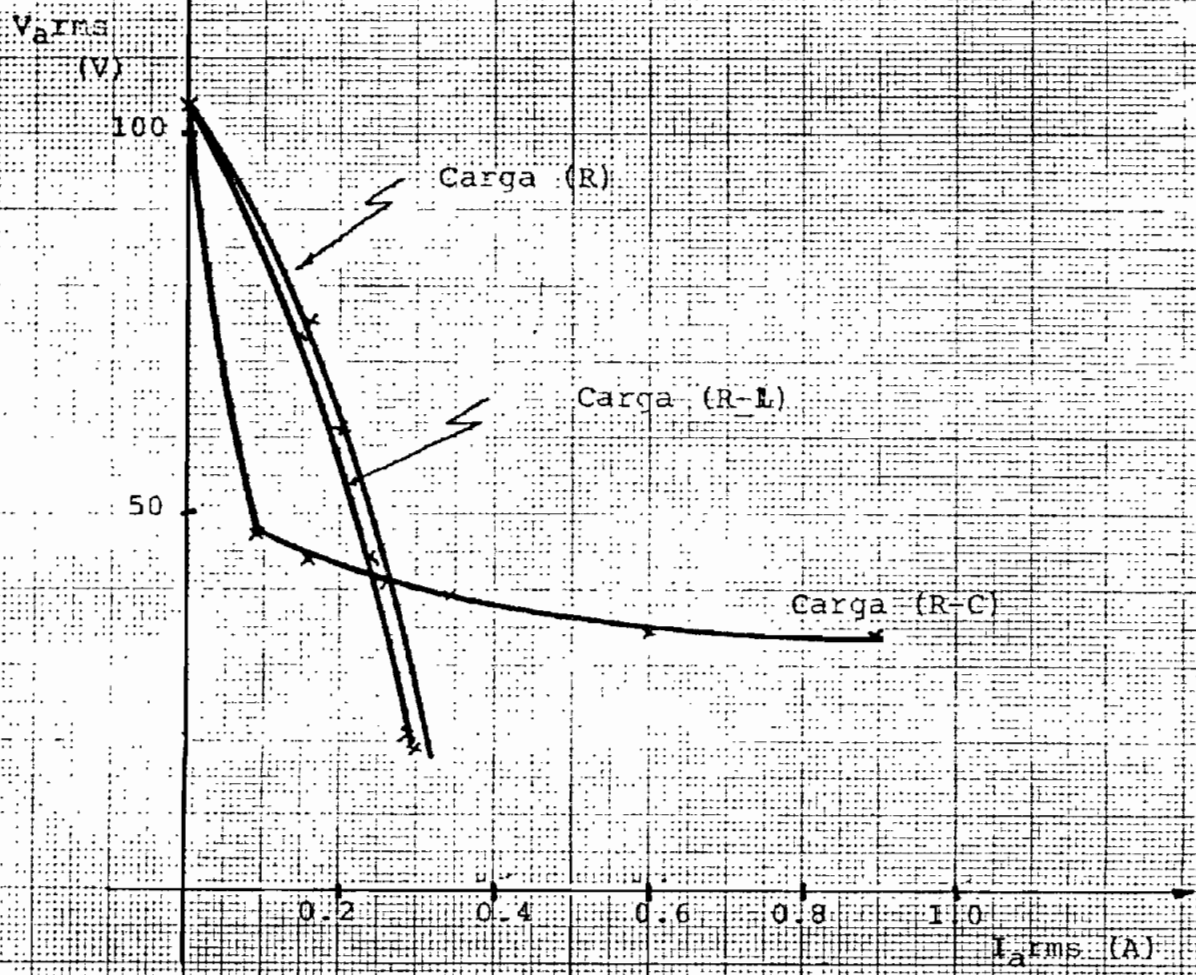


Fig. 4-55. Característica de voltaje de armadura-corriente de armadura.

( $N_{ra}=1400$ ,  $N_{rc}=160$ . Bobinas 15 y 16)

Las pruebas de carga, se las considera como las más importantes, ya que al construir un generador el propósito va a ser el funcionar bajo carga ( resistiva, inductiva, capacitiva y una combinación entre éstas ).

Las curvas características, voltaje generado en la armadura en función de la corriente de armadura constatan que existe una gran influencia de la carga, como se puede apreciar en las figuras 4.35 a 4.55.

Se comprobó que en carga resistiva y en carga inductiva existe una caída de voltaje frente a la carga, y en carga capacitiva una subida de voltaje. Para estos dos casos el número de espiras de los bobinados tienen su influencia; es decir, a mayor número de espiras el efecto es mayor y viceversa.

Por la presencia de estas variaciones de voltaje frente a cargas, este tipo de generador tendrá una mala regulación, que constituye una desventaja en el uso convencional.

La gran desigualdad de voltaje frente a la carga depende de la reacción de inducido ( punto analizado en el Cp. 1).

En la carga capacitiva el efecto de reacción de inducido da una acción de flujo magnetizante, ocasionando una regulación de voltaje negativa. En cargas resistivas e in-



ductiva el efecto de reacción de inducido da una acción de flujo desmagnetizante, en la inductiva este efecto es mayor; dan una regulación positiva.

En las cargas resistiva-inductiva y resistiva-capacitiva el efecto de reacción de inducido va a depender de cual de las cargas es más dominante es decir, si la resistiva o la inductiva o su vez si la resistiva o la capacitiva.

Las formas de onda son diferentes para cada tipo de carga como se puede apreciar en las figuras 4.56 a 4.59 . Su estudio en cuanto a forma, no se realiza en esta tesis por lo que se recomienda realizar una investigación posterior que abarque este tema.

En la figura 4.39 estan dibujadas las curvas características, voltaje de armadura-carga para el caso de carga resistiva, en la figura 4.44 para carga inductiva, en la figura 4.49 para carga capacitiva; para poder visualizar mejor las caídas de voltaje en los diferentes bobinados.

En la figura 4.54 se ha juntado las curvas características para los bobinados 9 y 10, para tres tipos de carga y lo mismo en la digura 4.55 pero, para los bobinados 15 y 16.

#### 4.3.6.4 Regulación de voltaje

Los valores de regulación de voltaje se presentan en el cuadro 4.37 (en tanto por ciento)

Se presenta la regulación de voltaje de los cuatro bobinados mas representativos.

CUADRO 4.37

BOBINAS	RESISTIVA <sup>o</sup>	INDUCTIVA	CAPACITIVA
9 y 10	58.95	64.89	-17.19
13 y 14	88.46	87.07	-41.43
15 y 16	149.40	139.17	-60.22
17 y 18	259.70	354.62	

Se puede observar en este cuadro que la regulación en este generador, la regulación es mala, pero para fines de estudio ; investigación y en usos específicos es importante dentro de la ingeniería, con lo que respecta a su análisis.

#### 4.3.7 Inductancias propias y mutuas.

- Inductancias Propias.

Armadura

eje directo

$$L_{aa} = \frac{N_a^2}{R_d}$$

eje en cuadratura

$$L_{aa} = \frac{N_a^2}{R_q}$$

Campo

eje directo

$$L_{ff} = \frac{N_f^2}{R_d}$$

eje en cuadratura

$$L_{ff} = \frac{N_f^2}{R_q}$$

Los valores están tabulados en el cuadro 4.38

- Inductancias mutuas

Las inductancias mutuas son función de la posición ( término del que depende el voltaje generado)

$$L_{af} = f(\theta)$$

CUADRO 4.38

	ARMADURA		CAMPO	
	eje directo	eje en cuadratura	eje directo	eje en cuadratura
	$L_{aa}$	$L_{aa}$	$L_{ff}$	$L_{ff}$
	(H)	(H)	(H)	(H)
BOBINAS				
9 y 10	0.0353	0.0014	0.0226	0.0009
11 y 12	0.0353	0.0014	0.0226	0.0009
13 y 14	0.4323	0.0173	0.0226	0.0009
15 y 16	1.7290	0.0692	0.0226	0.0009
17 y 18	7.9394	0.3176	0.0903	0.0036
19 y 20	0.4323	0.0173	0.5646	0.0226

De donde los datos son:

$$g_d = 0.002 \text{ m}$$

$$g_q = 0.050 \text{ m}$$

$$s = (0.036 \times 0.039) \text{ m}^2$$

4.3.8 Efecto en el voltaje generado con la variación del voltaje de campo

Se realizó a corriente de campo nominal y a velocidad nominal (1800 r.p.m.). Los valores de voltaje para cada caso se presentan en el cuadro 4.39.

Los valores del cuadro indican que existe un efecto si el voltaje de campo varía, y es, a mayor voltaje de campo, mayor generación de voltaje de armadura y viceversa. No es detallado este efecto ya que se recomienda un estudio sobre este tópico.

CUADRO 4.39

	Vc.c. (V)	48.00	36.00	24.00	12.00
<b>Bobinas</b>					
9 y 10		16.00	14.50	12.80	11.00
11 y 12		15.80	14.80	13.00	10.80
13 y 14		50.30	46.20	41.30	32.80
<b>15 y 16</b>		105.30	96.80	86.50	68.90
17 y 18		266.80	229.10	199.90	162.20

Ver. Fig. 4.61

CONTIENE: Voltaje de generación a corriente nominal  
con variación del voltaje de campo

$$V_{grms} = f(V_{c.c.}(V))$$

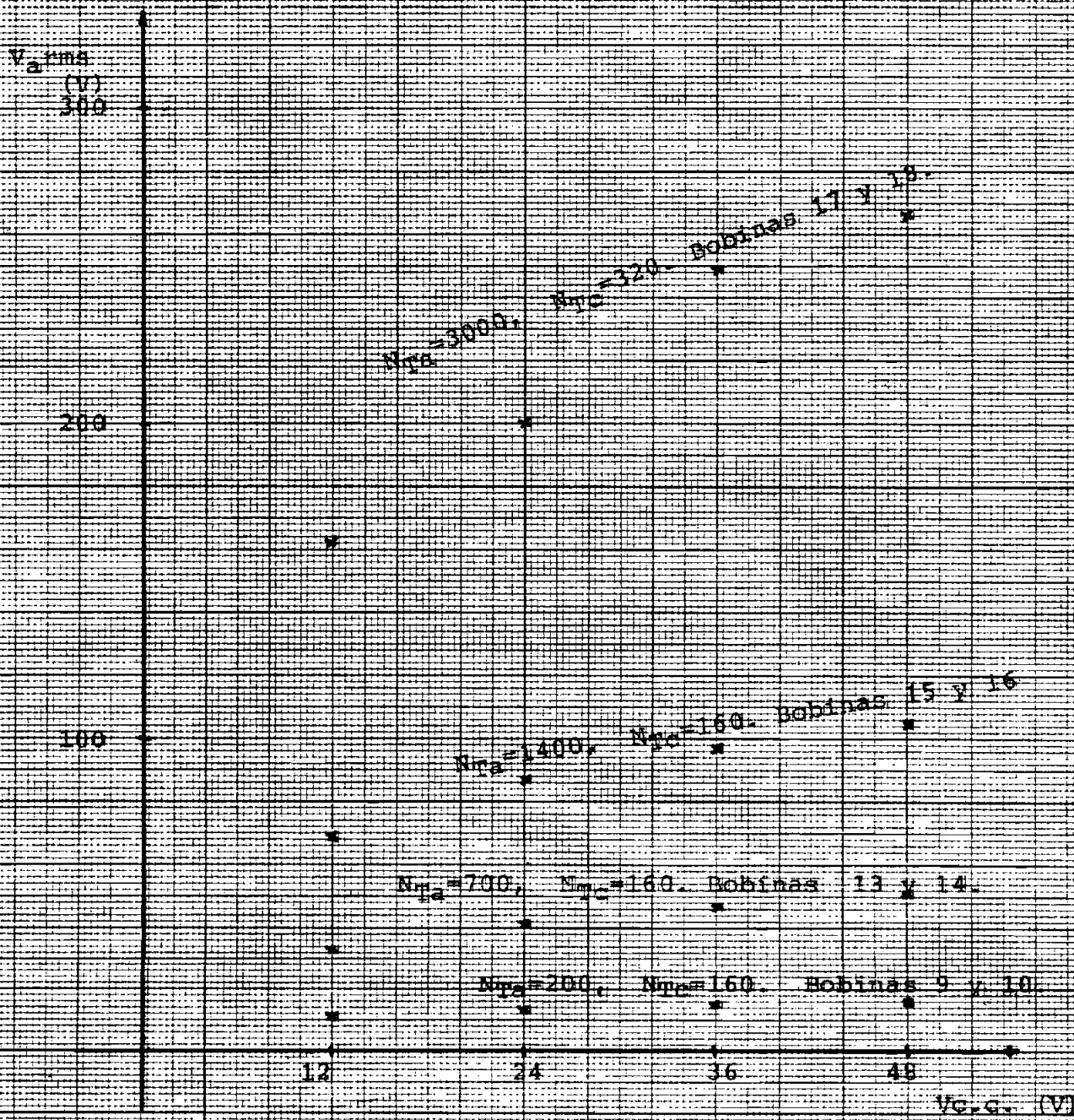


Fig. 4.61. Efecto en el voltaje generado con la variación del voltaje de campo.

#### 4.4. PRUEBAS BIFASICAS

Estas pruebas se realizan con bobinados de armadura y de campo iguales para cada saliencia.

El generador consta de cuatro grupos estator-rotor, por tanto consta de 8 bobinados que formarán la armadura y de 8 bobinados que formarán el campo.

Cada bobina consta de 250 espiras para la armadura y de 80 espiras para el campo.

Para la elección del número de espiras se realizó un análisis en base a los resultados del caso como generador monofásico; se siguieron los siguientes criterios: Que el voltaje de fase con 2 grupos conectados en serie este alrededor de 100 voltios, que la caída de voltaje con carga nominal no llegue a cero.

Se tabulan 3 tipos de cuadros para cada prueba, debido a que existe la posibilidad de poderse tener dos tipos de conexión para el caso bifásico, es decir bifásico con dos grupos estátoricos y bifásico con cuatro grupos estátoricos.

##### 4.4.1' Cantidad de alambre de cobre para las bobinas.

Armadura:  $l_{ae} = 159.45$ ;  $l_a = 39862.80$ ; Peso = 0.26 libras.

Campo;  $l_{ae} = 182.64$ ;  $l_a = 29223$ ; peso = 0.94 libras.

Para los cuatro rotores: 1.1lib. #22; 3.8lib. #15.



#### 4.4.1 Medida de la resistencia

Se utilizan dos métodos:

- Método Voltímetro-Amperímetro
- Método con el ohmetro digital

Los circuitos utilizados para realizar estas medidas son los mismos que para el caso monofásico.

Se toman valores de cada grupo estator-rotor individuales, y también por fase, cuando el caso bifásico está constituido por los cuatro grupos estatóricos.

Los valores de resistencias de los bobinados se tabulan en el cuadro 4.40.

CUADRO 4.40

	M E T O D O			
	VOLTIMETRO - AMPERIMETRO			OHMETRO DIGITAL
	$\text{\textcircled{V}}$ (V)	$\text{\textcircled{A}}$ (A)	$R_{VA}$ ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )
GRUPO ESTATOR-ROTOR				
1	6.00	1.20	5.00	5.40
2	6.00	1.20	5.00	5.20
3	6.20	1.05	5.90	5.30
4	6.20	1.00	6.20	5.60
FASE				
a	6.00	0.60	10.00	10.40
b	6.10	0.60	10.17	10.80
Campo	9.60	4.90	1.96	1.92

NOTA:  $R_{VA} = V/I.$

CUADRO 4.41

	V <sub>pe</sub>
GRUPO	
ESTATOR-ROTOR	
1	4.55
2	4.55
3	5.37
4	5.64
FASE	
a	9.10
b	9.25
Campo	9.06

CONTIENE: Voltaje máximo permisible de las bobinas en el caso bifásico.

#### 4.4.1.2 Voltaje de campo

El voltaje de campo utilizado es de 48 voltios debido a que con éste se obtiene un buen rango de corriente de campo, siendo así, una ventaja durante las pruebas, especialmente para la prueba de vacío.

Se utiliza una fuente de corriente continua rectificadora, por lo que existirá un rizado el mismo que tendrá efecto en la componente de transformación del voltaje generado.

#### 4.4.2 Prueba de generación de voltaje

Es realizada primeramente si la bobina interna es el campo, y la externa la armadura; los resultados fueron los mismos que para el caso monofásico.

Para cuando el bobinado interno es la armadura, y el bobinado externo el campo están dados sus resultados en los numerales siguientes.

#### 4.4.3 Prueba de vacío

El circuito utilizado es el mismo que para el caso monofásico (fig 4.8)

Se realiza a velocidad nominal y constante, voltaje de campo constante.

Las formas de onda son simétricas. Comparando con las formas de onda monofásicas éstas, tanto con el magnetismo residual como con alimentación de corriente de campo son las esperadas del análisis teórico. Con este tipo de conexión se ha mejorado la concatenación de flujo en la armadura.

Esta prueba a más de lo antes dicho, se puede observar en los cuadros que el voltaje de armadura es la suma de los voltajes parciales, lo que comprueba lo dicho en la teoría.

##### 4.4.3.1 cuadros de valores

CUADRO 4.42

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)
2.00	20.48	64.00
2.50	26.00	80.00
3.00	30.48	96.00
3.50	35.60	104.00
4.00	40.70	120.00
4.60	46.60	136.00
5.00	50.10	140.00
6.00	59.30	180.00
7.00	68.70	200.00

Ver. Fig. 4.62

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de vacío.

Grupo estator - rotor 1, 2, 3 o 4

CUADRO 4.43

$I_f$ (A)	$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)
2.00	40.50	120.00
2.50	51.50	150.00
3.00	61.20	170.00
3.50	71.20	200.00
4.00	80.20	230.00
4.60	92.10	260.00
5.00	99.40	280.00
6.00	117.00	335.00
7.00	135.00	380.00

Ver. Fig. 4.63

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de vacío.  
Grupos estator - rotor. En serie  
1 y 2 o 3 y 4



CUADRO 4.44

$I_f$ (A)	$V_a$ rms (V)	$V_{pp}$ (V)
2.00	67.00	220.00
2.50	83.30	280.00
3.00	98.80	330.00
3.50	115.30	380.00
4.00	131.50	440.00
4.60	150.50	500.00
5.00	162.70	540.00
6.00	192.00	640.00
7.00	219.50	740.00

Ver. Fig. 4.64

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de vacío.

Grupos estator - rotor. En serie

1, 2, 3 y 4

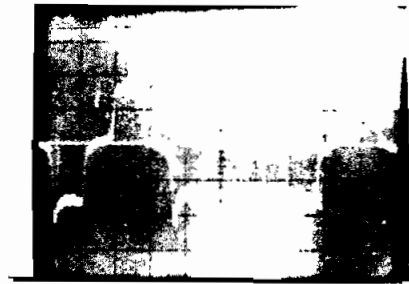


a) Grupo estator 1,2,3o4

$V_a = 0.57 \text{ v.}$

$V_f = 0.00 \text{ V}$        $I_f = 0.00 \text{ A}$

Escala:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 0.5 \text{ V/div}$ .



b) Grupos estator-rotor  
1 y 2 o 3 y 4

$V_a = 1.23 \text{ V.}$

$V_f = 0.00 \text{ V}$        $I_f = 0.00 \text{ A}$

Escala:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 1 \text{ V/div}$ .



c) Grupos estator-rotor

1, 2, 3 y 4

$V_a = 1.43 \text{ V.}$

$V_f = 0.00 \text{ v}$        $I_f = 0.00 \text{ A}$

Escala:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 1 \text{ V/div}$ .



d) Grupo estator-rotor

1, 2, 3 o 4

$V_a = 46.60 \text{ V.}$

$V_f = 48.00 \text{ V.}$        $I_f = 4.62 \text{ A}$

Escala:  $H_o = 5 \text{ ms/div}$ ;  $V_e = 50 \text{ V/div}$ .

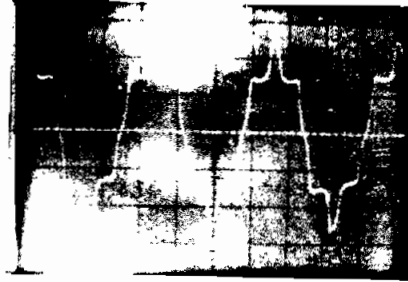


e) Grupos estator - rotor  
1y2 o 3y4

$V_a = 92.10 \text{ V.}$

$V_f = 48.00 \text{ V} \quad I_f = 4.62 \text{ A}$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 50\text{V/div.}$

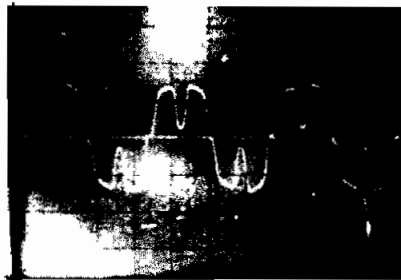


f) Grupos estator - rotor  
1, 2, 3 y 4

$V_a = 150.50 \text{ V.}$

$V_f = 48.00 \text{ V.} \quad I_f = 4.62 \text{ A.}$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 100\text{V/div.}$



g) Grupos estator - rotor  
1, 2, 3 y 4

$V_a = 103.00 \text{ V.}$

$V_f = 48.00 \text{ V.} \quad I_f = 4.62 \text{ A.}$

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div}$ ;  $V_e = 100.00\text{V/div.}$

Fig. 4.66 Formas de onda del voltaje de armadura en la prueba vacío.

$$V_{grms} = f(I_f(A))$$

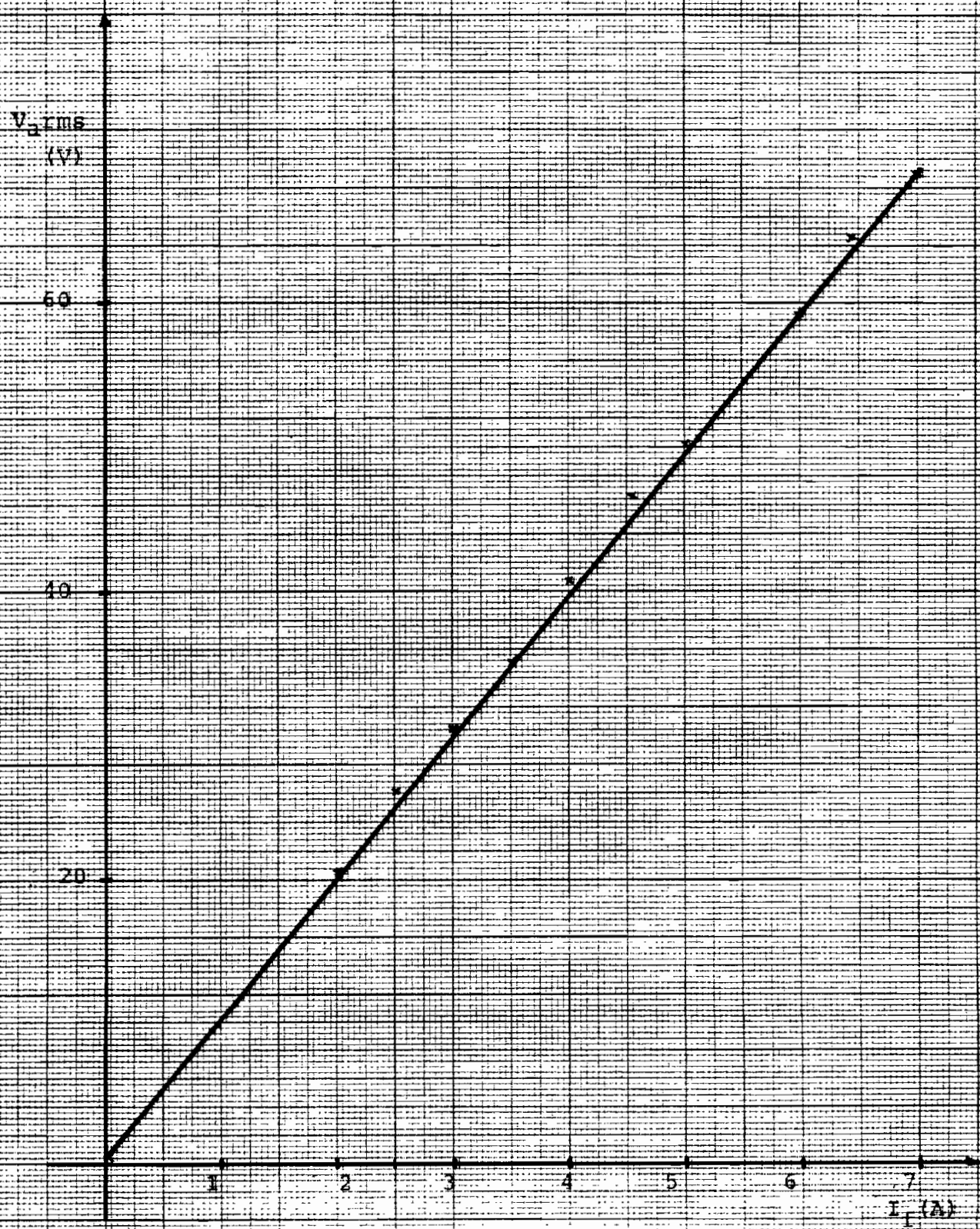


Fig. 4.62. Característica de vacío.

(Grupo -stator-rotor 1,2,3 o 4)

$$V_{a\text{ RMS}} = f(I_f(\text{A}))$$

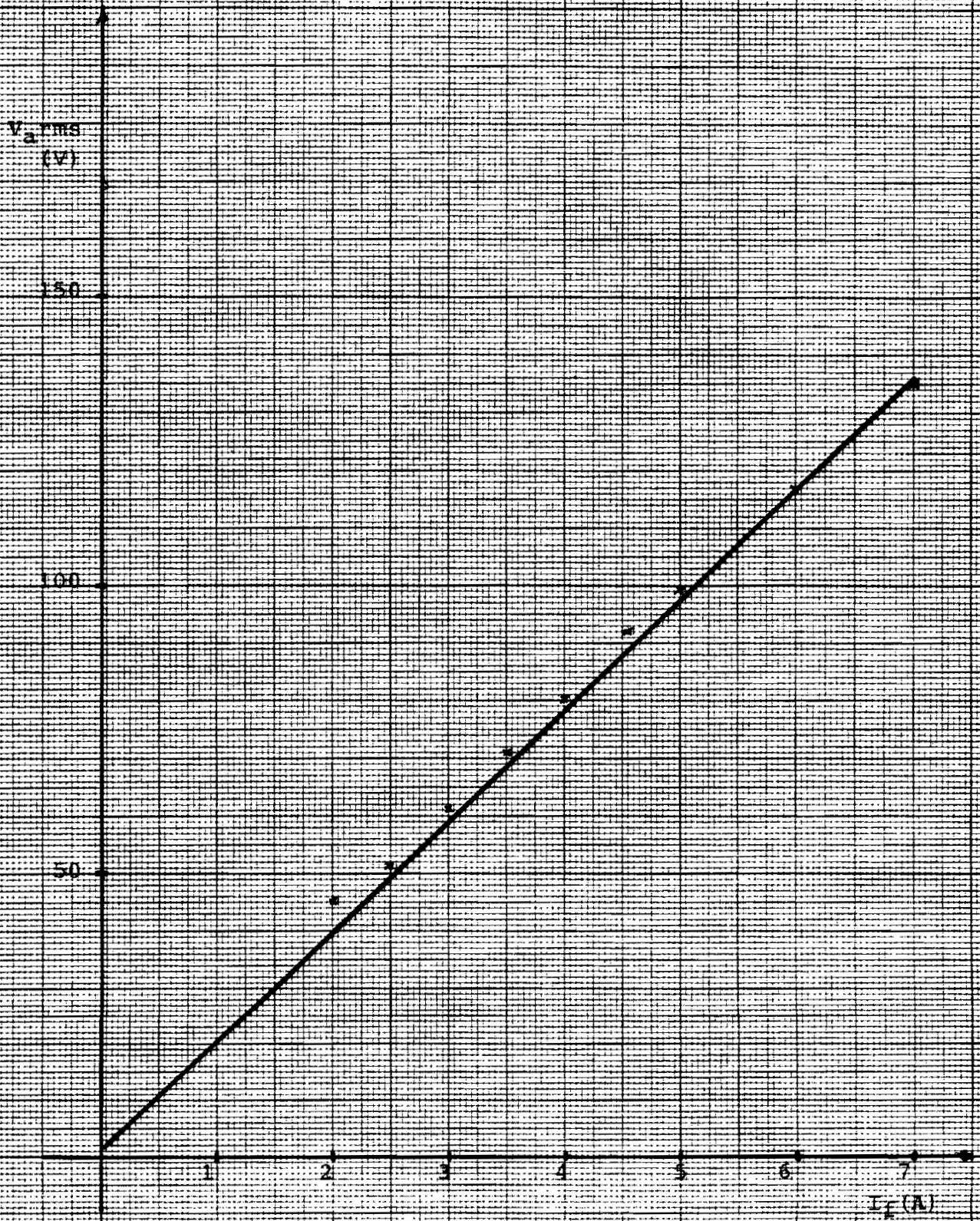


Fig. 4.63. Característica de vacío.

(Grupos estator-rotor en serie 1y2 o 1y4)

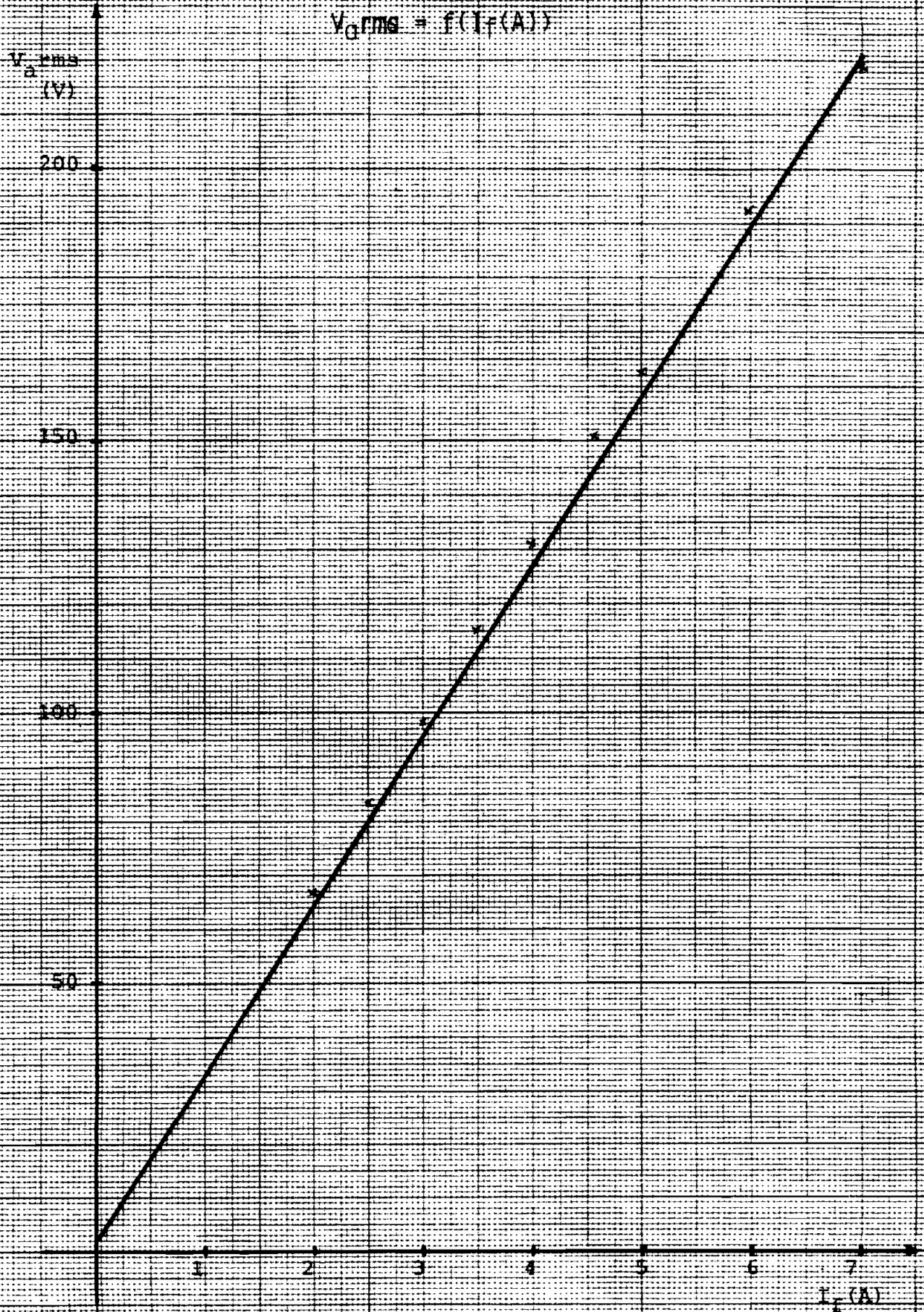


Fig. 4.64. Característica de vacío.

(Grupos estator-rotor en serie 1, 2, 3 y 4)

4.4.4 Influencia de la velocidad en las formas de onda de voltaje de armadura.

Existe el mismo efecto que para el caso monofásico.

El voltaje es directamente proporcional al voltaje.

La frecuencia es directamente proporcional y lineal a la velocidad del generador.

Con la variación de la velocidad no hay cambio en lo que respecta a la forma de onda.

#### 4.4.5 Prueba de cortocircuito

Se utiliza el mismo circuito que para el caso monofásico.

Las formas de onda son simétricas y su configuración se va haciendo triangular mientras sube en valor la corriente de campo. Se puede observar que para el caso de aumento de grupos es-tator-rotor la reacción de inducido es mayor.

##### 4.4.5.1 Cuadros de valores.



CUADRO 4.45

$I_f$ (A)	$I_{a\text{ rms}}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
2.00	0.37	1.10
2.50	0.47	1.40
3.00	0.57	1.80
3.50	0.68	2.05
4.00	0.77	2.35
4.60	0.91	2.70
5.00	0.99	2.95

Ver. Fig. 4.67

CONTIENE: Datos de Laboratorio.

Prueba de Cortocircuito.

Grupo estator - rotor 1, 2, 3 o 4

CUADRO 4.46

I f (A)	I a (A)	I p p (A)
2.00	0.28	0.84
2.50	0.36	1.08
3.00	0.43	1.28
3.50	0.52	1.52
4.00	0.59	1.80
4.60	0.68	2.00
5.00	0.74	2.20
6.00	0.89	2.60
7.00	1.05	3.00

Ver. Fig. 4.68

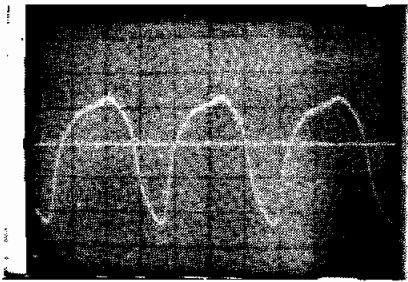
CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.  
Grupos estator-rotor. En serie  
1 y 2 o 3 y 4

CUADRO 4.47

$I_f$ (A)	$I_{a\text{ rms}}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
2.00	0.27	0.96
2.50	0.34	1.20
3.00	0.40	1.44
3.50	0.48	1.80
4.00	0.56	2.00
4.60	0.64	2.40
5.00	0.70	2.60
6.00	0.85	3.00
7.00	0.98	3.60

Ver. Fig. 4.69

CONTIENE: Datos de Laboratorio.  
Prueba de Cortocircuito.  
Grupos estator - rotor. En serie.  
1, 2, 3 y 4

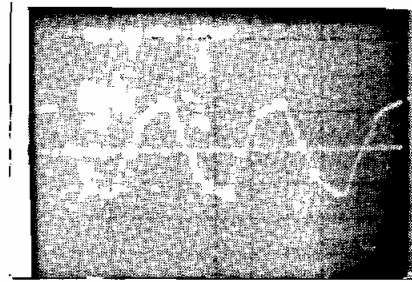


a) Grupos 1, 2, 3 o 4

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_e = 1\text{A/div.}$

$I_f = 4.60\text{ A}$        $I_a = 1.43\text{A}$

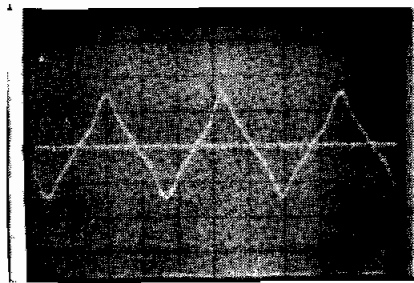


b) Grupos 1 y 2 o 3 y 4

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_e = 1\text{A/div.}$

$I_f = 4.60\text{ A}$        $I_a = 0.89\text{A}$



c) Grupos 1, 2, 3, y 4

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_e = 1\text{A/div.}$

$I_f = 4.60\text{ A}$        $I_a = 0.84\text{A}$

4.4.5.3 CARACTERISTICA DE CORRIENTE DE ARMADURA-CORRIEN\_  
TE DE CAMPO

$$I_{d\text{RMS}} = f(I_f(A))$$

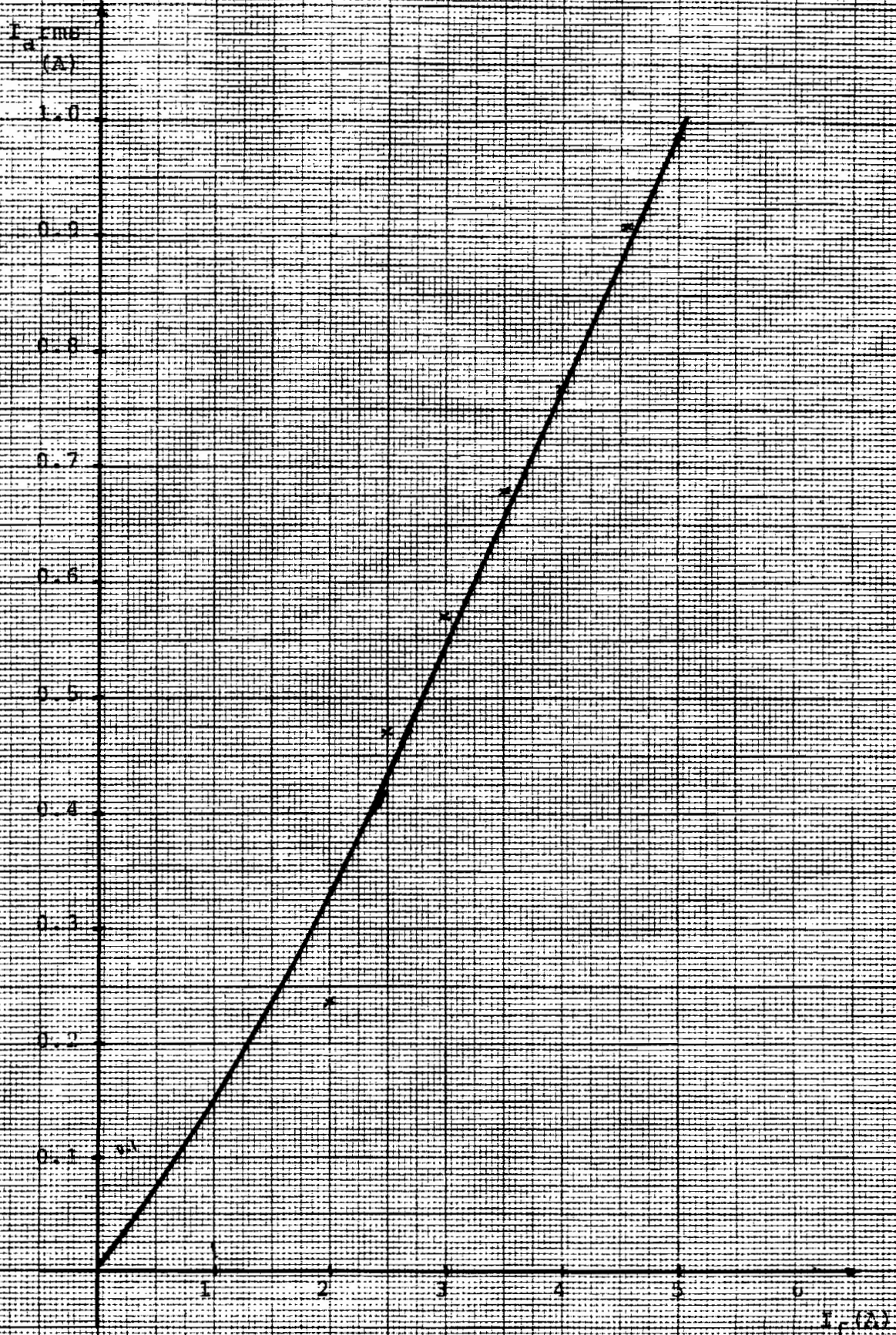


Fig. 4.67. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.  
(Grupo estator-rotor, 1,2,3 o 4)

$$I_{a,rms} = f(I_f(A))$$

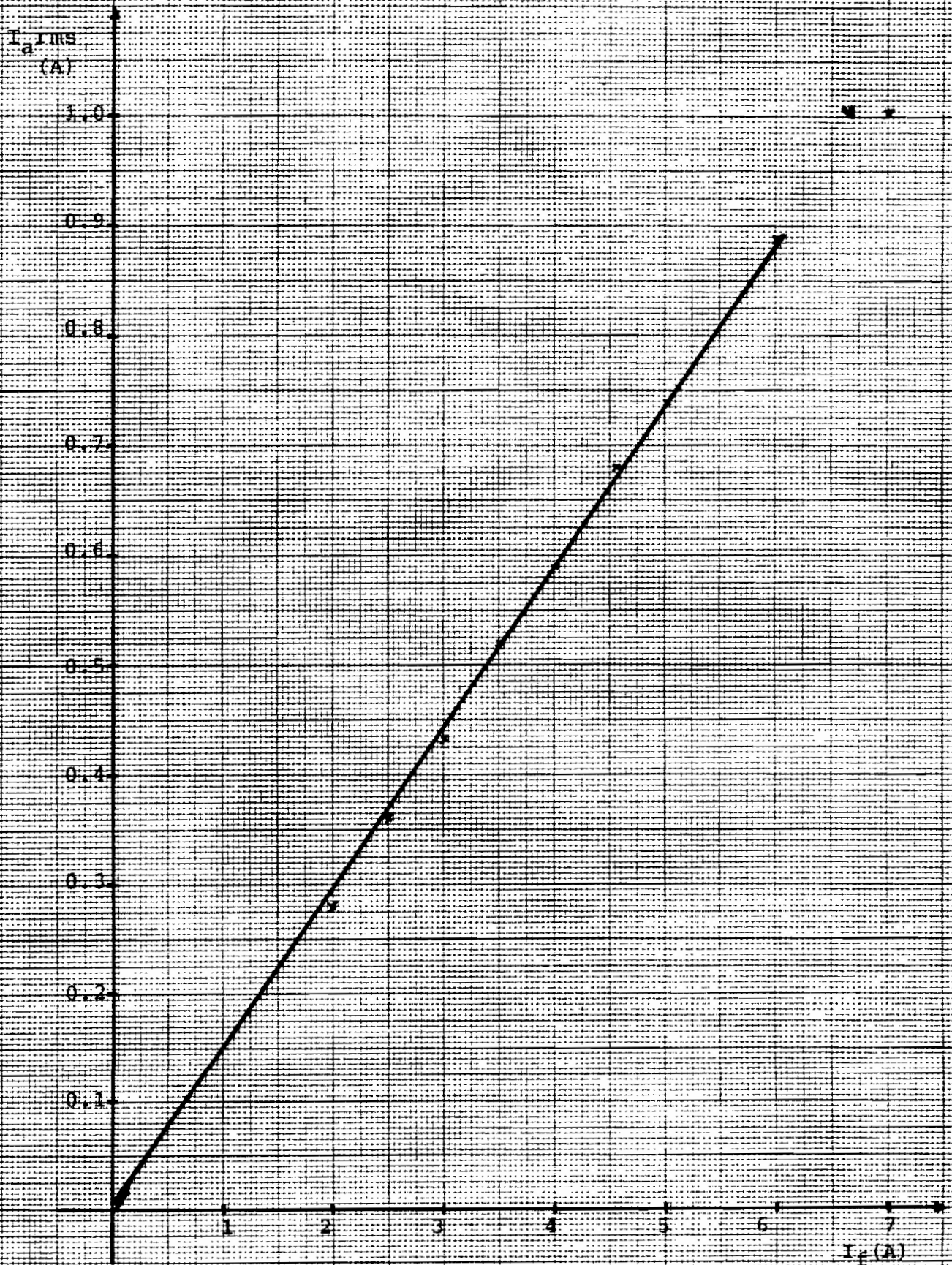


Fig. 4.68. Característica de corriente de campo-corriente de armadura.

(Grupos estator-rotor en serie 1y2 o 3y4)

$$I_{G\text{rms}} = f(I_f(A))$$

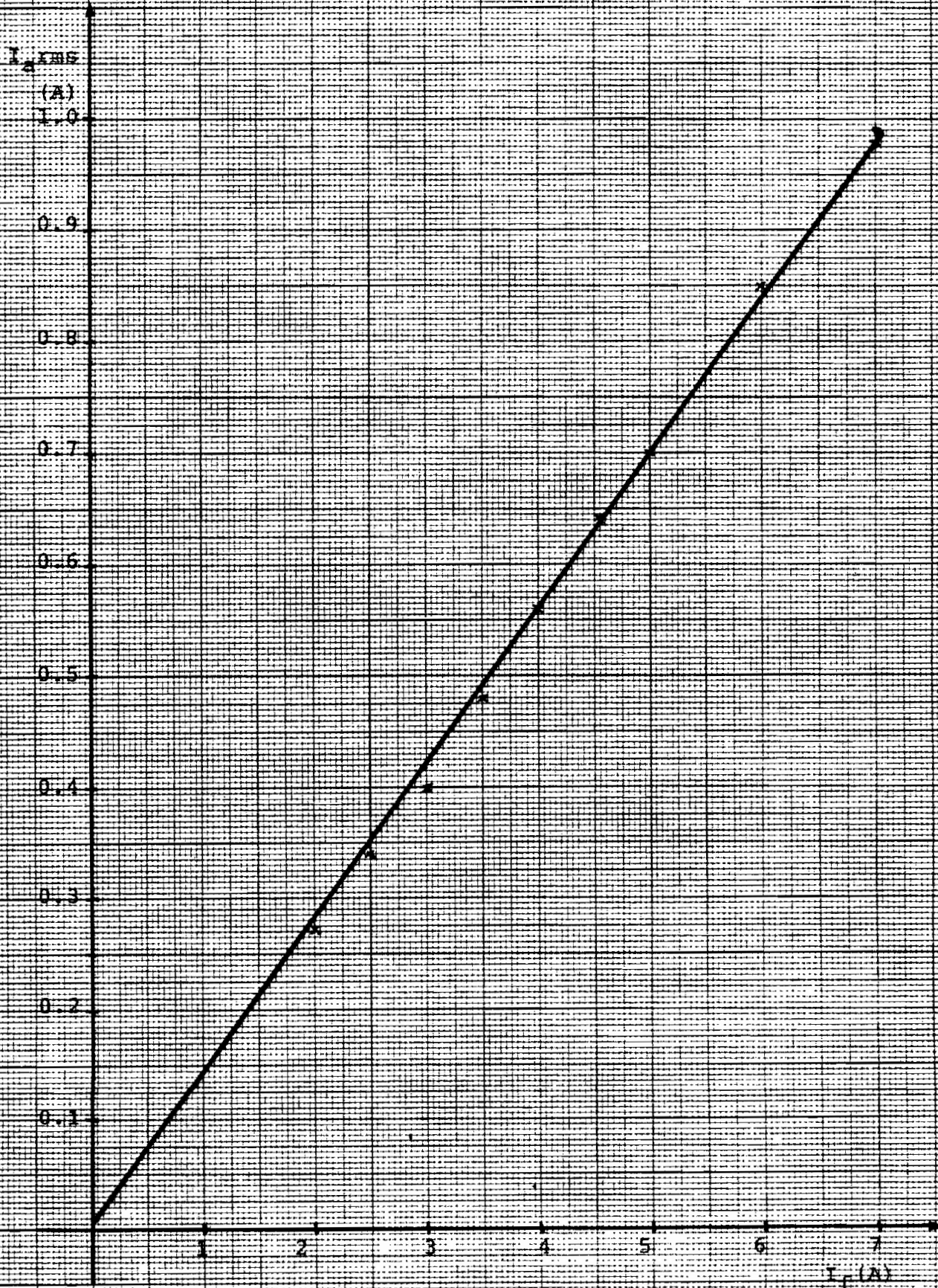


Fig. 4.69. Característica de corriente de campo - corriente de armadura.  
(Grupos estator - rotor en serie 1, 2, 3 y 4)



#### 4.4.6 Pruebas de carga

El circuito para estas pruebas, es el utilizado para el caso monofásico.

El análisis presentado para el caso monofásico también se cumple para el bifásico, además, si la armadura está ubicada en más de un grupo estatórico, la caída de voltaje es mayor, lo que implica una regulación más deficiente ( cuadros de valores 4.48, 4.49, 4.50; regulación cuadro 4.57).

En cuanto a las formas de onda, tanto de voltaje como de corriente, no son analizadas detenidamente, ya que se recomienda el estudio sobre este punto.

En las figuras 4.80, 4.81 y 4.82, se puede observar la variación de las formas de onda conforme se aumenta la carga, esto para los 3 tipos de conexiones posibles en el generador, tanto en carga resistiva, inductiva, capacitiva respectivamente. Cabe anotar que la forma de onda se hace triangular cuando circula corriente nominal ( armadura), y ésto para los tres tipos de carga.

Las curvas características están descritas de la fig. 4.72 a la fig. 4.79..

CUADRO 4.48

$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
43.00	130.00	0.00	0.00
41.60	120.00	0.11	0.36
40.10	105.00	0.16	0.44
38.60	100.00	0.21	0.60
37.40	90.00	0.26	0.65
34.00	80.00	0.36	1.25
29.80	70.00	0.49	1.90
22.50	44.00	0.70	2.40
11.30	24.00	0.83	2.80

Ver. Fig. 4.71

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (R)  
Grupo Estator - rotor 1, 2, 3, o 4

CUADRO 4.49

$V_{a\text{rms}}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\text{rms}}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
92.00		0.00	0.00
81.00	280.00	0.21	0.80
74.30	260.00	0.30	1.08
64.40	240.00	0.40	1.40
49.80	180.00	0.49	1.80
24.60	70.00	0.61	1.90

Ver. Fig. 4.72

CONTIENE: Datos de Laboratorios  
Prueba de Carga (R)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1 y 2 o 3 y 4

CUADRO 4.50

$V_a$ rms (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_a$ rms (A)	$I_{pp}$ (A)
151.00	500.00	0.00	0.00
117.00	320.00	0.30	0.80
107.00	310.00	0.35	1.00
95.40	300.00	0.40	1.30
84.10	275.00	0.45	1.40
62.00	220.00	0.50	1.70
12.40	44.00	0.60	2.10

Ver. Fig. 4.73

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (R)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1, 2, 3 y 4

CUADRO 4.51

$V_a$ rms (V)	$V_{pp}$ (V)	$V_a$ rms (A)	$I_{pp}$ (A)
43.00	130.00	0.00	0.00
38.00	120.00	0.09	0.24
33.50	100.00	0.18	0.52
31.50	100.00	0.23	0.58
25.40	95.00	0.36	1.00

Ver. Fig. 4.74

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (L)  
Grupo estator - rotor 1, 2, 3 o 4

CUADRO 4.52

$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
92.00		0.00	0.00
82.00	220.00	0.06	0.18
68.80	200.00	0.17	0.48
55.50	180.00	0.27	0.76
40.60	120.00	0.38	1.05

Ver. Fig. 4.75

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (L)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1 y 2 o 3 y 4

CUADRO 4.53

$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
151.00		0.00	0.00
136.00	440.00	0.07	0.24
111.50	360.00	0.18	0.56
73.25	200.00	0.34	1.10
44.30	130.00	0.44	1.50

Ver. Fig. 4.76

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (L)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1, 2, 3 y 4

CUADRO 4.54

$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
42.00		0.00	0.00
43.00	175.00	0.14	0.60
53.40	190.00	0.22	1.28
66.30	210.00	0.45	1.60
68.50	235.00	0.97	3.70

Ver. Fig. 4.77

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (C)  
Grupo estator - rotor 1, 2, 3 o 4



CUADRO 4.55

$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
92.00		0.00	0.00
115.00	280.00	0.12	0.48
136.00	360.00	0.42	1.70
151.00	400.00	0.54	2.00
168.00	460.00	0.69	2.40
184.00	500.00	0.84	3.00
196.00	540.00	0.95	3.40
213.00	580.00	1.12	4.00

Ver. Fig. 4.78

CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (C)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1 y 2 o 3 y 4

CUADRO 4.56

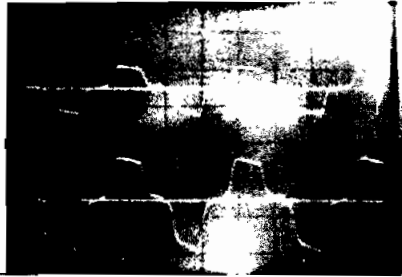
$V_{a\ rms}$ (V)	$V_{pp}$ (V)	$I_{a\ rms}$ (A)	$I_{pp}$ (A)
151.00	520.00	0.00	0.00
204.00	560.00	0.23	0.74
265.00	760.00	0.51	1.80
295.00	820.00	0.64	2.10
361.00	1040.00	0.94	3.20

Ver. Fig. 4.79

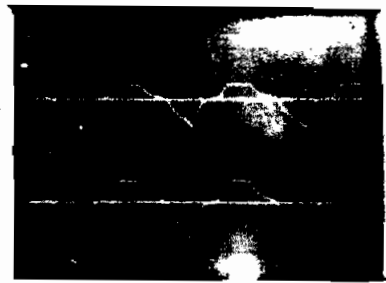
CONTIENE: Datos de Laboratorio  
Prueba de Carga (C)  
Grupos estator - rotor. En serie  
1, 2, 3 y 4

4.4.6.2 FORMAS DE ONDAS DE VOLTAJE Y DE CORRIENTE DE ARMADURA.

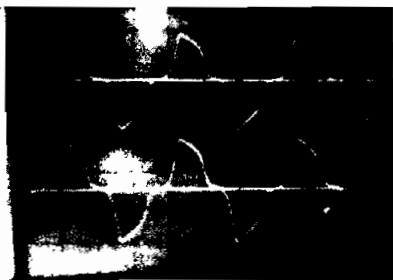
- CARGA RESISTIVA
- CARGA INDUCTIVA
- CARGA CAPACITIVA.



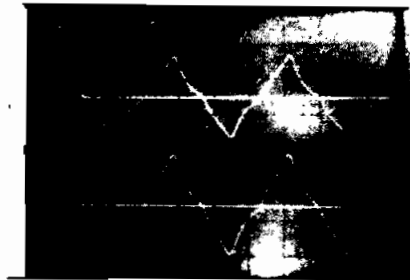
a) Grupo 1,2, 3 o 4  
Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$   
 $Ve_v = 100\text{ V/div.}$   
 $Ve_i = 0.1\text{ A/div.}$



b) Grupo 1, 2, 3 o 4  
Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$   
 $Ve_v = 100\text{ V/div.}$   
 $Ve_i = .5\text{ A/div.}$



c) Grupo 1 y 2 o 3 y 4  
Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$   
 $Ve_v = 100\text{ V/div.}$   
 $Ve_i = 0.2\text{ A/div.}$



d) Grupo 1 y 2 o 3 y 4  
Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$   
 $Ve_v = 100\text{ V/div.}$   
 $Ve_i = 0.5\text{ A/div.}$

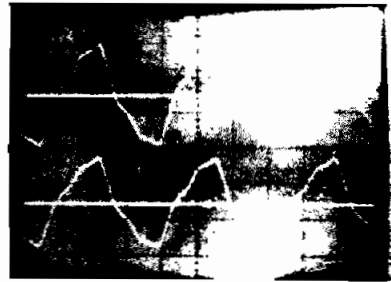


e) Grupos 1, 2, 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.5\text{ A/div.}$

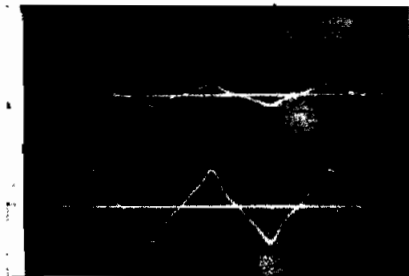


f) Grupos 1, 2, 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.5\text{ A/div.}$

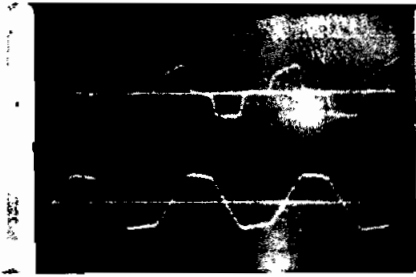


g) Grupos 1, 2, 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$   $Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 1\text{ A/div.}$

Fig. 4.80 Formas de onda de voltaje de armadura (onda superior) y de la onda de corriente de armadura (onda inferior) con carga resistiva.



a) Grupo 1, 2, 3 o 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.02\text{ A/div.}$



b) Grupo 1, 2, 3 o 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.1\text{ A/div.}$

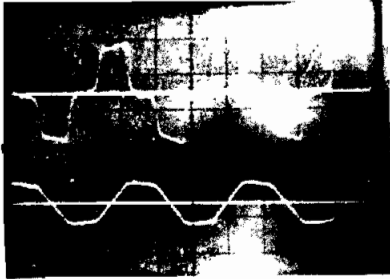


c) Grupo 1, 2, 3 o 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100\text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.2\text{ A/div.}$

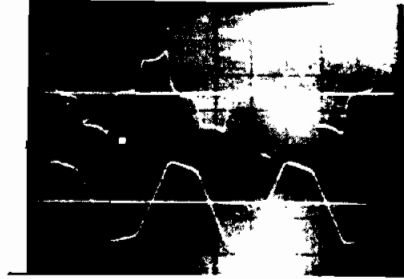


d) Grupo 1 y 2 o 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 100\text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.05\text{ A/div.}$

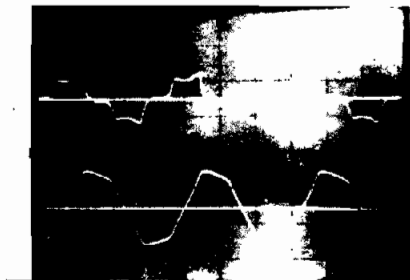


e) Grupo 1 y 2 o 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 100\text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.2\text{ A/div.}$

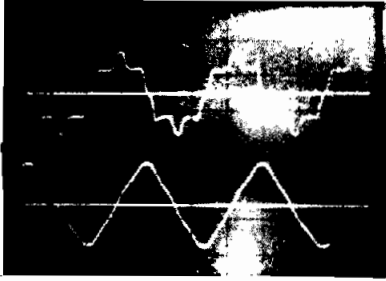


f) Grupo 1 y 2 o 3 y 4

Escala:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 100\text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5\text{ A/div.}$

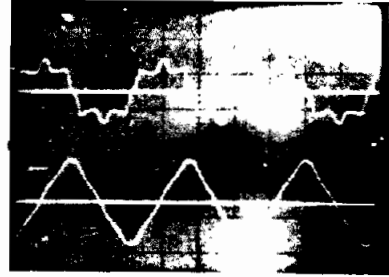


g) Grupos 1, 2, 3 y 4

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 200 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.05 \text{ A/div.}$

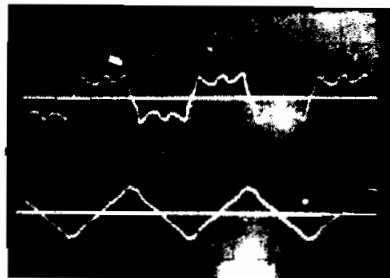


h) Grupos 1, 2, 3 y 4

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 200 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.2 \text{ A/div.}$



i) Grupos 1, 2, 3 y 4

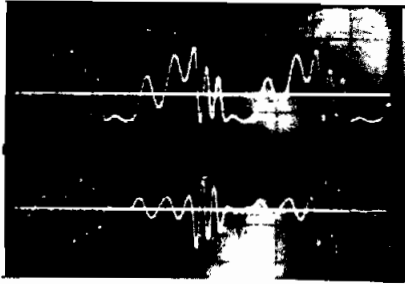
Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 100 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 1 \text{ A/div.}$

Fig. 4.81 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura. Con carga Inductiva.





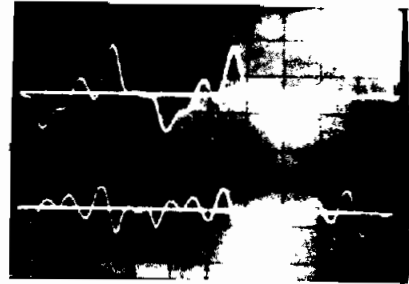
a) Grupo 1, 2, 3 o 4

$C = 1 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_V} = 100 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5 \text{ A/div.}$



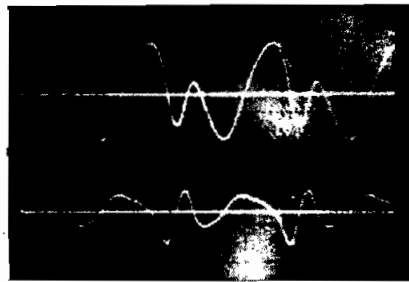
b) Grupo 1, 2, 3 o 4

$C = 3 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_V} = 100 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5 \text{ A/div.}$



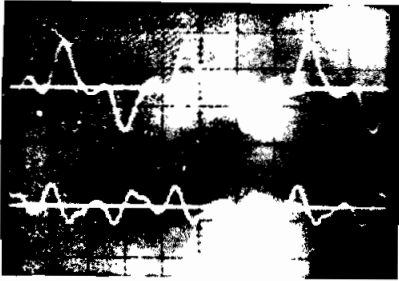
c) Grupo 1, 2, 3 o 4

$C = 20 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_V} = 100 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 2 \text{ A/div.}$



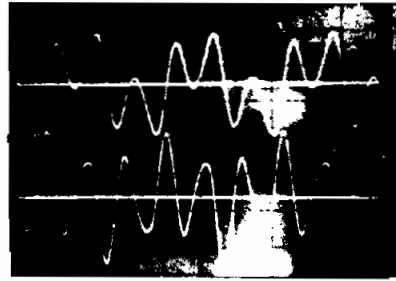
d) Grupos 1 y 2 o 3 y 4

$C = 1 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 200 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5 \text{ A/div.}$



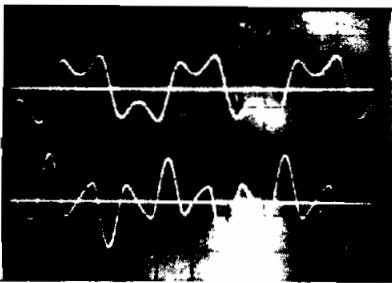
e) Grupos 1 y 2 o 3 y 4

$C = 3 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 200 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5 \text{ A/div.}$



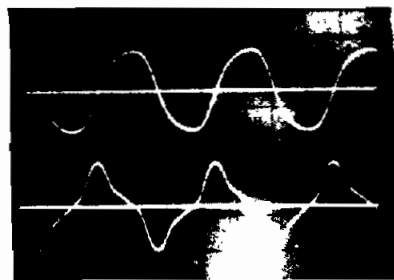
f) Grupos 1 y 2 o 3 y 4

$C = 5 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 200 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 0.5 \text{ A/div.}$



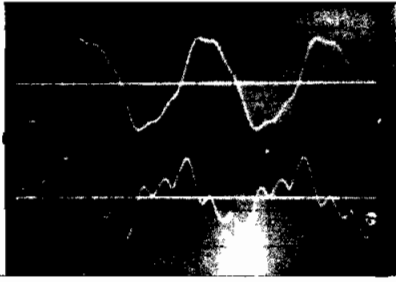
g) Grupos 1 y 2 o 3 y 4

$C = 10 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$V_{e_v} = 200 \text{ V/div.}$

$V_{e_i} = 1 \text{ A/div.}$



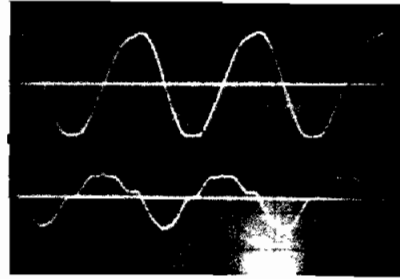
h) Grupos 1, 2, 3 y 4

$C = 1 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 200 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.2 \text{ A/div.}$



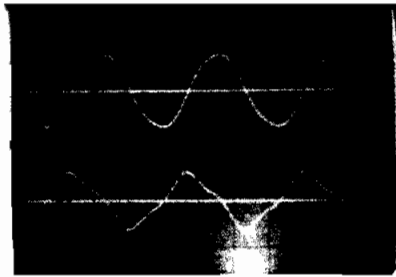
i) Grupos 1, 2, 3 y 4

$C = 3 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 200 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 0.5 \text{ A/div.}$



j) Grupos 1, 2, 3 y 4

$C = 5 \text{ m F}$

Escalas:  $H_o = 5\text{ms/div.}$

$Ve_v = 500 \text{ V/div.}$

$Ve_i = 1 \text{ A/div.}$

Fig. 4.82 Formas de onda de voltaje (onda superior) y de corriente (onda inferior) de armadura con carga capacitiva.

4.4.6.3 CARACTERISTICAS DE VOLTAJE DE ARMADURA -  
CORRIENTE DE ARMADURA.

- CARGA RESISTIVA
- CARGA INDUCTIVA
- CARGA CAPACITIVA.

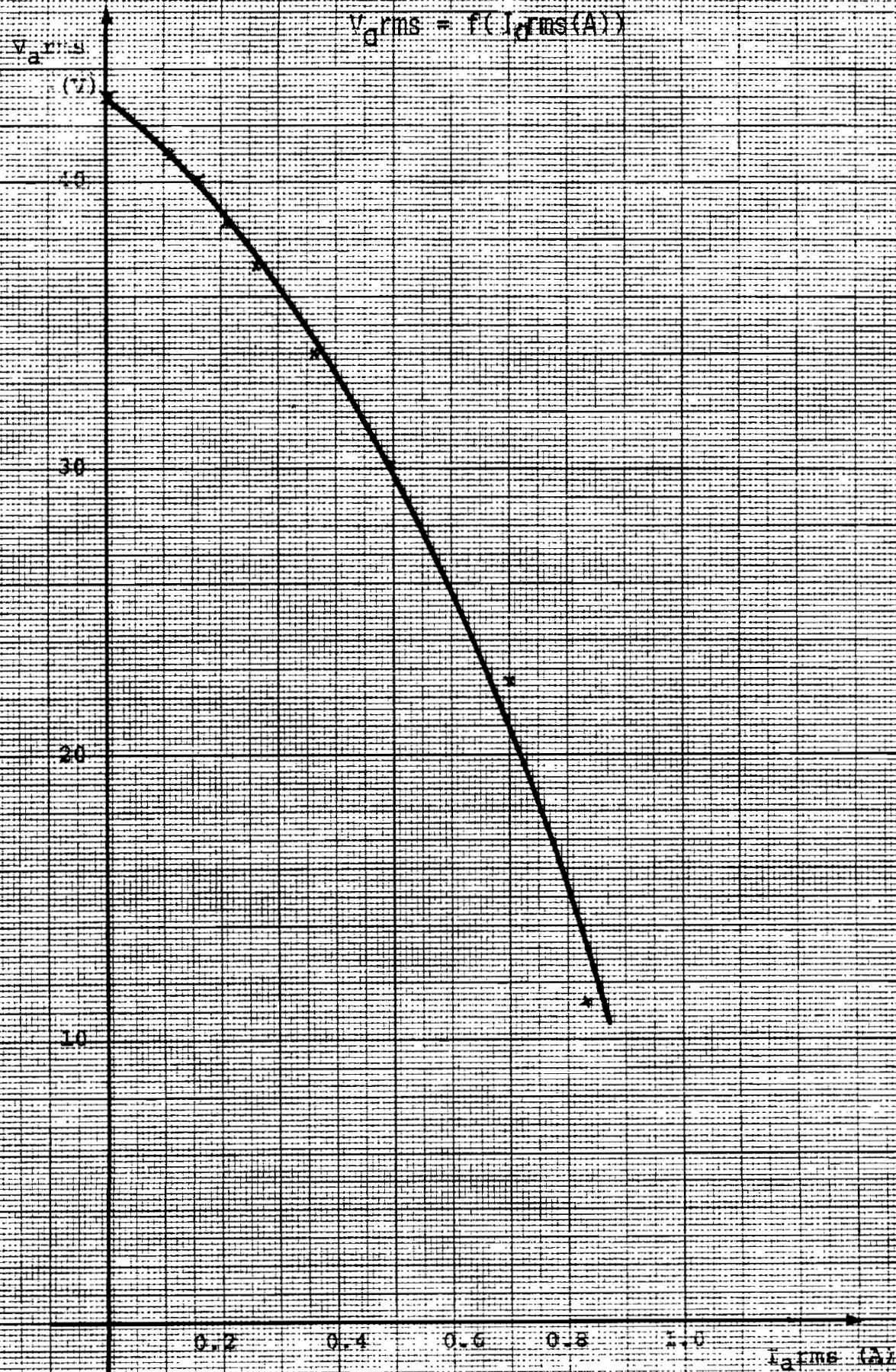


Fig. 4.71. Característica de voltaje de armadura. (R)

(Grupo estator-rotor 1, 2, 3 o 4)

$$V_{a,rms} = f(I_{a,rms}(A))$$

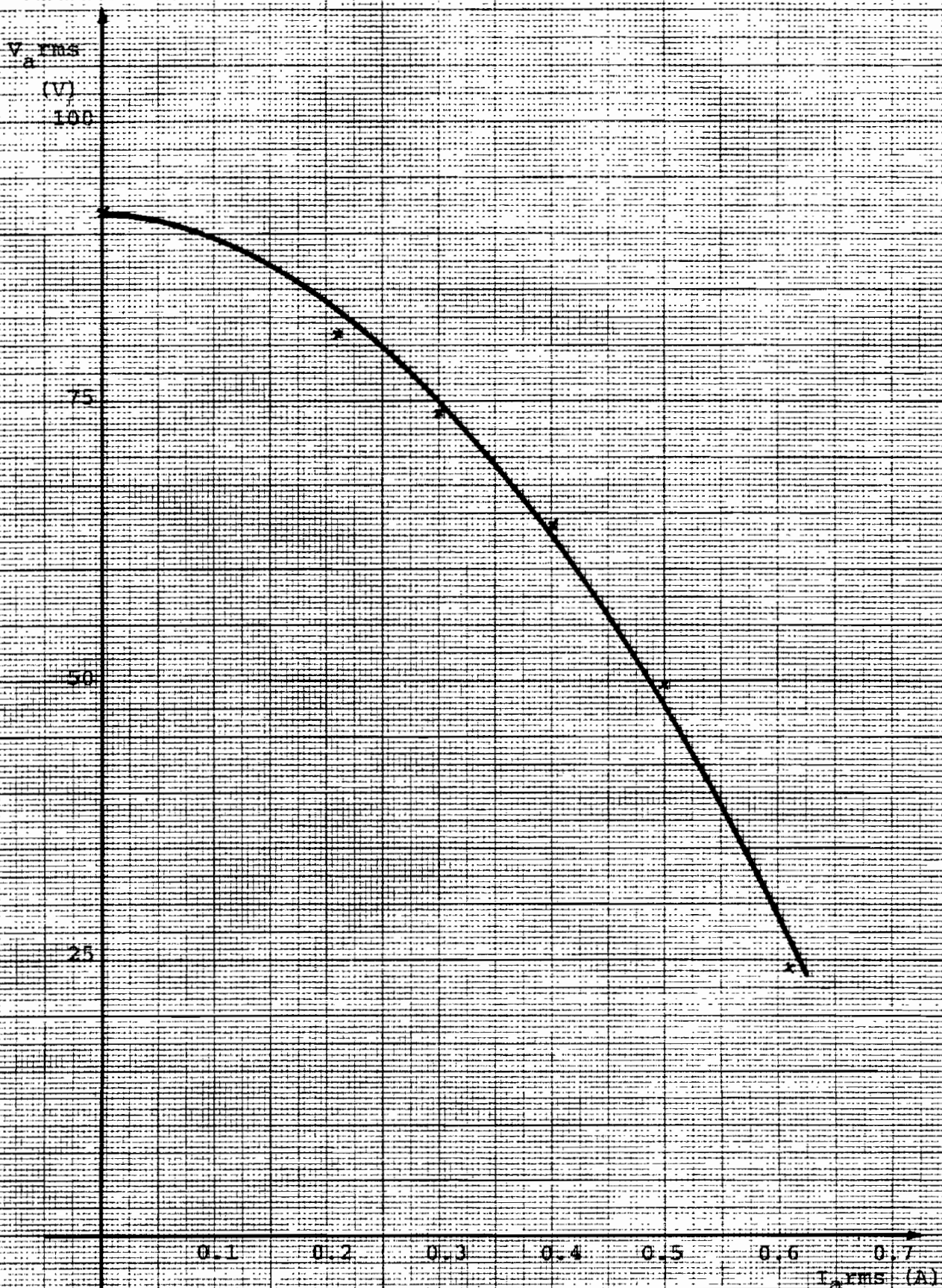


Fig. 4.72. Característica de voltaje de armadura-carga, (E)

(Grupos estator-rotor en serie 1y1 o 3y4)

$$V_{G,rms} = f(I_{G,rms}(A))$$

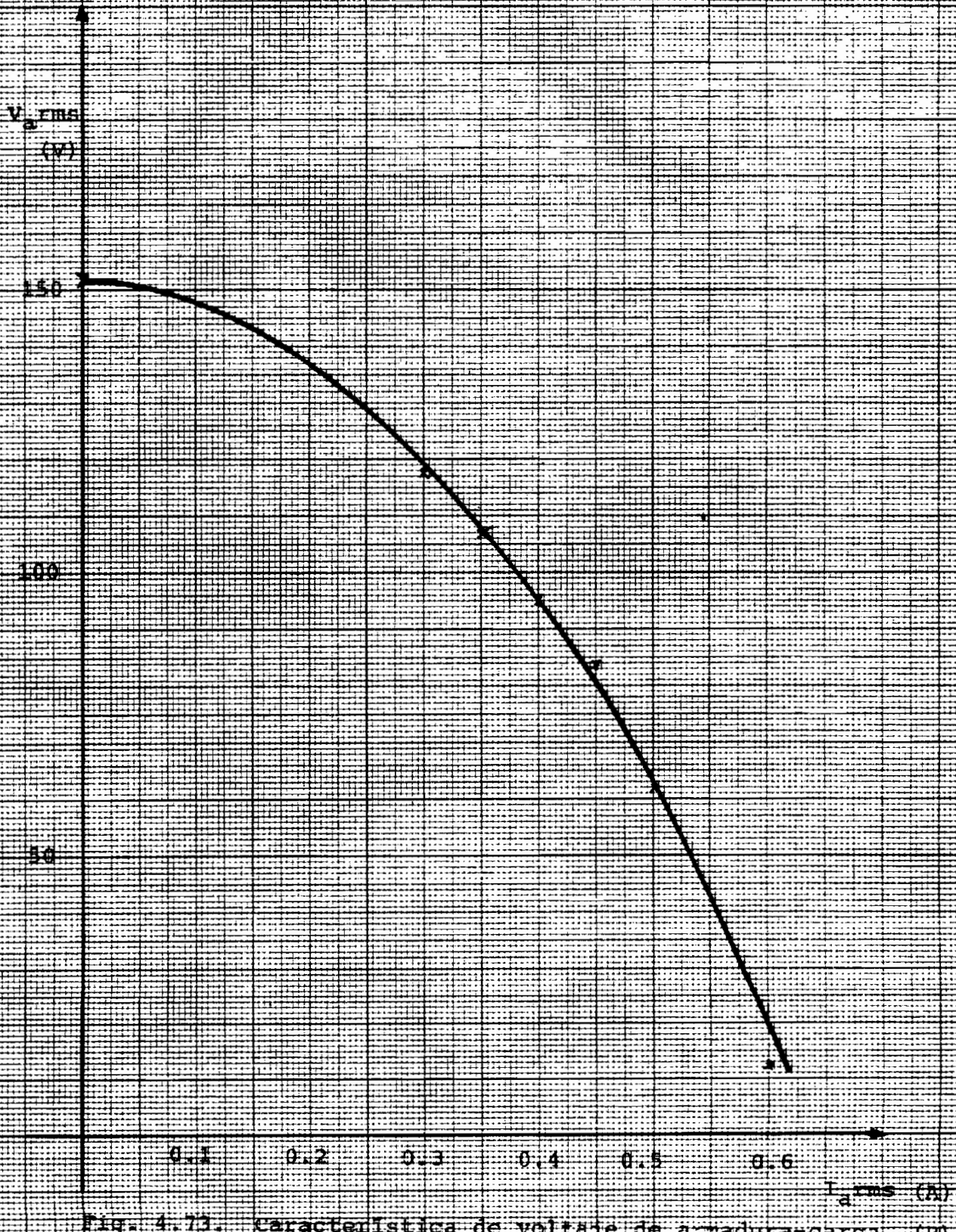


Fig. 4.71. Característica de voltaje de armadura-carga. (R)  
(Grupos estator-rotor en serie 1,2,3 y 4)

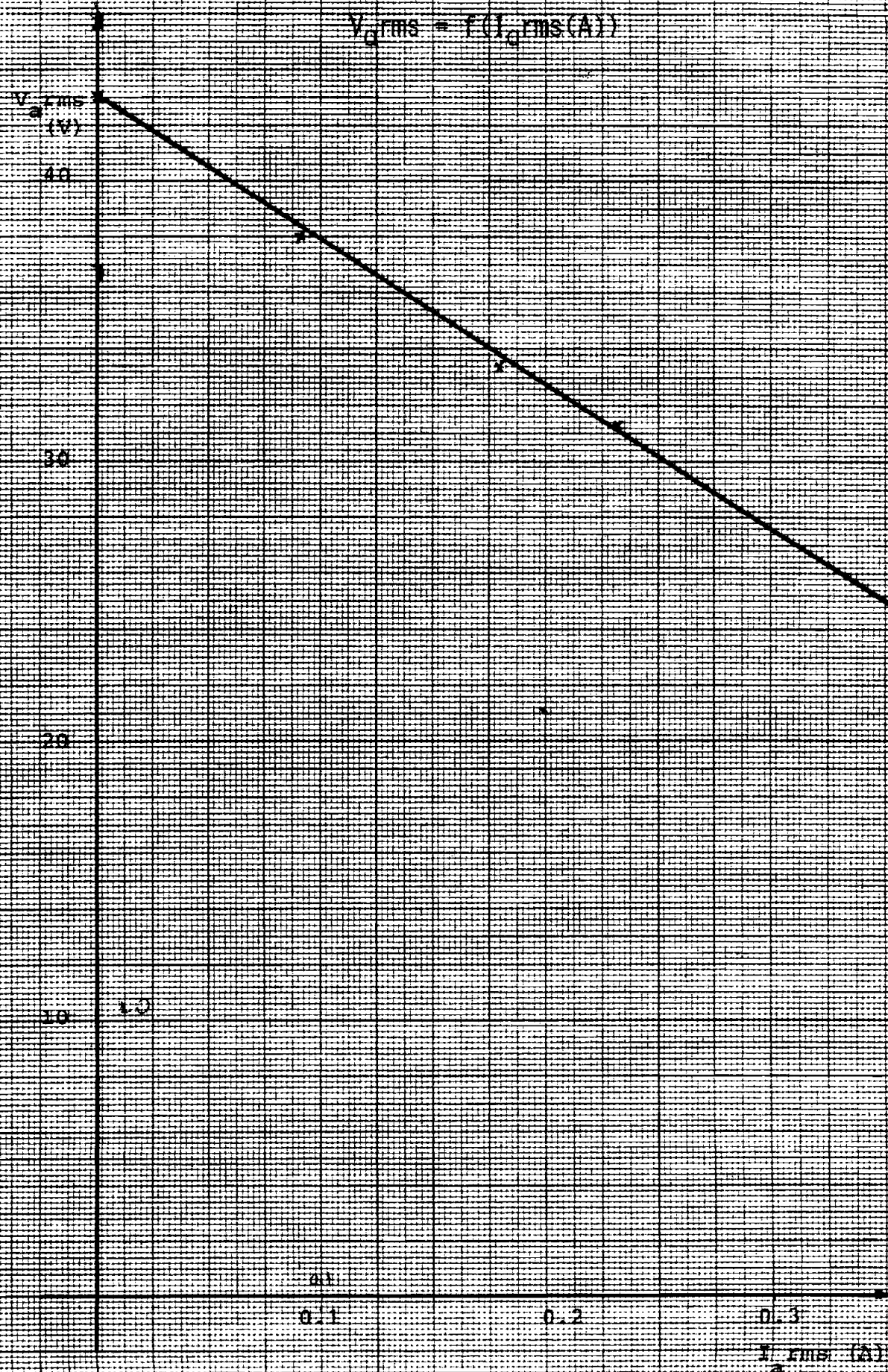


Fig. 4.74. Característica de voltaje de armadura-carga. (L)

(Grupo estator-rotor, L2, 3 o 4)



$$V_{a\text{rms}} = f(I_{a\text{rms}}(A))$$

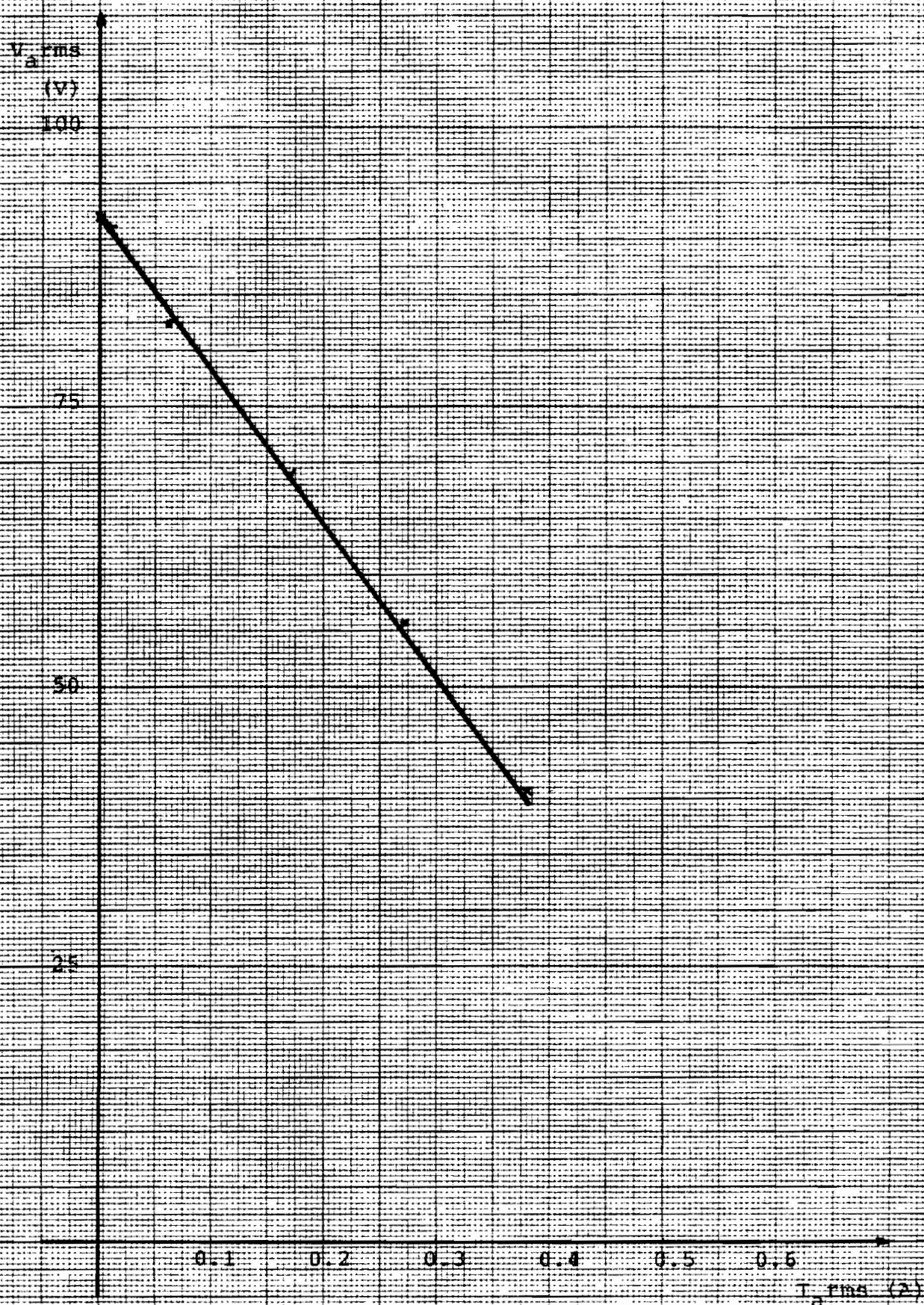


Fig. 4.75. Característica de voltaje de armadura-carga. (1)

(Grupos estator-rotor en serie.  $I_y2$  0.3y4)

$$V_{0 \text{ rms}} = f(I_{0 \text{ rms}}(\text{A}))$$

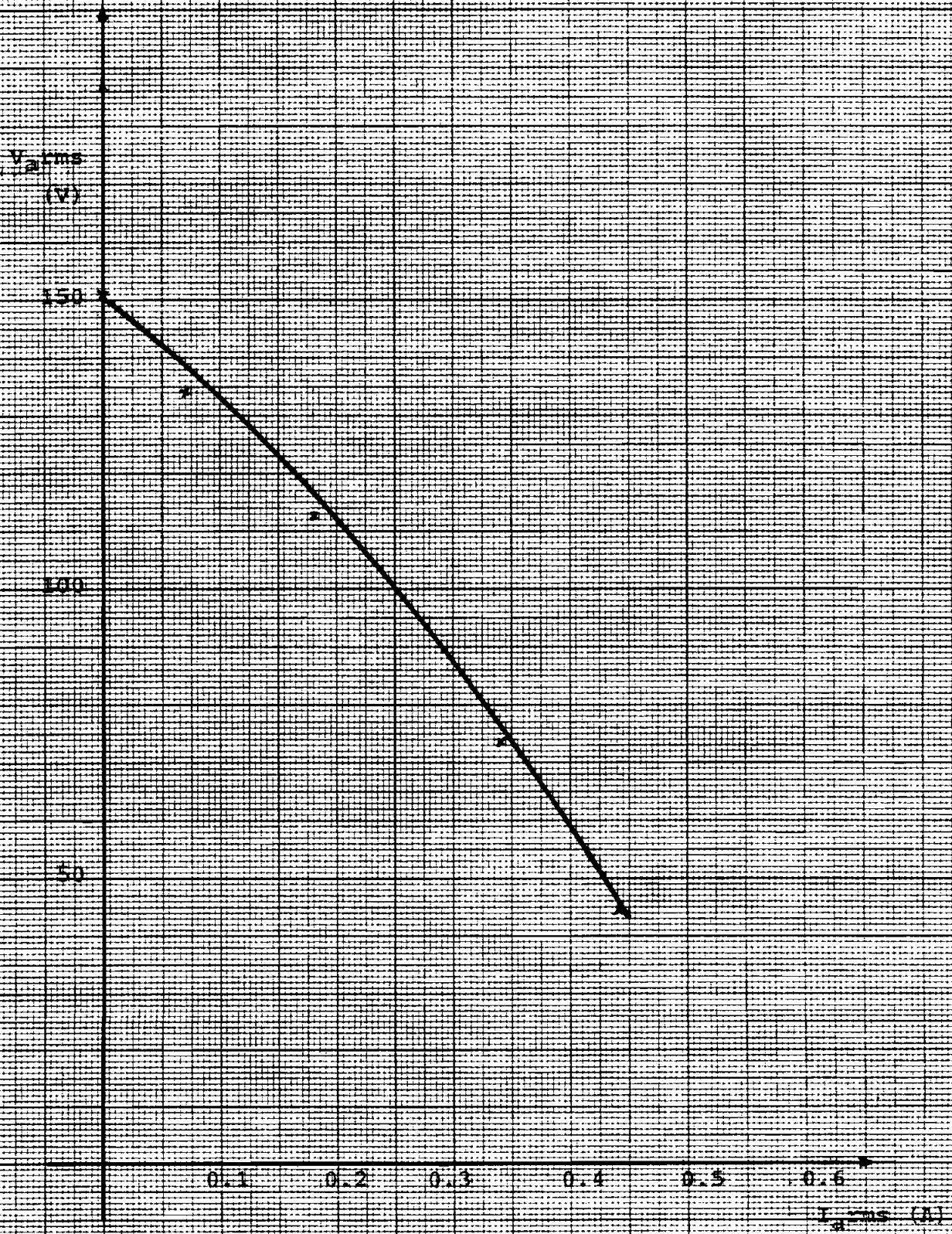


Fig. 4.76. Característica de voltaje de armadura-carga. (b)  
(Grupos estator-rotor en serie, 1, 2, 3 y 4)

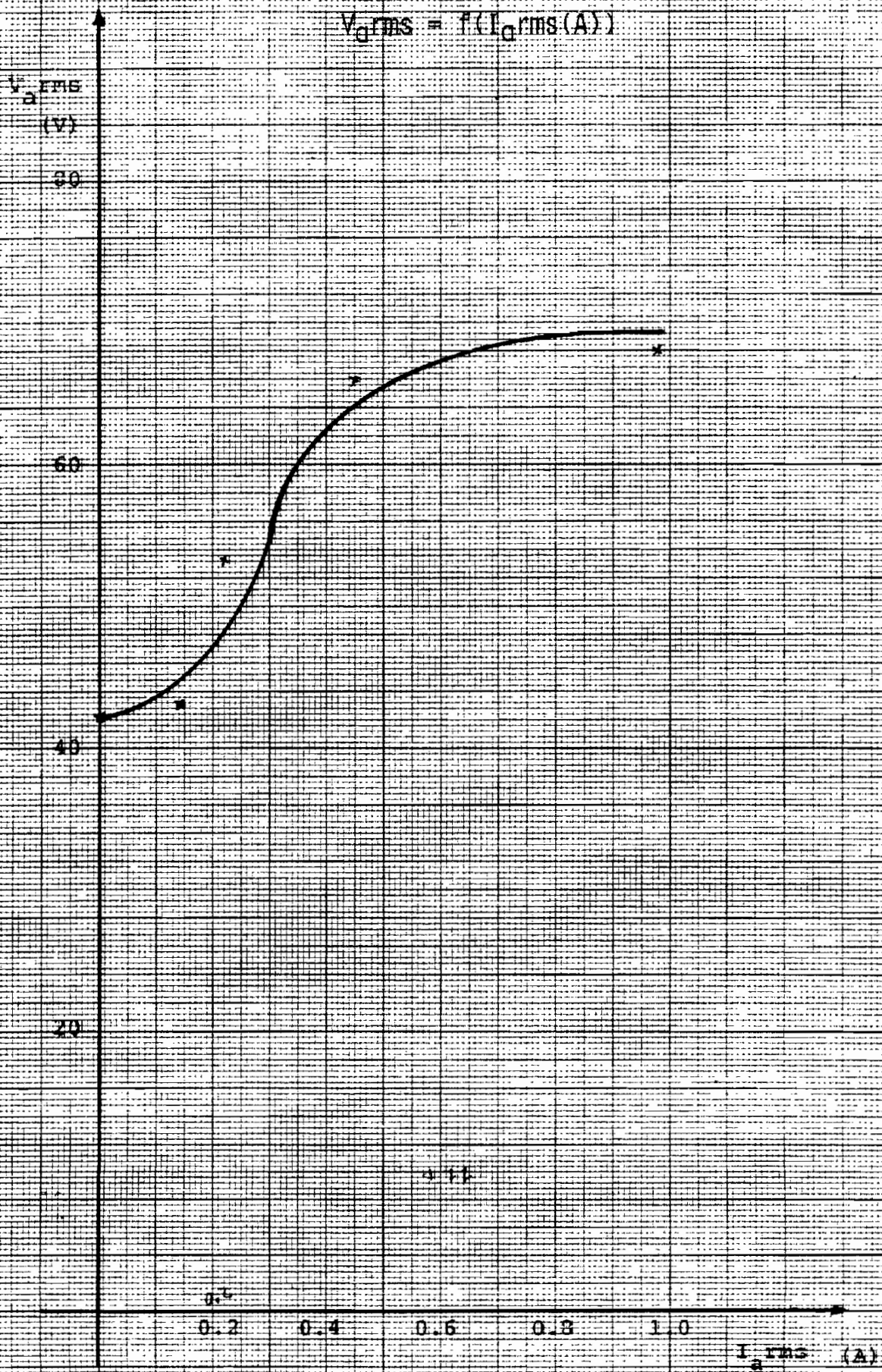


Fig. 4.77. Característica de voltaje de armadura-carga. (C)  
 (Grupo estator-rotor 1.2.3 o 4)

$$V_{a,rms} = f(I_{a,rms}(A))$$

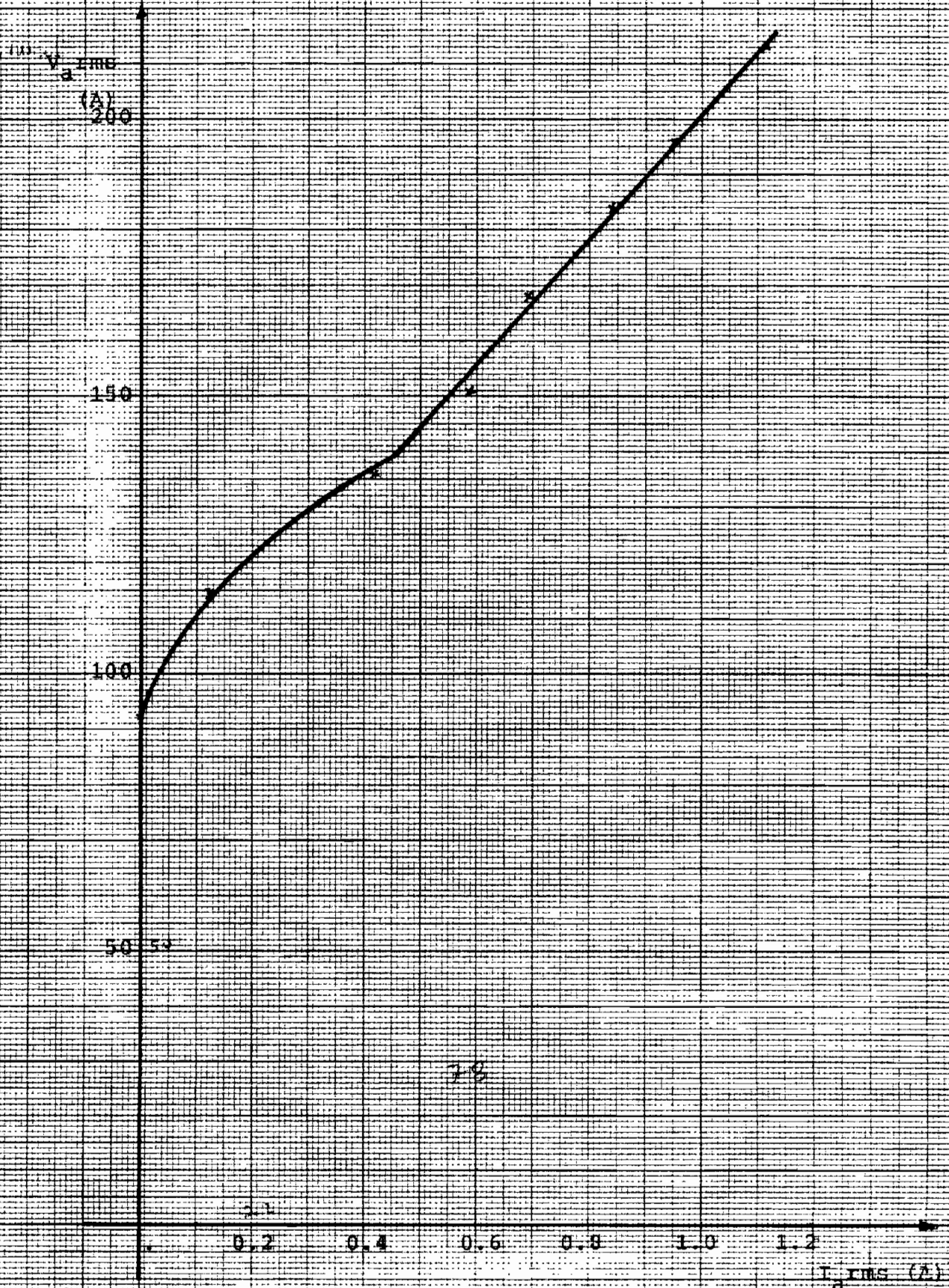


Fig. 4.78. Característica de voltaje de armadura-carga (C)

(Grupos estator-rotor en serie 1y2 o 3y4)

$$V_{grms} = f(I_{grms}(A))$$

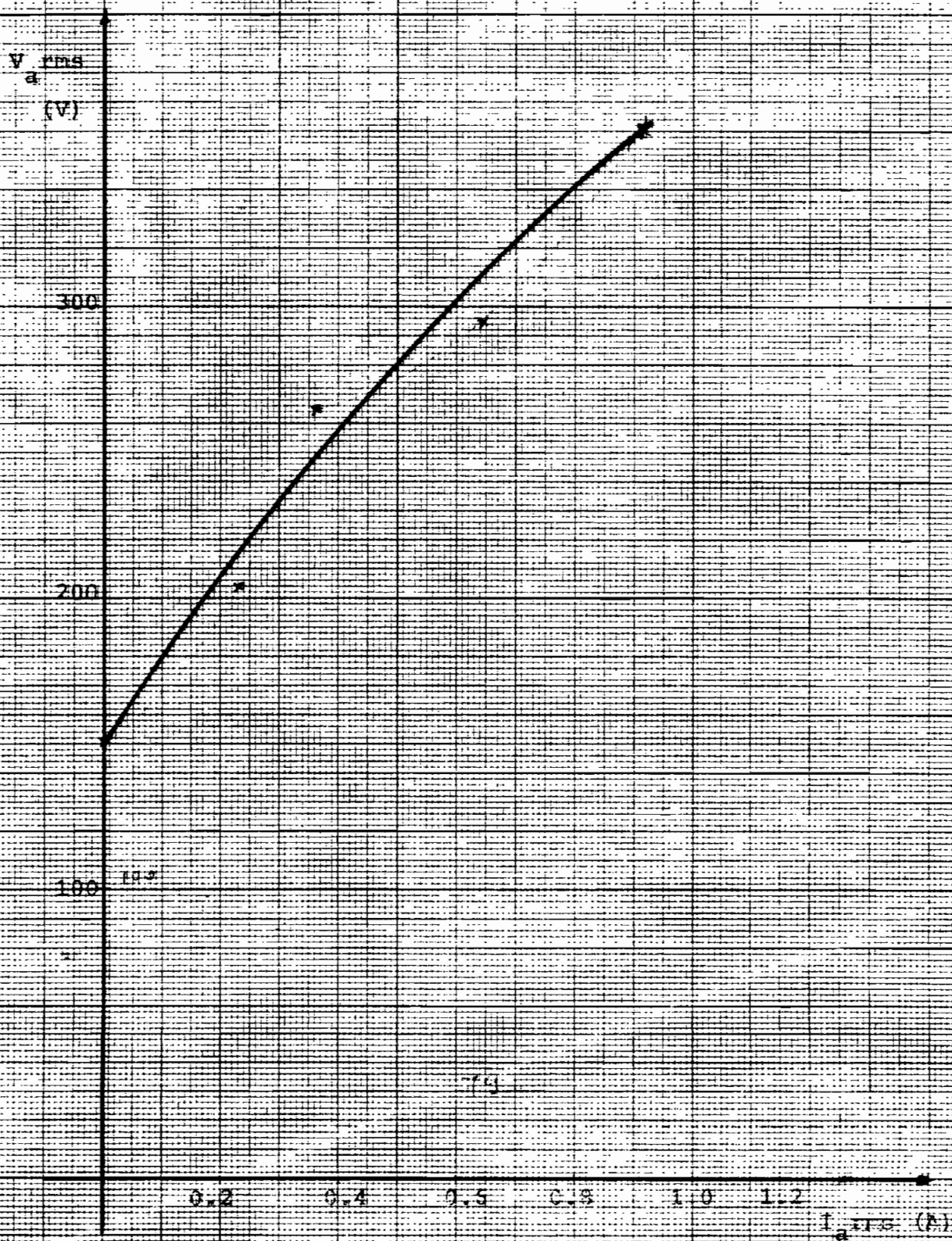


Fig. 4.79. Característica de voltaje de armadura-carga. (C)  
(Grupos estator-rotor en serie, 1, 2, 3 y 4)

4.4.6.4 Regulación de voltaje (%)

CUADRO 4.57

Carga Resistiva		Carga Inductiva			
1,2,3o4	1y2 o 3y4	1,2,3o4	1,2,3o4	1y2 o 3y4	1,2,3y4
44.30	84.74	143.55	69.29	126.60	139.68
Carga Capacitiva					
	1,2,3o4	1y2 o 3y4	1,2,3o4		
	-30.00	-51.58	-57.46		

Del cuadro 4.57:

La regulación de voltaje de este tipo de generador es deficiente y más aún cuando la armadura está ubicada en más de un grupo estator rotor.

Para carga inductiva la regulación de voltaje es más deficiente, comparativamente con la carga resistiva, lo que quiere decir que el efecto de la reacción de inducido es más desmagnetisante. Para carga capacitiva la reacción de inducido ocasiona un efecto magnetisante.

4.4.7 Inductancias propias y mutúas.

Un generador de reluctancia, de más de un grupo estator - rotor posee circuitos desacoplados magnéticamente, en este caso de cuatro grupos, por tanto:

La inductancia propia en cada grupo estatórico es:

CUADRO 4.58

A R M A D U R A		C A M P O		
eje directo	eje en cuadratura	eje directo	eje en cuadratura	
$L_{aa} = \frac{N_a^2}{R_d}$ <p>(H)</p>	$L_{aa} = \frac{N_a^2}{R_q}$ <p>(H)</p>	$L_{ff} = \frac{N_f^2}{R_d}$ <p>(H)</p>	$L_{ff} = \frac{N_f^2}{R_q}$ <p>(H)</p>	
Valor Calculado	0.0221	0.088	0.0226	0.0009

De donde:  $g_d = 0.002 \text{ m}$ ;  $g_q = 0.05 \text{ m}$ ;  $S = (0.036 \times 0.039) \text{ m}^2$ .

La inductancia mutúa varía con respecto a la posición relativa del rotor.

$$L_{af} = f(\theta) \quad \text{fase a}$$

$$L_{bf} = f(\theta) \quad \text{fase b}$$

#### 4.4.8 Efecto en el voltaje generado con la variación del voltaje de campo.

Se comprobó que si se varía el voltaje de campo, el voltaje generado no sufre variación notable en cuanto a su valor, pero si en cuanto a su forma, la misma que tiende a redondearse mientras menor sea el voltaje de excitación. Lo que no sucedía en el caso monofásico que varía en valor y en forma de onda (no se adjuntan valores debido a que no hay diferencia notable para los distintos voltajes de campo).

#### 4.5 PRUEBA CON VOLTAJE DE CORRIENTE CONTINUA PROVENIENTE DE BATERIAS.

No existe variación significativa, con respecto a los valores tabulados con alimentación de campo proveniente de una fuente de continua rectificadas. Si se varía el voltaje de campo sucede lo mismo que lo analizado en el numeral 4.4.8 (no se adjuntan los valores porque estos son similares a los ya tabulados en las pruebas mencionadas en los numerales anteriores).

#### 4.6 FORMULACION DE LOS PARAMETROS NOMINALES DEL PROTOTIPO.

En el generador de reluctancia existe una gran variación del voltaje, es decir una regulación de voltaje deficiente, como se puede observar en los cuadros de valores tabulados para las diferentes car-



gas, en los numerales anteriores.

Por la presencia de esta gran variación de voltaje, y variación de la corriente de acuerdo a la carga, se presenta el cuadro 4.6. a., en el cual se dan los parámetros que admite la máquina (comprobados en el laboratorio), tanto en potencia, voltaje y corriente.

De donde: potencia =  $V I$ ; potencia en la carga resistiva en watt y en las cargas inductiva, capacitiva en voltamperios reactivos. Además se toman los valores de los cuadros de las pruebas de carga que su producto es el mayor numericamente, y sin sobrepasar la corriente nominal del conductor, del que esta compuesto la armadura.

CUADRO 4.6.a

MONOFASICO

BOBINAS CARGA	9 y 10			13 y 14			15 y 16			17 y 18		
	S	V	I	S	V	I	S	V	I	S	V	I
R	8.64	9.50	0.91	10.66	26.00	0.41	12.32	61.60	0.20	21.74	103.50	0.21
L	7.65	8.80	0.87	7.36	23.00	0.32	8.94	44.70	0.20	21.20	111.60	0.19
C	17.55	19.50	0.90	80.10	89.00	0.90	240.30	270.00	0.89			

BIFASICO

GRUPOS CARGA	1,2,3o4			1 y 2 o 3 y 4			1,2,3y4		
	S	V	I	S	V	I	S	V	I
R	15.75	22.50	0.70	25.76	64.40	0.40	38.16	95.40	0.40
L	9.14	25.40	0.36	15.42	40.60	0.38	24.90	73.25	0.34
C	62.03	68.16	0.91	173.27	190.40	0.91	318.50	350.00	0.91

C A P I T U L O    V

-----

C O N C L U S I O N E S   Y   R E C O M E N D A C I O N E S

-----

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES.

- La presente tésis no tiene el propósito ni el objetivo de proporcionar un análisis matemático detallado, sino al contrario un análisis cualitativo a base de las pruebas realizadas en el laboratorio al prototipo. Cabe mencionar que no se dispuso de una bibliografía suficiente, lo que implica que se parte de conceptos generales y luego **estos**, enfocados al principio de generación de este tipo de generador ( se tiene un solo paper como referencia).
- El generador de reluctancia depende exclusivamente de la variación de la reluctancia del camino por donde circula el flujo creado por el bobinado de campo, y, más específicamente, de la variación del entrehierro en el tiempo, ya que la reluctancia en el núcleo es mucho menor comparativamente con la del entrehierro.

- Los bobinados de armadura y de campo deben estar u bicados en la parte fija de la máquina, o sea en el estator.
  
- Las configuraciones físicas tanto del estator como del rotor serán irregulares, es decir, no pueden ser cilíndricas. El estator será siempre de dos polos salientes. El rotor será de una configuración tal, que la variación del entrehierro de una variación del flujo en el tiempo que por ende dará un voltaje generado a terminales de la armadura. La forma de onda de voltaje depende de la forma física del rotor.
  
- Un generador de reluctancia es de mayor tamaño que los generadores convencionales, y esto se debe a las condiciones físicas que debe cumplir el circuito magnético; esta es una desventaja que tiene este tipo de generador, ya que uno de los propósitos en el estudio de nuevos tipos de generadores será el optimizar el tamaño.
  
- La velocidad sincrónica es menor que para el caso de las máquinas sincrónicas convencionales, y tiene un factor de dos de diferencia.
  
- Cada saliencia del rotor es la similitud de dos polos magnéticos de una máquina convencional.

-El voltaje a terminales de la armadura depende de la variación de la reluctancia entre el eje directo y el eje en cuadratura; es decir, si se analiza la fórmula que rige la generación de voltaje, se tiene que mientras mayor sea esta variación en el tiempo se obtendrá un mayor voltaje generado, por tanto el entrehierro presente entre el estator y el rotor debe ser lo mas mínimo en el eje directo y lo más grande en el eje en cuadratura.

-Se obtiene una mejor concatenación de flujo si las espiras que conforman la armadura están localizadas lo más próximas al camino de menor reluctancia. Se puede observar en los cuadros tabulados de las pruebas de vacío: es decir, mientras mayor número de espiras en la armadura, declina la linealidad de la generación de voltaje con respecto a las mismas; por consiguiente, se concluye que mientras más alejada se localice una espira, el flujo concatenado es mas débil; Un caso más latente es la prueba donde la bobina interna fue el campo y la bobina externa la armadura.

-La frecuencia es directamente proporcional a la velocidad.

-El voltaje generado es directamente proporcional a la velocidad.

- El voltaje generado es directamente proporcional al número de espiras del bobinado de armadura.
  
- El voltaje generado es directamente proporcional a la corriente de campo (Prueba de vacío).
  
- Los tres puntos anteriores nos afirman los efectos que tienen tanto la velocidad, como la corriente de campo y el número de espiras del bobinado de armadura frente al voltaje generado. Si se observa las curvas características de cada una de estas pruebas, se puede decir que es un efecto lineal. Cabe mencionar que la no linealidad de estas curvas es debido a que en la realidad en una máquina intervienen factores como son saturación del hierro en las esquinas, pérdidas en el núcleo principalmente, las mismas que tienen su efecto en el voltaje generado.
  
- Se comprobó en el laboratorio que el circuito de campo debe ser construido por un conductor de alambre de cobre de sección, lo mayor sea posible, ya que de esta manera se tiene una mejor distribución de flujo y por ende un voltaje generado mayor, en cuanto a valor se refiere.
  
- Se comprobó que se mejora tanto la forma de onda, como el valor de voltaje, cuando el caso monofásico está compuesto por dos grupos estator-rotor y cuyos rotos

- res esten desfasados por 180 grados eléctricos.
- El voltaje generado a terminales de la armadura cuando proviene de bobinados localizados en diferente grupo estator-rotor y además conectados en serie, resulta ser la suma de los voltajes parciales.
  - Los bobinados de campo pueden estar localizados a lo largo del circuito magnético, es decir no necesariamente en los polos salientes del estator.
  - + El rotor no posee ningún circuito eléctrico ni algo que lo reemplace.
  - +A diferencia de las máquinas convencionales este tipo de generador no posee elementos con rozamiento, es decir no tiene escobillas, lo cual constituye una ventaja, ya que no existen desgastes por la presencia de estos mecanismos.
  - Tanto en el estator como en el rotor va a circular un flujo que es función del tiempo, por tanto estos serán laminados, para así disminuir las pérdidas en el núcleo.
  - +El generador de reluctancia, de acuerdo a las pruebas de carga, se puede deducir que es de bajas potencias. Existe una pérdida de potencia por reacción de inducido.



- La reacción de inducido altera notablemente en el voltaje generado dependiendo de la carga. Con carga resistiva actúa como un flujo desmagnetizante y mas aún con carga inductiva; lo que no sucede con carga capacitiva que actúa como un flujo magnetizante. Este flujo desmagnetizante o magnetizante depende del número de espiras de la armadura, o sea mientras mayor número de espiras, mayor será el efecto de reacción de inducido o viceversa.
  
- El generador de reluctancia posee un pésima regulación de voltaje para cargas inductivas y resistivas y una muy buena regulación de voltaje para el caso con cargas capacitivas. La regulación mencionada es una desventaja ya que no podrá ser utilizada esta máquina para fines en donde el voltaje debe ser lo más constante posible, es decir en el medio común.
  
- +Este tipo de generador es de características de corrientes de campo altas, por consiguiente será indispensable poseer una gran fuente de corriente continua, que constituye una desventaja.
  
- Se comprobó que la forma de onda para el caso bifásico es la presentada teóricamente, lo que no sucede para el caso monofásico, el un semiciclo difiere del teórico.

- Cuando se alimenta al circuito de campo con corriente continua y no se introduce energía mecánica al eje de parte de una máquina motriz, y el desfasaje de los rotores es el indicado en la figura 2.1, se observa que al menor movimiento, el eje se desplaza, ya que los circuitos magnéticos buscan el camino de menor reluctancia. Se puede predecir que la máquina es reversible, es decir que también puede funcionar como motor y esto cuando se alimenta a <sup>(C.M.P.)</sup> la armadura con el voltaje bifásico correspondiente.

- No necesita una ventilación forzada; se puede ver que la forma de construcción de los rotores proporcionan la ventilación correspondiente.

- De acuerdo a las pruebas se puede deducir que por la gran caída de voltaje por reacción de inducido no se puede sacar grandes potencias eléctricas.

- Para los sistemas polifásicos, en cuanto al desfasaje, el rango es entre 0 y 180 grados eléctricos (90 grados mecánicos).

- Se comprobó que no existe la posibilidad de sobrecargarse debido a la reacción de inducido para cargas resistivas e inductivas, y lo contrario para cargas capacitivas. (depende del número de espiras de la armadura).
  
- En las formas de ondas observadas en al osciloscopío se pueden ver irregularidades, estas son debidas a las irregularidades presentes en el entrehierro (construcción).
  
- Las formas de onda tanto para el caso monofásico, como para el caso bifásico, se aproximan a las formas de ondas cuyos valores eficaces estan calculados en el apéndice seis.
  
- El generador de reluctancia debe ser una máquina robusta en cuanto a construcción mecánica se refiere, ya que existen fuerzas pulsantes durante el funcionamiento.
  
- La construcción se realizó a base de los materiales que pueden ser encontrados en nuestro país, es decir no se ha optimizado la construcción ni tampoo se hizo un análisis del tipo de materiales.
  
- En la construcción se siguió los criterios de los transformadores con lo que respecta a las áreas por

- donde circula el flujo.
- Las láminas con el fin de ser ensambladas con mayor facilidad y más compactas deben poseer guías.
  - Si el generador consta de más de un grupo estator-rotor se deberá tomar muy en cuenta el centrado y balanceado de los rotores y las características mecánicas del eje.
  - Al referirnos a los rotores se recomienda que las láminas posean el corte respectivo para la chaveta, esta condición hace que evite la rotación no deseada de los rotores durante el funcionamiento.
  - Las matrices mecánicas para el corte de las láminas deben ser mucho más robustas de las construídas para este prototipo investigativo. Estas características deben poseer ya que el material ferromagnético es de características mecánicas muy buenas.
  - Se incluyen planos de los troqueles, ya que estos sirvieron para la construcción de este prototipo y además fue necesario construirlos para efectuar los cortes de las láminas.
  - Se vió conveniente añadir el apéndice siete, porque contiene algunas referencias importantes que

pueden ser de interés para trabajos posteriores similares.

-Se comprobó que el rizado de la fuente de continua, no es notorio en cuanto al valor, frente al voltaje generado.

-Las pruebas monofásicas se realizó en todos los grupos estatóricos, y se obtuvieron similares resultados debido a esto se tomó en cuenta a un solo grupo, del cual se presentaron los valores.

-En la prueba realizada con baterías, no hay una variación notable con los valores de voltaje generados, cuando el campo es alimentado por una fuente de contiuna rectificada.

-En el apéndice 6 se tiene el cálculo del valor eficaz de tres formas de ondas, las mismas que son más aproximadas a las formas de ondas generadas. Comparando el valor medido con el calculado matemáticamente (no se adjunta estos valores, porque es una aproximación de la onda de voltaje generado) se concluye que el valor rms del voltaje si está dentro del rango real de acuerdo al concepto de valor eficaz de una onda.

-No se transcribe todos los valores porque: con carga capacitiva sobrepasa el voltaje permisible de la carga utilizada, y se toma en cuenta, los valores más significativos.

## 5.2 RECOMENDACIONES.

El enfoque ha sido más cualitativo que matemático; por tanto, se recomienda:

- Formulación y justificación matemática con lo que respecta al funcionamiento a doble frecuencia.
- Modelo matemático.
- Simulación digital.
- Análisis matemático del comportamiento de la distribución del flujo de inducido y de excitación, y con este la forma de onda gráfica real. Este procedimiento tanto para el caso de un solo grupo estator-rotor o varios.
- Estudio de otras formas y tamaños de rotores y además su optimización.
- Análisis de la sección del conductor del bobinado de campo versus el voltaje generado, para los casos: monofásico, bifásico.
- Estudio detallado tanto cualitativo como cuantitativo de la reacción de inducido.
- Definir las pruebas para determinar los parámetros

para el circuito equivalente.

- Un estudio particular de las formas de onda para el caso de cargas capacitivas.

- Un análisis de la forma de onda de voltaje para el caso monofásico de un solo grupo estator-rotor.

- Pruebas mecánicas de la resistencia del eje.

- Realizar el estudio y las pruebas correspondiente de la máquina de reluctancia funcionando como motor.

- Estudio de las formas de onda de la corriente de armadura bajo carga resistiva e inductiva (en cuanto a forma, sus diferencias, relación con respecto al entrehierro).

## APENDICE 1

### ABREVIATURAS

#### INSTRUMENTOS

$\text{\textcircled{A}}$  : amperímetro para corriente alterna.

$\text{\textcircled{A}}$  : amperímetro para corriente continua.

$\text{\textcircled{V}}$  : voltímetro para voltaje alterno.

$\text{\textcircled{V}}$  : Voltímetro para voltaje continuo.

$\text{\textcircled{\Omega}}$  : ohmetro.

ORC. : osciloscopio.

#### FUENTES

Vc.a. : fuente de corriente alterna.

Vc.c. : fuente de corriente continua.



## SIMBOLOGIA

Los símbolos de las ecuaciones desarrolladas en los capítulos, tienen las siguientes definiciones:

$F, f_{mm}$	fuerza magnetomotriz (A- $\varphi$ )
$\emptyset, \emptyset_1, \emptyset_2$	flujo magnético (wb)
$\emptyset_f$	flujo de excitación (wb)
$\emptyset_a$	flujo de inducido (wb)
$\emptyset_r$	flujo resultante (wb)
$\lambda$	concatenaciones de flujo (wb- $\varphi$ )
$\lambda_a$	concatenaciones de flujo en la armadura (wb- $\varphi$ )
$B$	densidad de flujo (wb/m <sup>2</sup> ), (Te)
$\lambda_f$	concatenaciones de flujo en el campo (wb- $\varphi$ )
$B_g$	densidad de flujo en el entrehierro (wb/m <sup>2</sup> ), (Te)
$H$	intensidad de campo (excitación específica) ((A- $\varphi$ )/m)
$H_g$	intensidad de campo en el entrehierro ((A- $\varphi$ )/m)
$H_c$	intensidad de campo en el hierro ((A- $\varphi$ )/m)
$R, R_1, R_2, R_3$	reluctancia ((A- $\varphi$ )/wb)
$R_{eq}$	reluctancia equivalente ((A- $\varphi$ )/wb)
$R_g$	reluctancia en el entrehierro ((A- $\varphi$ )/wb)
$R(t)$	reluctancia en función del tiempo ((A- $\varphi$ )/wb)
$R(\theta)$	reluctancia en función del espacio angular ((A- $\varphi$ )/wb)
$R_d$	reluctancia en el eje directo ((A- $\varphi$ )/wb)
$R_q$	reluctancia en el eje en cuadratura ((A- $\varphi$ )/wb)

$P$	permeancia ( $wb/(A-v)$ )
$P(t)$	permeancia en función del tiempo ( $wb/(A-v)$ )
$P(\theta)$	permeancia en función del espacio angular ( $wb/(A-v)$ )
$N$	número de espiras ( $e, v$ )
$N_a$	número de espiras en el circuito de armadura ( $e, v$ )
$N_f$	número de espiras en el circuito de campo ( $e, v$ )
$N_p$	número de espiras en el polo ( $e, v$ )
$N_T$	número de espiras totales ( $e, v$ )
$N_{me}$	número de espiras, máximo ( $e, v$ )
$L_{aa}$	inductancia propia de la armadura (H)
$L_{ff}$	inductancia propia del campo (H)
$L_{af}$	inductancia mútua entre la armadura y el campo (H)
$V_f$	voltaje de excitación (V)
$V_a$	voltaje de armadura (V)
$V_t, V_1, V_2$	voltaje terminal (V)
$v$	voltaje instantáneo (V)
$V_{\dot{p}\dot{p}}$	voltaje pico - pico (V)
$V_{rms}$	voltaje rms (v)
$e$	voltaje generado (V)
$e_a$	voltaje generado en la armadura (V)
$e_f$	voltaje generado en el campo (V)
$e_r, E_r$	voltaje generado de reluctancia (V)
$E_e$	voltaje a terminales de un generador en una barra infinita (V)
$J$	densidad de corriente ( $A/m^2$ )
$I$	corriente (A)

$I_N$	corriente nominal (A)
$I_a$	corriente de armadura (A)
$I_f$	corriente de campo (A)
$I_f(t)$	corriente de campo en función del tiempo (A)
$I_{rms}$	corriente rms (A)
$I_{pp}$	corriente pico - pico (A)
$i$	corriente instantánea (A)
$R$	resistencia ( $\Omega$ )
$R_1$	resistencia ( $\Omega$ / 1000 pies)
$R_{VA}$	resistencia medida por el método voltímetro - amperímetro ( $\Omega$ )
$R_\Omega$	resistencia medida con el ohmetro digital ( $\Omega$ )
$R_{TA}$	resistencia calculada por tablas ( $\Omega$ )
$R_f$	resistencia de campo ( $\Omega$ )
$R_a$	resistencia de armadura ( $\Omega$ )
$R_r$	resistencia de reluctancia ( $\Omega$ )
$X$	inductancia ( $\Omega$ )
$X_r$	inductancia de reluctancia ( $\Omega$ )
$X_d$	inductancia en el eje directo ( $\Omega$ )
$X_q$	inductancia en el eje en cuadratura ( $\Omega$ )
$X_e$	inductancia por fase ( $\Omega$ )
$f$	frecuencia (Hz)
$T$	período (s)
$\omega$	velocidad angular (rad/s)
$\omega_m$	velocidad mecánica (rad/s)
$\omega_r$	velocidad de reluctancia (rad/s)
$n$	velocidad sincrónica de las máquinas convencionales (r.p.m.)

$n_r$	velocidad sincrónica del generador de reluctancia (r.p.m.)
$W_a$	pérdidas en el cobre de la armadura (watt)
$W_f$	pérdidas en el cobre de la bobina de campo (watt)
$W_{reos}$	pérdidas en el reóstato del circuito de campo (watt)
$g$	entrehierro
$g(\theta)$	entrehierro en función del espacio angular
$\mu_0$	permeabilidad del vacío ( $(T_e/(A \cdot m))$ )
$\mu$	permeabilidad del hierro ( $(T_e/(A \cdot m))$ )
$l$	longitud
$s, S$	superficie
$S(t)$	superficie en función del tiempo
$S(\theta)$	superficie en función del espacio angular
$l_{ae}$	longitud aproximada por espira
$l_a$	longitud del bobinado
$l_m$	longitud media
$d$	diámetro
$d_2$	diámetro del bobinado más exterior
$d_1$	diámetro del bobinado más interior
$V_e$	escala vertical
$V_{ef}$	escala vertical de voltaje
$V_{eI}$	escala vertical de corriente
$H_o$	escala horizontal
$RE$	relación en la escala del osciloscopio con respecto al eje de referencia (voltaje)
$REI$	relación en la escala del osciloscopio

con respecto al eje de referencias (corriente)

A	amperios
V	voltios
P	polos
$P_r$	polos del generador de reluctancia
$\theta_e$	grados eléctricos
$\theta_m$	grados mecánicos
$\theta_r$	grados de reluctancia
$\Omega$	ohmios
$\mu_r$	permeabilidad relativa
e, v	espiras
ESp	espesor del polo
G	gauss
H	hendrios
$H_z$	hertz
Mx	maxwell
s	segundo
ms	milisegundo
wb	weber
Te, T	tesla
rad	radiales
$NU_c$	número de capas del bobinado
$NU_{c1}$	número de capas del bobinado más interior
$NU_{c2}$	número de capas del bobinado más exterior
Nec	número de espiras por capa
m	metro
cm	centímetro

CONSTANTES Y FACTORES DE CONVERSION

$$1 \text{wb} = 10^8 \text{ líneas ( mx)}$$

$$1 \text{Te} = 1 \text{wb}/\text{m}^2 = 10^4 \text{G}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{Te}/\text{Av. m})$$

$$1 \text{wb} = \text{Vs}$$

$$2000 < \mu_r < 6000$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$1 \text{Te} = \text{Vs}/\text{m}^2 = 10^{-4} \text{Vs}/\text{cm}^2$$

APENDICE 2.

T A B L A P A R A A L A M B R E S D E C O B R E

# AWG	DIAMETRO (mm)	SECCION (mm <sup>2</sup> )	PESO (g/m)	CORRIENTE A J=(2.8 A/mm <sup>2</sup> )
0	8.2519	53.4814	476.0000	149.7480
1	7.3485	42.4126	377.4782	118.7553
2	6.5440	33.6347	299.3483	94.1770
3	5.8276	26.6734	237.3896	74.6856
4	5.1896	21.1530	188.2550	59.2283
5	4.6215	16.6750	149.2903	46.9701
6	4.1156	13.3032	118.3904	37.2489
7	3.6650	10.5499	93.8861	29.5397
8	3.2638	8.3664	74.4537	23.4260
9	2.9065	6.6349	59.0434	18.5776
10	2.5883	5.2617	46.8227	14.7327
11	2.3049	4.1727	37.1314	11.6835
12	2.0526	3.3091	29.4460	9.2654
13	1.8279	2.6242	23.3513	7.3478
14	1.6278	2.0811	18.5181	5.8271
15	1.4496	1.6504	14.6852	4.6211

Continuación: Cuadro Apéndice 2.

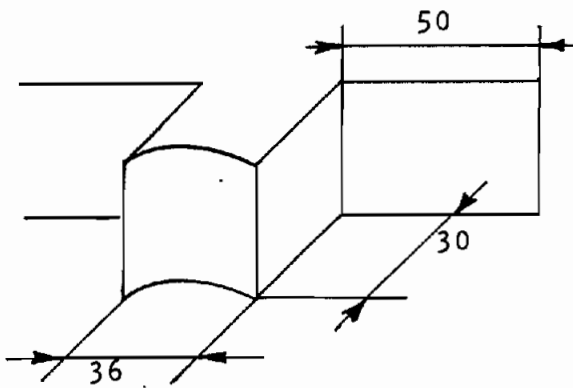
16	1.2909	1.3038	11.6457	3.6647
17	1.1495	1.0379	9.2353	2.9062
18	1.0237	0.8231	7.3238	2.3047
19	0.9116	0.6528	5.8079	1.8277
20	0.8118	0.5177	4.6058	1.4494
21	0.7229	0.4105	3.6525	1.1495
22	0.6438	0.3256	2.8965	0.9116
23	0.5733	0.2581	2.9969	0.7229
24	0.5105	0.2047	1.8215	0.5732
25	0.4546	0.1623	1.4445	0.4546
26	0.4049	0.1287	1.1455	0.3605
27	0.3605	0.1021	0.9084	0.2859
28	0.3211	0.0809	0.6204	0.2267
29	0.2859	0.0642	0.5713	0.1798
30	0.2546	0.0509	0.4530	0.1426
31	0.2267	0.0403	0.3592	0.1130
32	0.2019	0.0320	0.2849	0.0896
33	0.1798	0.0254	0.2259	0.0611
34	0.1601	0.0201	0.1791	0.0564
35	0.1426	0.0159	0.1420	0.0447
36	0.1270	0.0126	0.1126	0.0354
37	0.1131	0.0100	0.0893	0.0281
38	0.1007	0.0079	0.0708	0.0223



### APENDICE 3

RESISTENCIA ( $\Omega$  / 1000 pies) y  
NUMERO DE ESPIRAS TEORICO EN EL ESTATOR.

Para el cálculo del número de espiras se toma las siguientes dimensiones y ecuaciones.



$$N_{ec} = \frac{30}{d}$$

$$NU_c = \frac{50}{d}$$

$$N_{me} = N_{ec} \times NU_c$$

De donde:  $N_{me} = (30) (50) / d^2$  (números enteros)

CUADRO 3.A

# AWG	R $\Omega$ /1000 pies	Nme
8	0.63	140.00
9	0.79	177.00
10	1.00	223.00
11	1.26	282.00
12	1.59	356.00
13	2.00	448.00
14	2.58	566.00
15	3.26	713.00
16	4.07	900.00
17	5.22	1,135.00
18	6.59	1,431.00
19	8.14	1,804.00
20	10.30	2,275.00
21	13.00	2,869.00
22	16.40	3,618.00
23	20.70	4,563.00
24	26.20	5,753.00
25	33.00	7,255.00

Continuación:

26	41.70	9,149.00
27	52.50	11,536.00
28	66.40	14,548.00
29	83.10	18,344.00
30	106.00	23,131.00
31	134.00	29,169.00
32	165.00	36,782.00
33	210.00	46,378.00
34	266.00	58,484.00
35	338.00	73,744.00
36	424.00	93,000.00
37	522.00	117,264.00
38	659.00	147,863.00
39	864.00	186,477.00
40	1,103.00	235,138.00

CALCULO DE LA LONGITUD DE LOS BOBINADOS

Longitud por espira

Para que éste cálculo sea lo más próximo a la realidad, debido a que dependiendo del número de capas va a ser la longitud de la espira y más aún, mientras más alejada del núcleo, ésta tiende a redondearse. La longitud por espira es aquella que sigue un recorrido cuadrado alrededor del núcleo en la última capa del bobinado.

$$\text{Bobina interior } l_{ae} = 4(36 + NU_{c1}d_1)$$

$$\text{Bobina exterior } l_{ae} = 4(36 + NU_{c1}d_1 + NU_{c2}d_2)$$

$NU_{c1}$  número de capas de la bobina más interna

$NU_{c2}$  número de capas de la bobina más externa

$d_1$  diámetro de la bobina más interna

$d_2$  diámetro de la bobina más externa

NOTA: El diámetro ver en el apéndice dos.

Longitud del bobinado

$$L_a = N_T L_{ae}$$

CUADRO 4.B

BOBINADO	AWG #	$N_T$ (e)	$NUc_b$	$l_{ae}$ (mm)	$l_a$ (mm)	BOBINAS
Armadura	22	200	5	156.80	31360	9 y 10
Campo	15	160	8	201.04	32166	
Armadura	22	200	5	156.80	31360	11 y 12
Campo	15	160	8	188.24	30118	
Armadura	22	700	15	182.40	127680	13 y 14
Campo	15	160	8	226.64	36262	
Armadura	22	1400	30	220.80	309120	15 y 16
Campo	15	160	8	265.04	42406	
Armadura	22	3000	64	307.84	923520	17 y 18
Campo	15	320	16	400.00	128000	
Armadura	22	700	15	182.22	127554	19 y 20
Campo	22	800	18	228.48	182784	

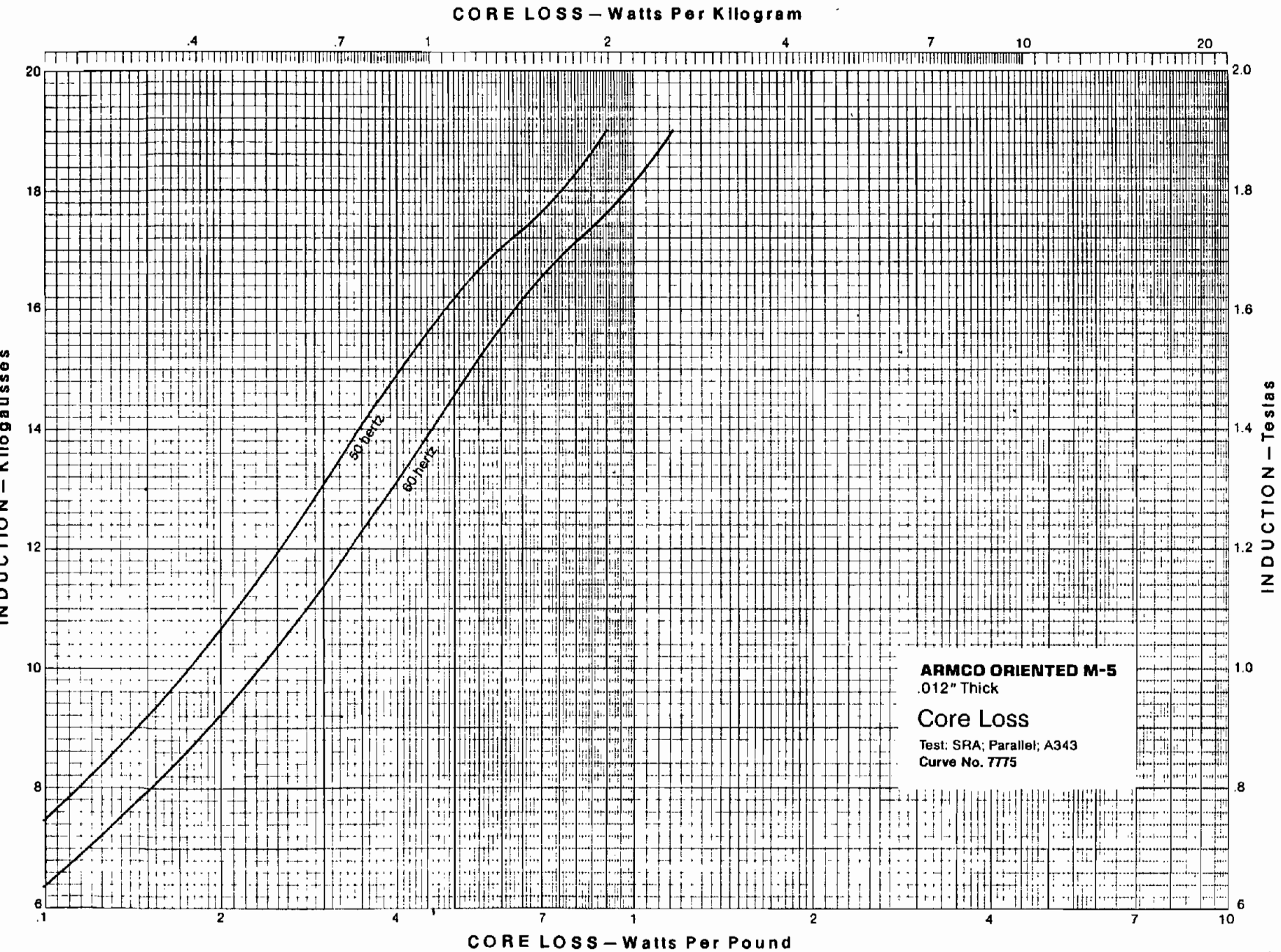
$$NUc_b = \frac{N_p}{N_{ec}}$$

## APENDICE 5

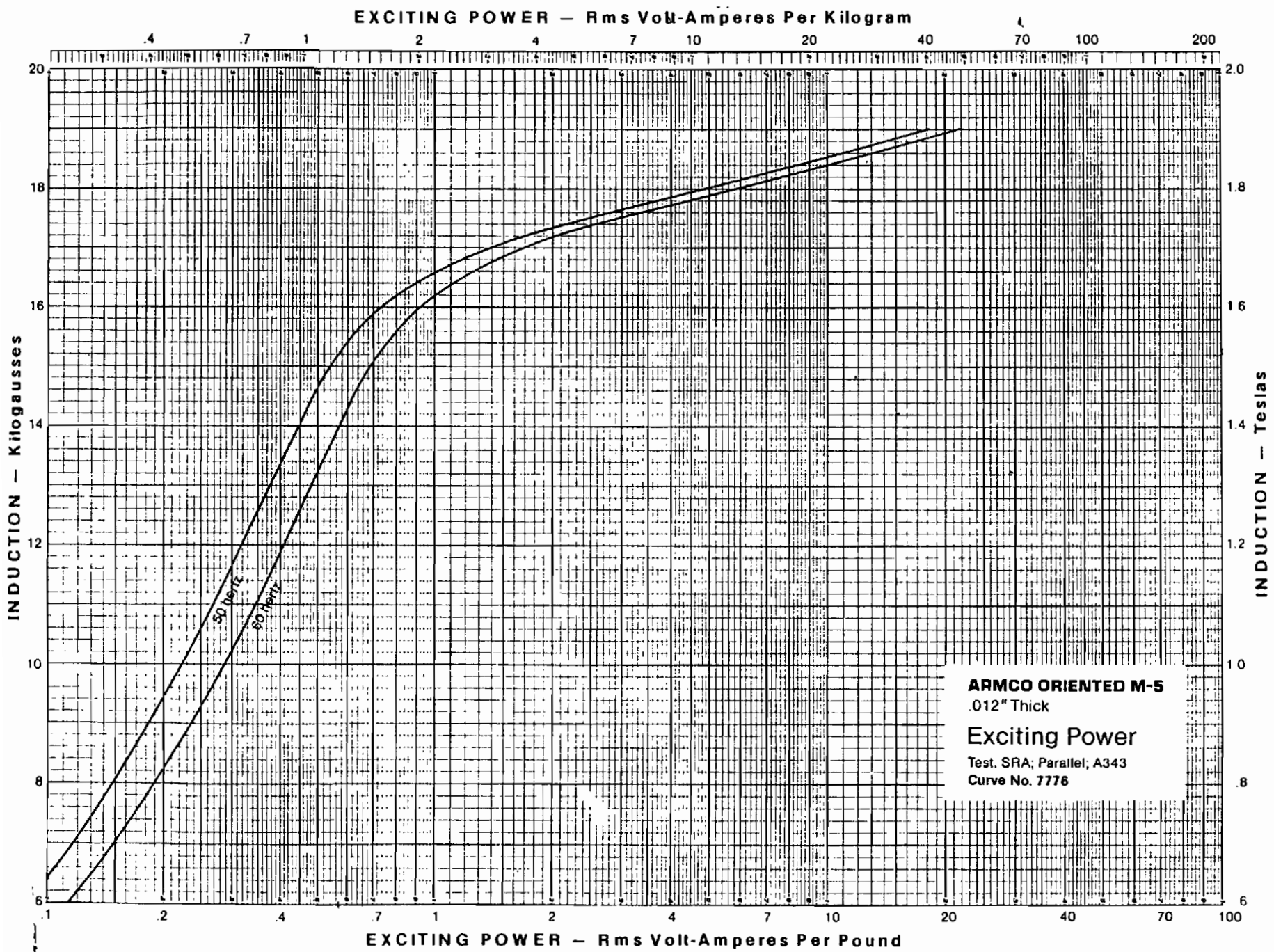
Curvas características de las láminas del material ferromagnético para la construcción del generador de reluctancia.

La primera curva da las pérdidas en el cobre en función de la inducción magnética.

La segunda curva da la potencia de excitación en función de la inducción magnética.



PERDIDAS EN EL COBRE (Watts por Kilogramo)



**ARMCO ORIENTED M-5**  
012" Thick  
**Exciting Power**  
Test. SRA, Parallel, A343  
Curve No. 7776

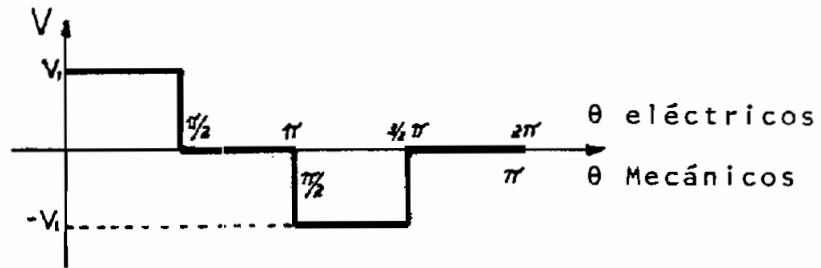


CALCULO DEL VALOR EFICAZ DE LA ONDA

Por definición:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt}$$

a) Forma de onda



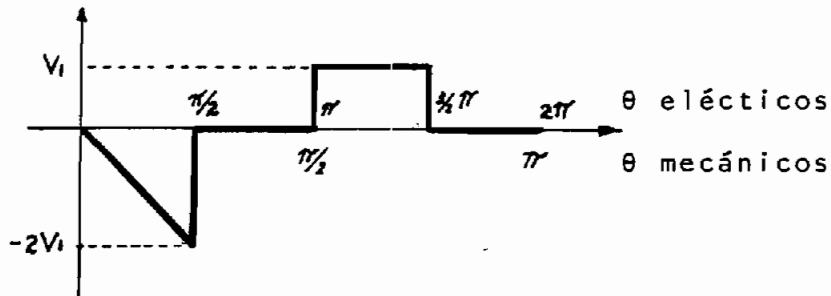
$$f(t) = \begin{cases} V_1 & ; \quad 0 > \theta > \pi/2 \\ 0 & ; \quad \pi/2 > \theta > \pi \\ -V_1 & ; \quad \pi > \theta > 3/2 \pi \\ 0 & ; \quad 3/2 \pi > \theta > 2 \pi \end{cases}$$

Desarrollando el valor eficaz será:

$$\begin{aligned} V_{ef} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} V_1^2 dt + \int_{\pi}^{3/2\pi} V_1^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ V_1^2 \frac{\pi}{2} + V_1^2 \frac{3\pi}{2} - V_1^2 \pi \right]} \end{aligned}$$

$$V_{ef} = \frac{V_1}{\sqrt{2}}$$

b) Forma de onda



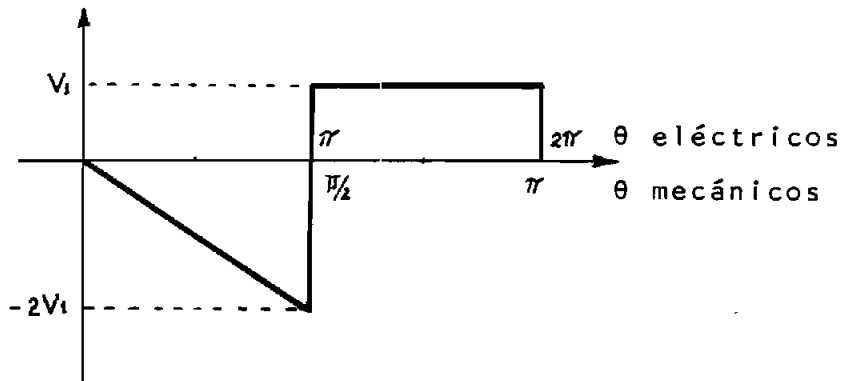
$$f(t) = \begin{cases} -\frac{2(2V_1)}{\pi} t & ; & 0 > \theta > \frac{\pi}{2} \\ 0 & ; & \frac{\pi}{2} > \theta > \pi \\ V_1 & ; & \pi > \theta > \frac{3\pi}{2} \\ 0 & ; & \frac{3\pi}{2} > \theta > 2\pi \end{cases}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{16}{\pi^2} V_1^2 t^2 dt + \int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}} V_1^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \frac{16}{\pi^2} V_1^2 \left( \frac{\pi^3/8}{3} \right) + V_1^2 \frac{3\pi}{2} - V_1^2 \frac{2\pi}{2} \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{7}{12}} V_1$$

c) Forma de onda



$$f(t) = \begin{cases} -\frac{1}{\pi} (2V_1) t & ; \quad 0 > \theta > \pi \\ V_1 & ; \quad \pi > \theta > 2\pi \end{cases}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{4}{\pi^2} V_1^2 t^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi} V_1^2 dt}$$

$$= V_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \frac{4}{\pi^2} \pi^3/3 + 2\pi - \pi \right]}$$

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{7}{6}} V_1$$

## APENDICE 7

### CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

a) Fechas de construcción:

Octubre 1983 - Agosto 1984. Construcción de las matrices mecánicas.

Septiembre 1984 - Noviembre 1984. Armado y construcción de las partes mecánicas.

Diciembre 1984 - Enero 1985. Bobinas (armado y rebobinaje).

b) Personas que intervinieron en la construcción:

Matrices mecánicas. Ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional (Sr. Vicente Sebastián).

Troquelado de las láminas. HESIAN C. Ltda. (Sr. Vicente Sebastián).

Láminas ferromagnéticas. ECUATRAN.

Construcción mecánica y armado. RODALTA (Sr. Marco Rueda).

Tratado térmico. Distribuidora SUTEIN C.A.

Cojinetes. Distribuidora de rulimanes NIVIMAR C. Ltda.

c) Materiales:

Aceros. DF2, Transmisión, ST37.

Cojinetes.

Láminas de material ferromagnético.

Mica.

d) Direcciones:

Aceros. Iván Bohman. 10 de Agosto 5953, Quito.

Cojinetes. Av. América N°3672 - A (frente al teatro San Gabriel) Quito.

Tratado técnico. Panamericana Norte Km.5 1/2.

Construcciones mecánicas. Panamericana Norte en Carretas.

Láminas ferromagnéticas. Km. 7 1/2 vía Guaranda.

Troquelado. Occidental San Carlos, Quito.

e) Precios:

Los precios que se indican, son sin tomar en cuenta las láminas ferromagnéticas que fueron donadas por ECUATRAN, y además, no están incluidos ciertos precios adicionales de algunos materiales que fueron necesarios durante la construcción. Cabe mencionar que el rebobinado se lo realizó en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Los precios aproximados son:

Aceros 25.000 sucres; el precio de construcción de las matrices no está tomado en cuenta ya que se realizó en la Facultad de Ingeniería Mecánica (E.P.N.).

Troquelado 15,00 sucres cada corte que da un total de 15.000,00 sucres.

Armado, centrado, construcción de los apoyos, construcción de la base, construcción del eje. 25.000,00 sucres.

Conductor para las bobinas 20.000,00 sucres.

Que dá un precio total aproximado de 85.000,00 sucres.

## BIBLIOGRAFIA

1. KOCH W.H., NASAR S.A., "A NEW TWO-PHASE RELUCTANCE FOR D.C. LOADS", PES. IEEE. paper. T.74.215-0, New York, Enero 27 - Febrero 1-1974, pp1449-1455.
2. FITZGERALD A.E., KINGSLEY C.Jr., KUSTCO A., "ELECTRICAL MACHINERY", McGraw-Hill, Third Edition, New York, 1971.
3. KOSOW Irving L. PH.D, "MAQUINAS ELECTRICAS Y TRANSFORMADORES", Reverte S.A., Barcelona, 1980.
4. THALER G.J., WILCOX M.L., "MAQUINAS ELECTRICAS", Limusa, México, primera edición, 1974.
5. CORRALES Martín Juan, "CALCULO INDUSTRIAL DE MAQUINAS ELECTRICAS", Vol. II, Marcombo S.A., Barcelona, 1982.
6. "MAQUINAS ELECTRICAS", Apuntes I. II. III., Escuela Politécnica Nacional, 1983 - 1984.
7. SLAYMAKER R.R., "DISEÑO Y ANALISIS DE ELEMENTOS DE MAQUINAS", Limusa-Wiley S.A., México, 1969.
8. ALDAZ A. Ernesto G., "SINTESIS NORMAS DE DIBUJO INDUSTRIAL", Quito, 2da. edición.

9. "CODIGO DE DIBUJO TECNICO-MECANICO", INEN, Quito, 1981.