

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CUANDO ES ALIMENTADO A TRAVES DE TIRISTORES CON VARIACIONES DEL ANGULO DE DISPARO"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

GUSTAVO LUIS GONZAGA TAMA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.982

AGRADECIMIENTO

Al Ing. MARCO AGILA AGILA, Director de Tesis, por su ayuda y colaboración en la realización de este trabajo.

Al Ing. Milton TOAPANTA, y a los señores Alberto MANZUR, Leonardo BARZALLO y Alberto LARCO, que de una u otra forma ayudaron a la culminación de esta tesis.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA DEL LITORAL
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
BIBLIOTECA

Inv. No. DOT-025

DEDICATORIA

A MI PADRE

A MI MADRE

A MI HERMANO

A MI ESPOSA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA DEL LITORAL
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
BIBLIOTECA

Lav. No. DOT-025



ING. MARCO AGILA AGILA
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas ex
puestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y,
el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPE
RIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ES
POL).



GUSTAVO LUIS GONZAGA TAMA

RESUMEN

En este trabajo se hace un estudio sobre el comportamiento de un motor c.c. alimentado desde una fuente de corriente alterna monofásica a través, primero, de un rectificador controlado de media onda, y luego de un rectificador de onda completa y de un tiristor.

Se han realizado pruebas de un motor c.c., con los dos tipos de rectificadores indicados, para diferentes ángulos de disparo del tiristor.

Después de hacer un análisis de los efectos producidos en el motor alimentado con los dos tipos de rectificadores, se dan a conocer las diferentes ventajas e inconvenientes del uso de cada uno.

.....

INDICE GENERAL

	PAGS.
RESUMEN-----	VI
INDICE GENERAL-----	VII
INDICE DE FIGURAS-----	XII
INDICE DE TABLAS-----	XIV
INDICE DE CURVAS -----	XVI
INDICE DE OSCILOGRAMAS-----	XIX
INTRODUCCION-----	21
CAPITULO 1	
1. PRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS GENERALES DE UN <u>MO</u> <u>TOR DE CORRIENTE CONTINUA EN ESTADO ESTABLE</u> -----	23
1.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LOS MOTORES c.c.-----	23
1.2. COMPORTAMIENTO MECANICO DE UN MOTOR c.c.-----	29
1.2.1. Característica mecánica de eléctrico $C_m =$ $f(n)$ -----	30
1.2.2. Característica de velocidad $n = f(I)$ -----	34
1.2.3. Característica de par $C_m = f(I)$ -----	36
1.2.4. Característica de rendimiento $\eta = f(I)$ -----	39
1.3. ARRANQUE DE UN MOTOR c.c.-----	40
1.4. REGULACION DE VELOCIDAD-----	42

CAPITULO 2

2. DISPOSITIVOS ELECTRONICOS-----	44
2.1. GENERALIDADES-----	44
2.1.2. Principios Físicos de Funcionamiento-----	46
2.1.3. Característica estática-----	49
2.1.4. Característica de puerta-----	52
2.1.5. Protección -----	54
2.1.6. Métodos de Control -----	57
2.2. CIRCUITO DE DISPARO-----	58

CAPITULO 3

3. ANALISIS DE LOS FENOMENOS PRODUCIDOS EN EL MOTOR DURANTE EL PERIODO DE ARRANQUE Y SU FUNCIONAMIENTO EN ESTADO ESTABLE DEBIDO A LA VARIACION DEL DEL ANGULO DE DISPARO θ DEL TIRISTOR; CUANDO FUNCIONA EN VACIO, A 25, 50,100 Y 125% DE SU CORRIENTE NOMINAL-----	65
3.1. MOTOR ALIMENTADO CON FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA (c.c.)-----	65
3.1.1. Análisis en el período de arranque del motor c.c.-----	69
3.1.2. Análisis del motor en estado estable -----	69

3.1.2.1. Curva Característica del Par $C_m = f(I)$ -----	75
3.1.2.2. Curva Característica mecánica $C_m = f(U)$ -----	78
3.1.2.3. Curva Característica de rendimiento $\eta = f(I)$ -----	80
3.1.2.4. Curva Característica de voltaje promedio de alimentación-corriente de armadura $U = f(I)$ -----	82
3.2. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CONTROLADO POR ACCION - SOBRE ARMADURA DESDE UNA FUENTE ALTERNA MONOFASICA A TRAVES DE UN TIRISTOR-----	82
3.2.1. Análisis en el período de arranque del motor	82
3.2.2. Análisis del motor en estado estable-----	99
3.2.2.1. Curva Característica del par $C_m = f(I)$	116
3.2.2.2. Curva Característica mecánica $C_m = f(U)$	125
3.2.2.3. Curva Característica de rendimiento $\eta = f(I)$ -----	129
3.2.2.4. Curva Característica de voltaje de alimentación-corriente de armadura $U = f(I)$ -----	135

3.3. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CONTROLADO POR ACCION SOBRE ARMADURA DESDE UNA FUENTE ALTERNA MONOFASI- CA A TRAVES DE UN PUENTE RECTIFICADOR DE ONDA COM- PLETA Y UN TIRISTOR-----	137
3.3.1. Análisis en el período de arranque del mo- tor-----	137
3.3.2. Análisis del funcionamiento del motor en es- tado estable -----	154
3.3.2.1. Curva Característica del par $C_m = f(I)$	174
3.3.2.2. Curva Característica mecánica $C_m =$ $f(n)$ -----	181
3.3.2.3. Curva Característica de rendimien- to $\eta = f(I)$ -----	185
3.3.2.4. Curva Característica de voltaje de Alimentación-corriente de armadura $U = f(I)$ -----	191
CAPITULO 4	
4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DOS METODOS EXPUESTOS-----	193
4.1. ARRANQUE DEL MOTOR-----	193
4.2. FUNCIONAMIENTO EN ESTADO ESTABLE-----	193
4.2.1. Curva Característica del par $C_m = f(I)$ -----	193

Inv. No. 707-025

4.2.2. Curva Característica Mecánica $C_m = f(n)$ -----	195
4.2.3. Curva Característica de rendimiento $\eta = f(I)$	196
4.2.4. Curva Característica del voltaje promedio de alimentación-Corriente de Armadura $U = f(I)$ --	197
4.3. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS OSCIOGRAMAS -----	198
4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DOS METODOS-----	199
4.4.1. Ventajas del uso de rectificación de media - onda para alimentación de un motor c.c.-----	199
4.4.2. Desventajas-----	200
4.4.3. Ventajas del uso del rectificador de onda com pleta para alimentación de un motor c.c., con respecto al suministro con rectificación de media onda -----	201
4.4.4. Desventajas -----	202
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	204
1. CONCLUSIONES-----	203
2. RECOMENDACIONES-----	206
ANEXOS -----	208
BIBLIOGRAFIA -----	241

INTRODUCCION

La aparición del tiristor (SCR), entre los elementos semiconductores de estado sólido es uno de los pasos más importantes en el desarrollo del control eléctrico, de las dos últimas décadas.

Del acoplamiento del tiristor con las máquinas eléctricas rotativas resulta un conjunto técnico-económico muy versátil en la industria moderna.

Los sistemas de mando de los motores c.c., caen dentro de dos categorías:

1. Los que proporcionan un voltaje fijo.
2. Los que proporcionan un voltaje variable.

Estos pueden ser fuentes de poder estática o rotativas.

Los sistemas de alimentación de voltaje c.c. se los encuentra en ferrocarriles, navíos, en algunos aeroplanos y en plantas industriales.

El costo, las pérdidas y el espacio requerido son las desventajas -

frente a las ventajas tales como inversión de giro, frenado re generativo, onda suave de corriente y capacidad de sobrecarga - de las fuentes de poder rotativas.

Los sistemas de mando de estados sólidos para motores c.c. ofrecen ventajas tales como bajo costo, pequeño espacio físico y am plio rango de control; además, estos sistemas son comercialmente convenientes para todos los voltajes normalizados, potencias y regulaciones requeridas.

En vista de lo expuesto se realizó el presente trabajo.

CAPITULO 1

1. PRESENTACION DE LAS CARACTERISTICAS GENERALES DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA EN ESTADO ESTABLE.

1.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LOS MOTORES DE C.C.

Es conveniente resumir dos partes que son de interés, la primera que corresponde a las partes constitutivas del motor y la segunda que tiene relación con su clasificación. Todo esto ayuda a derivar las expresiones que gobiernan el comportamiento de la máquina en estado estable.

Un motor de c.c. consiste en dos estructuras magnéticas denominados inductor e inducido (armadura).

El inductor está incorporado a la parte fija de la máquina (carcaza) formando los polos norte y sur alternativamente (polos inductores); éstos están constituidos por un núcleo magnético de hierro y el arrollamiento conductor (arrollamiento de excitación) por el cual pasa la corriente de excitación.

El inducido que es por lo general la parte móvil, está forma-

do por chapas magnéticas de hierro, conductores de los arrollamientos conectados entre sí en bobinado cerrado y por el colector conectado a los conductores en cada delga, el cual cumple con la función de transformar una corriente continua externa aplicada a través de escobillas en corriente alterna interna.

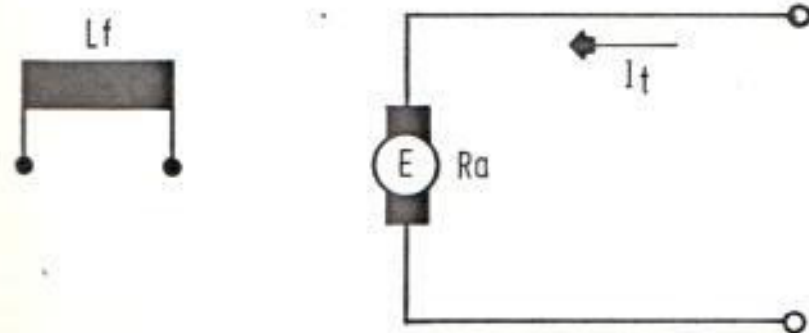
Los motores de corriente continua se pueden clasificar en dos grupos:

- a. Motores de excitación independiente, cuyos devanados de excitación son alimentados por una fuente de c.c. externa, figura 1.
- b. Los motores autoexcitados, en los cuales la misma máquina produce su propia excitación, figura 2.

Es evidente que una dínamo puede funcionar como motor eléctrico, siendo capaz de asumir un movimiento de rotación - en sentido opuesto al de la misma máquina funcionando como generador, a igual dirección de flujo inductor y de corriente en el inducido.

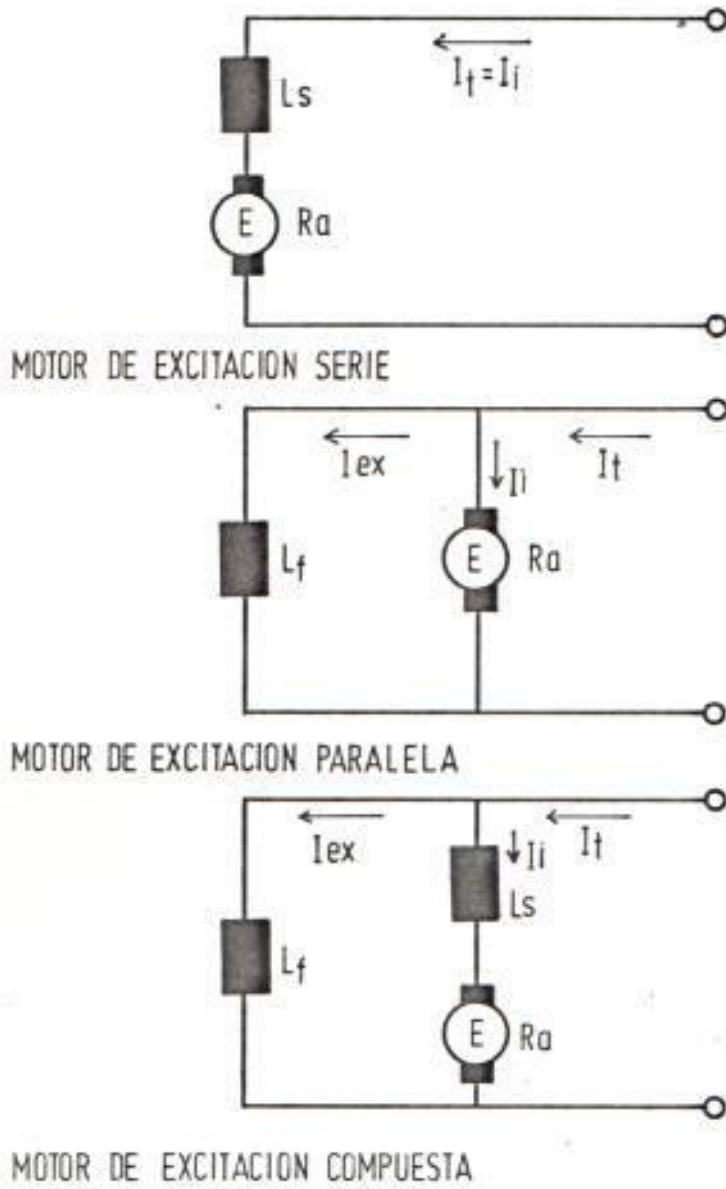
en cualquier caso, para obtener la inversión del movimiento

FIGURA N° 1



MOTOR DE EXCITACION INDEPENDIENTE

FIGURA N° 2



habrá que invertir la corriente, o en el rotor, o en el estator, siendo el primero el método más conveniente.

Si el rotor gira con la velocidad de n vueltas por minuto, mientras el campo está excitado, en el mismo, se genera por inducción una fuerza electromotriz E , cuya expresión está dada por:

$$E = \frac{PN}{60a} n\phi \quad (1)$$

Es decir:

$$E = K_1 n\phi$$

Siendo:

N = número de conductores uniformemente distribuidos sobre la periferia del inducido.

ϕ = Flujo de cada polo (weber)

P = Número de pares de polos

a = Número de pares de ramales en paralelo del inducido; arrollamiento imbricado $a = p$, arrollamiento ondulado $a = 1$.

n = Velocidad en r.p.m. a que gira el inducido.

Se nota que la f.e.m. E es proporcional al flujo y a la veloci

dad angular de la armadura.

Realmente, debido a que la rotación es en sentido opuesto al que se necesita para producir en la misma máquina una tensión acorde con la corriente que recorre al motor, se deduce que dicha E tiene carácter de f. contra e.m. con respecto a la tensión U aplicada al motor para su alimentación. Si r_a es la resistencia del rotor medida entre las escobillas la corriente de inducido será:

$$I = \frac{U - E}{r_a} \quad (2)$$

El par electromagnético C_e que crean dicha corriente y el campo inductor estará dado por:

$$C_e = \frac{PN}{2\pi a} \Phi \cdot I \quad (3)$$

Siendo I la corriente de inducido dada por la expresión (2). La potencia correspondiente a este par, es igual al producto $E \cdot I$, osea parte de la potencia eléctrica suministrada al rotor, más precisamente, a aquella que es absorbida por la f.c.e.m. inducida E , de acuerdo a la ley general que rige las transformaciones de energía eléctrica en energía mecánica.

De (2) obtenemos la relación:

$$U.I = E.I. + r_a I^2 \quad (4)$$

Que indica, que la potencia mecánica antedicha difiere de la potencia eléctrica $U.I$ suministrada al rotor, en el término $r_a I^2$ correspondiente al calor desarrollado en el mismo rotor por efecto Joule.

La relación entre $E.I.$ y $U.I.$ mide lo que se puede llamar rendimiento eléctrico del rotor del cual se hablará luego.

1.2. COMPORTAMIENTO MECANICO DE UN MOTOR C.C.

El estudio del comportamiento mecánico de un motor eléctrico se lo puede hacer a partir de las expresiones (1), (2) y (3): las relaciones de dos elementos mecánicos tales como velocidad angular y par motor en función de los elementos eléctricos, y luego ver como varían unos con respecto a otros.

En la expresión (3), llamando K_2 á:

$$K_2 = \frac{PN}{2\pi a}$$

y teniendo en cuenta el valor de I en la expresión (2), tenemos:

$$C_m = K_2 \phi I = K_2 \frac{U - E}{r_a} \quad (5)$$

fórmula en la que conociendo el flujo ϕ se puede determinar el par C en función de U y de E .

Además, de (1) se deduce que el número de vueltas del motor por minuto n es proporcional a la relación entre E y ϕ .

$$n = \frac{60a E}{PN \phi} = K \frac{E}{\phi} \quad (6)$$

Entonces, es evidente, que el par, en general, resulta variable con la velocidad.

1.2.1. Característica mecánica de un motor eléctrico $C_m = f(n)$

Interesa estudiar el comportamiento de la curva que presenta dicha variación. En general un motor funciona dentro de la condición de estabilidad cuando - cualquier cambio que sufran las variables que fijan su régimen provoca una reacción que tiende a resta-

blecer el régimen de marcha normal.

Tomando en cuenta que en régimen de marcha normal se tiene:

Par motor = Par resistente, $C_m = C_r$ y,

$$C_m - C_r = 0 \quad (7)$$

en la figura # 3, se indica P al punto de funcionamiento del motor,

El funcionamiento estable se da en las siguientes condiciones:

a. Una deceleración da lugar a:

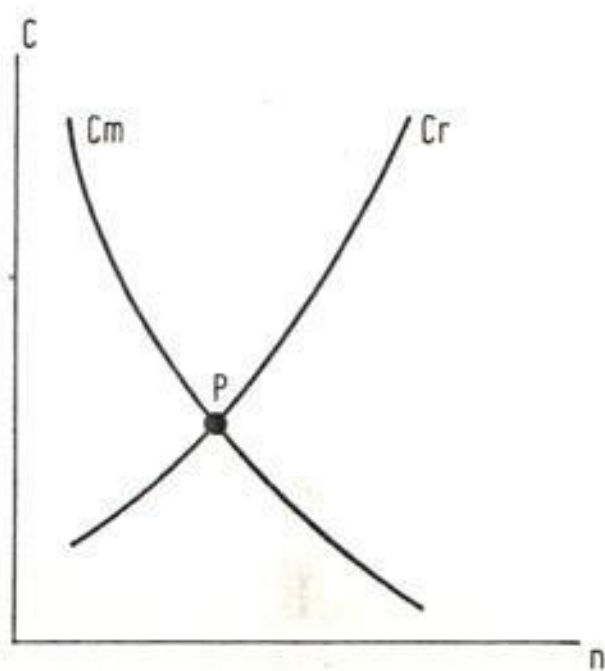
$$C_m - C_r > 0$$

b. Una aceleración dá lugar a:

$$C_m - C_r < 0$$

En cada una de éstas existe una reacción que actúa en sentido de llevar al motor a su velocidad primitiva o sea al régimen de marcha normal:

FIGURA N° 3



CARACTERISTICA MECANICA DE UN MOTOR C.C.

$$C_m - C_r = 0$$

Se sabe que las características $C_r = f(n)$ de las máquinas accionadas son por lo general crecientes, entonces, se dice que el motor tiene un régimen de marcha normal estable porque cuando hay una deceleración existe un aumento de su par motor.

Matemáticamente se denomina grado de estabilidad de un motor a la relación

$$\frac{dC_m}{dn}$$

El funcionamiento inestable tiene las siguientes características:

- a. Un motor se para hasta llegar al estado de reposo después de ser sometido a una condición de desaceleración.
- b. Un motor se embala hasta un nuevo punto de funcio

namiento estable, el cual es peligroso desde el punto de vista mecánico.

En la figura #4, se observa que la característica mecánica de un motor de excitación separada es poco inclinada respecto al eje del par motor, por lo cual, se concluye que su grado de estabilidad es muy elevado.

$$\frac{dC_m}{d_n} = 1$$

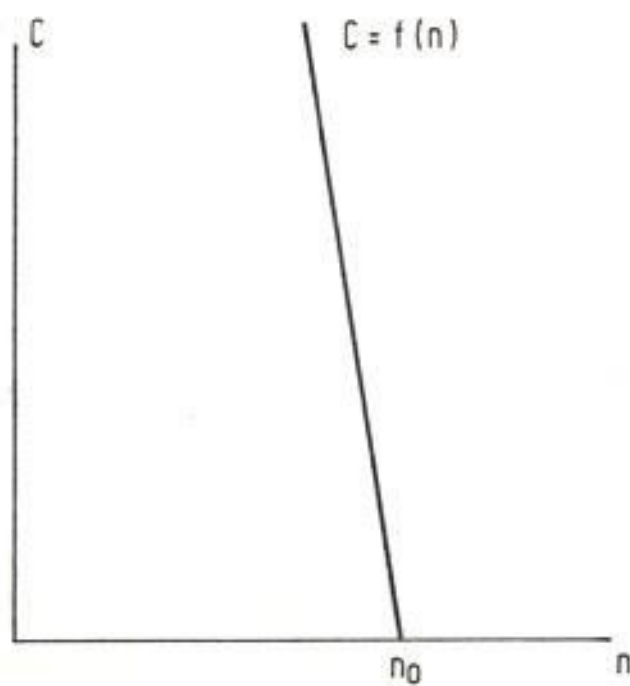
1.2.2. Características de Velocidad $n = f(I)$

Se sabe que:
$$n = K \frac{U - I \cdot r_a}{\phi}$$

Si se considera: $\phi = \text{cte.}$

Entonces:
$$n = K_{\phi} (U - I r_a)$$

Como $I r_a$ es muy pequeña comparada con la tensión en bornes (normalmente llega a un valor del 4 % de U), la variación de velocidad también estará en la misma proporción.

FIGURA N^o 4

CARACTERISTICA MECANICA $C = f(n)$ DE
UN MOTOR DE EXCITACION INDEPENDIENTE

Como Φ disminuye con la carga debido a la reacción del inducido, el incremento de carga compensa la disminución del flujo inductor; esto hace que la velocidad permanezca constante, curva 1, figura 5.

También puede ocurrir que la reacción del inducido sea muy fuerte y la velocidad puede crecer con el aumento de la carga, curva 2, figura 5.

1.2.3. Característica de par motor $C_m = f(I)$

Para un motor c.c. a excitación independiente se tiene:

$$C_m = K \Phi I \quad \text{sí } \Phi = \text{cte.}$$

$$C_m = K_1 I$$

Pero debido a la reacción del inducido Φ disminuye con la carga por lo tanto el C_m no crece proporcionalmente con la I . Figura 6.

Curva 1 sin efecto de la reacción del inducido.

FIGURA N° 5

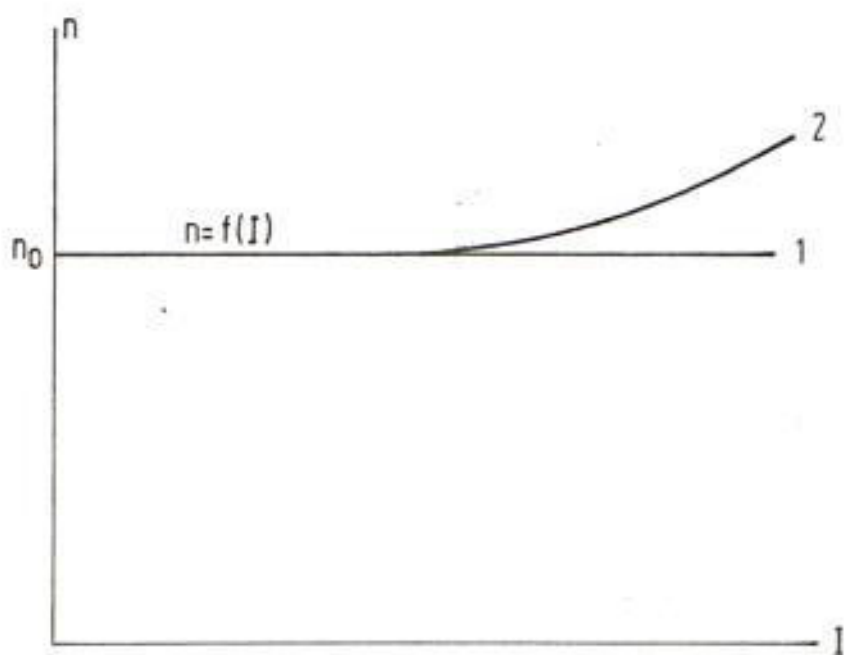
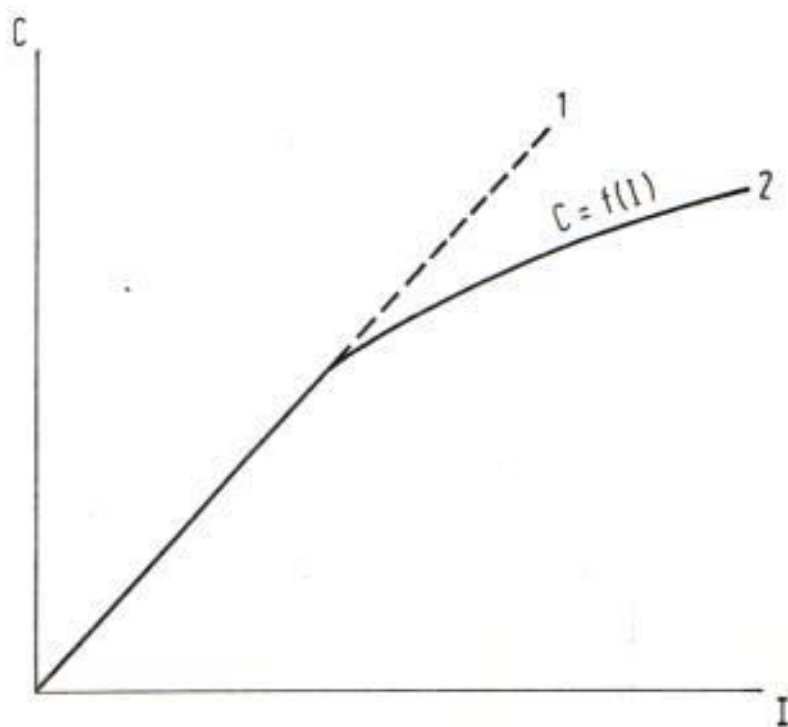
CARACTERISTICA DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE EXCITACION
INDEPENDIENTE

FIGURA N^o 6

CARACTERISTICA DE PAR MOTOR $C_m = f(I)$ DE UN MOTOR
DE EXCITACION INDEPENDIENTE

Curva 2 con la intervención de la reacción del inducido.

1.2.4. Característica de rendimiento $\eta = f(I)$

En todas las máquinas eléctricas la transformación de energía no es total, ya que parte de ésta se transforma en energía térmica no recuperable.

Luego el rendimiento viene dado por:

$$\eta = \frac{\text{Pot. salida } (P_s)}{\text{Pot. entrada } (P_e)} = \frac{\text{Pot. entrada } (p_e) - \text{pérdidas } (p_p)}{\text{Pot. entrada } (P_e)}$$

$$\eta = \frac{P_e - P_p}{P_e} = 1 - \frac{P_p}{P_e}$$

$$P_e = U_b \cdot I$$

$$P_s = C_m \cdot \omega$$

$$\omega = \text{Velocidad Angular del rotor}$$

$$\omega = \frac{\text{Radianes}}{\text{Segundo}}$$

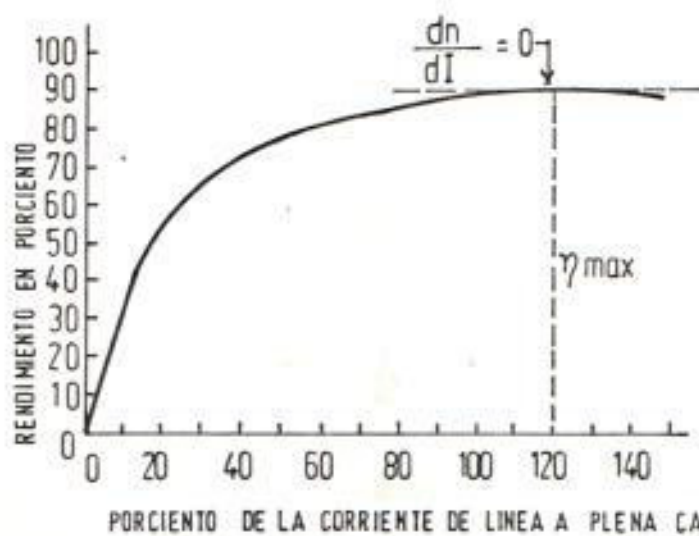
En la figura 7, se muestra el comportamiento de un motor c.c.

1.3. ARRANQUE DE UN MOTOR C.C.

Al momento del arranque, la f_{cem} es nula y la corriente tiene su máximo valor, y lo mismo sucede con el par. Esto hace que el arranque del motor sea enérgico. En general, la absorción de corriente es intolerable para el inducido, por lo que surge la necesidad de interponer entre éste y la línea de alimentación una resistencia adecuada, llamada "resistencia de arranque"; ésta se va eliminando gradualmente a medida que aumenta la velocidad, entonces crece la f_{cem} , y disminuye la corriente en el rotor.

Siempre se acostumbra a elegir el valor de ésta resistencia de tal forma que los máximos de corriente y par, durante la aceleración, permitan una buena conmutación y las limitaciones de esfuerzo de la carga impulsada. Esta resistencia per

FIGURA N° 7



CARACTERISTICA TIPICA DE RENDIMIENTO EN FUNCION
DE CORRIENTE DE CARGA

mite tomar a la armadura el 150% de su corriente nominal para que el motor sea capaz de arrancar con carga.

En este proyecto, uno de los análisis que se hacen es precisamente el arranque del motor.

1.4. REGULACION DE VELOCIDAD

El control de velocidad de los motores de c.c., dependen de la variación:

- a. Del voltaje en los bornes del inducido y,
- b. Del flujo del campo inductor.

El control de velocidad por variación de voltaje en los bornes del inducido se lo puede obtener por medio de:

1. La insercción de resistencias adecuadas entre el inducido y la fuente de suministro, método no empleado por ser de escaso rendimiento (excesivas pérdidas por efecto Joule).

2. El antiguo acoplamiento eléctrico llamado ward-Leonard, que entran en desuso, y
3. La utilización de equipos electrónicos a base de semiconductores controlados, en los cuales la variación de la tensión de salida es obtenida variando el ángulo de disparo de los mismos. Actualmente este es el método más usado.

El control de la velocidad variando el flujo del campo inductor, la regula sobre su valor nominal hasta en un 25 %.

CAPITULO 2

2. DISPOSITIVOS ELECTRONICOS

2.1. EL TIRISTOR

2.1.1. Generalidades

Los tiristores son conmutadores de estado sólido. Prácticamente no consumen energía y por lo tanto generan poco calor.

Los tiristores son compactos y pueden estar lejos del equipo principal, por ello se dispone de más libertad para elegir la situación del control que sea compatible con el sistema electromecánico. Además, no se requieren partes móviles en el sistema de control, de modo que se evita el problema de desgaste.

Existen diversos tipos de tiristores; el más común es el tiristor de bloqueo inverso, denominado también -

rectificador controlado de silicio (SCR) o simplemente tiristor. Este dispositivo constituye esencialmente un diodo de potencia cuyos períodos donde se hace conductor se puede controlar por medio de una señal externa. Es un elemento de tres terminales. Las conexiones de fuerza se efectúan en el ánodo y el cátodo y en el electrodo de puerta se aplica una señal de disparo de baja potencia. En la figura 8, se puede ver un esquema.

El tiristor en funcionamiento normal, sin señal de disparo en la puerta no deja pasar corriente; cuando es aplicada una señal de disparo suficiente el tiristor se ceba o excita y conduce una corriente directa intensa con una pequeña caída de tensión. Estando cebado el tiristor puede anularse la señal de mando, ésta, ya no influye sobre sus características dejando de ser conductor cuando la corriente que lo atraviesa desciende por debajo de un valor mínimo llamado "intensidad mínima de conducción". En alterna, el tiristor se desexcita al final de cada alternancia y en la alternancia siguiente se

vuelve a cebar gracias a una nueva señal de mando - (puerta).

También se puede bloquear el tristor aplicando - una tensión inversa ánodo-cátodo durante el tiempo necesario.

Así, el tiristor en sentido directo tiene la ventaja de comportarse como interruptor y como dosificador de la potencia consumida. En sentido inverso, las características son idénticas a las de un diodo or dinario con o sin señal de mando.

2.1.2. Principio Físico de Funcionamiento

Se explicará brevemente el principio de funcionamiento a fin de poder precisar las condiciones correctas de su empleo, las precauciones a tomar en la conexión y los límites de su utilización.

El tiristor se compone de 2 uniones p-n sucesivas, - constituyendo una estructura p-n-p-n. Cabe recordar

que cuando la estructura de un cristal es tal que los electrones suplementarios dan lugar a la conducción de electrones conductores, entonces es - del tipo n ó negativo, figura 9.

En el caso de un cristal en que la conducción es producida por un desequilibrio provocado por falta de electrones, huecos, es del tipo p ó positivo.

La polarización aplicada al tiristor es directa; ánodo positivo y cátodo negativo. Las uniones J_1 y J_3 tienen polarización directa y J_2 tiene polarización inversa. Si se aumenta la tensión de polarización, se inyectan portadores positivos y negativos en el lugar de la unión central, al mismo tiempo que se aumenta el campo eléctrico en esta - zona. La naturaleza de los cristales N y P de la unión J_2 resulta perturbada. Los portadores emitidos desde las uniones arrancan lateralmente produciendo un "fenómeno de avalancha", comparable al de la ionización por multiplicación de los portadores en el seno de la unión central cuya polaridad

FIGURA N° 8
ESQUEMA DE UN TIRISTOR

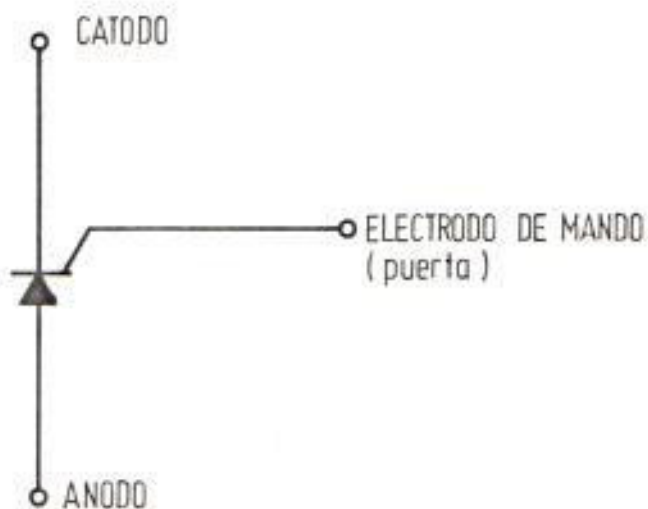
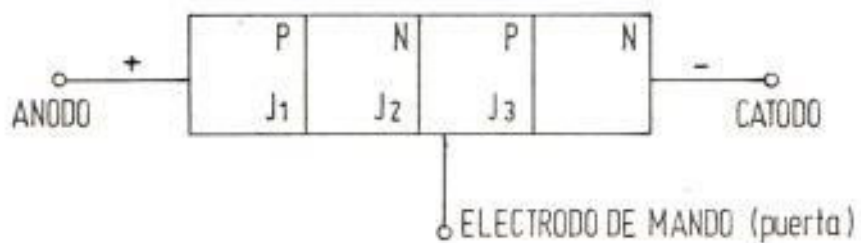


FIGURA N° 9
ESTRUCTURA p-n-p-n DEL TIRISTOR



se invierte y se comporta como una unión polarizada en el sentido de paso. La tensión con la cual se provoca súbitamente la conducción se llama "tensión de avalancha".

Después del cebado, la tensión en los bornes del tiristor es pequeña y la corriente está limitada únicamente por la resistencia de carga del circuito.

El ángulo γ y durante el cual el tiristor es conductor se denomina ángulo de conducción, y el ángulo θ en el que se produce el cebado, ángulo de disparo.

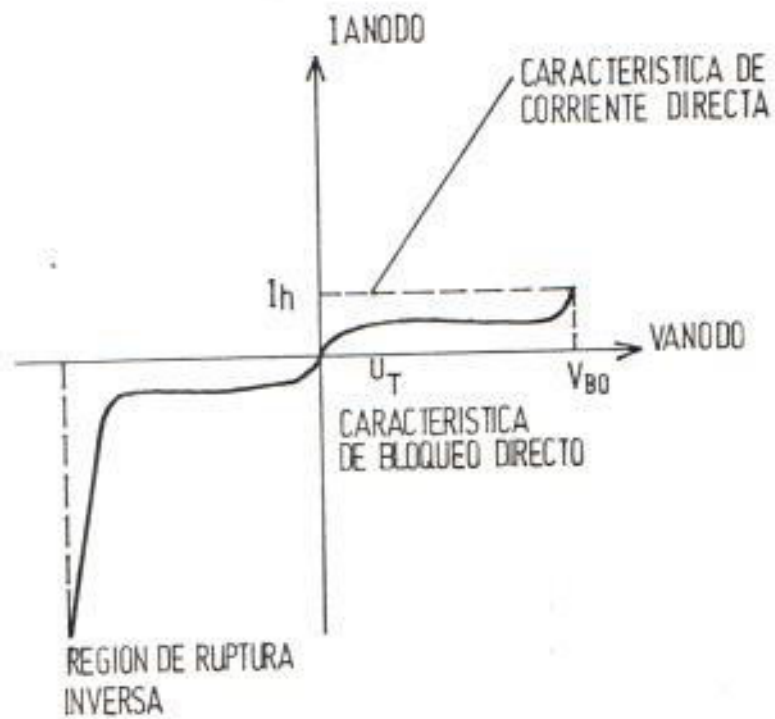
2.1.3. Característica Estática

Las características estáticas de un tiristor son similares en muchos aspectos a las de un diodo semiconductor. La figura 10 muestra la curva característica de un tiristor tipo.

Con polarización inversa el tiristor, prácticamente no conduce. Cuando se incrementa la tensión negativa, la corriente de fuga inversa aumenta lentamente, hasta -

FIGURA N° 10

CURVA DE LA CARACTERÍSTICA DE UN TIRISTOR TIPO



que se produce la ruptura por avalancha. Esta parte de la característica es semejante a la de un diodo - semiconductor polarizado en sentido inverso.

Con polarización directa, si el tiristor no es disparado, la característica es semejante a la que existe con polarización inversa y una pequeña corriente de fuga fluye en sentido directo que aumenta con la tensión en bornes del tiristor hasta que finalmente se inicia el cebado por efecto de avalancha. Esto tiene lugar a una tensión conocida como tensión de ruptura en sentido directo (U_{B0}); entonces la tensión en bornes del tiristor cae a la tensión de conducción (U_T).

Con polarización directa si el tiristor es disparado, la característica es semejante a la de un diodo semiconductor polarizado en sentido directo. La corriente que fluye a través del tiristor debe sobrepasar el valor de la corriente de cebado antes de que desaparezca el impulso de disparo. Si por una razón determinada la corriente de carga crece lentamente, por ej. si la carga es inductiva, y el impulso de disparo

desaparece antes de que se haya alcanzado la corriente de cebado, el tiristor dejará de conducir.

Otro valor característico es la corriente de mantenimiento, I_h , corriente mínima que puede fluir a través del tiristor para que se mantenga éste en estado de conducción. Así, para bloqueo del tiristor, la corriente de carga debe disminuir hasta un valor inferior a I_h .

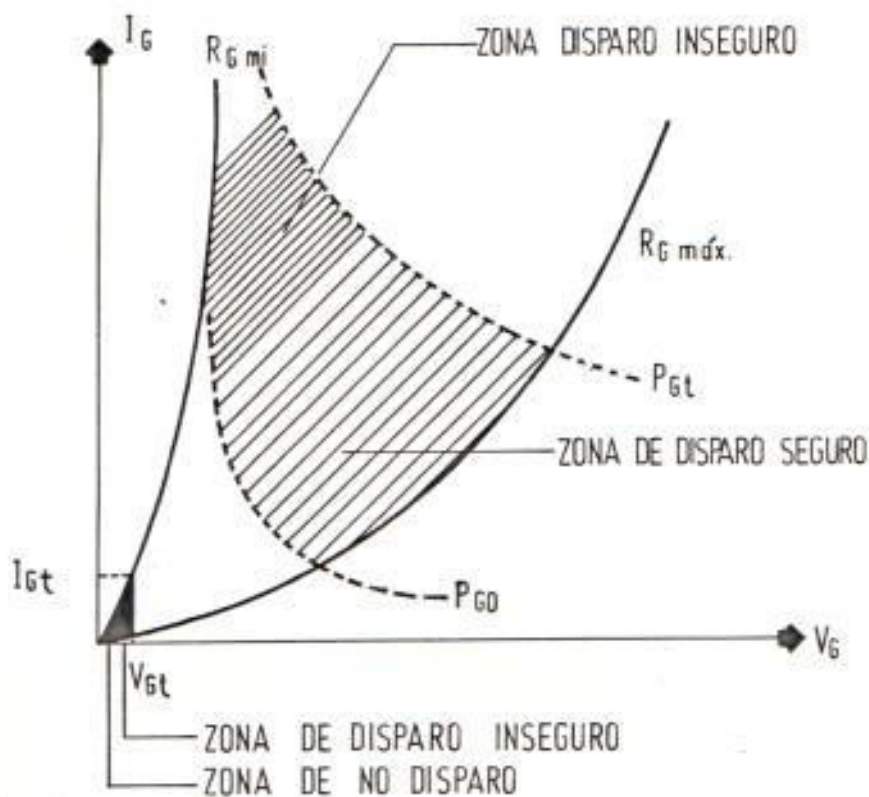
Aunque los tiristores normalmente se ceban con la señal de puerta, existen otros métodos posibles de hacerlo. p. ej. sobrepasando la tensión de ruptura en sentido directo (U_{BO}). Puede también entrar en conducción si se sobrepasa la velocidad de subida de la tensión del ánodo (dU/dt) admisible. Sin embargo, estos métodos son, por lo general, accidentales y deben evitarse en diseño.

2.1.4. Característica de puerta

La figura N^o 11, muestra una curva típica de caracte-

FIGURA N° 11

CURVA TIPICA DE LA CARACTERISTICA
DE PUERTA



P_{G0} = Potencia media admisible en la unión puerta-cátodo

P_{Gt} = Potencia pico de trabajo que considera la duración del impulso y su período.

gráfica de puerta. Se puede observar que hay dos curvas externas (señaladas con línea continua) entre las cuales se supone que se encontrarán todos los tiristores de idéntico tipo.

Se incluyen dos curvas a trazos para indicar la máxima disipación media en la unión puerta - cátodo y el máximo pico de potencia en la puerta. La zona cubierta por rayas más separadas indica el margen de tensiones y corrientes instantáneas de disparo que producirán con seguridad el cebado, mientras que las zonas cubiertas por rayas más juntas son regiones de donde nunca se puede asegurar el disparo. Es interesante notar que el máximo valor límite de puerta de los tiristores grandes no difiere mucho del de los pequeños.

2.1.5. Protección

El tiristor es sensible a sobrevoltajes, sobrecorrientes y cualquier tipo de transitorios.

Las sobrecorrientes son limitadas con fusibles o

disyuntores de alto poder de ruptura y de rápida interrupción de corriente. También se puede emplear limitadores de corriente de reactancia saturable.

Los sobrevoltajes harán que se alcance el punto de ruptura y que conduzca antes de que la tensión directa sea alcanzada; este sobrevoltaje se transfiere a la carga ocasionando dificultades y peligros.

Los tiristores pueden ser averiados debido a voltajes transitorios, y su protección se la consigue almacenando la energía en exceso en elementos L o C - para luego disipar esa energía por medio de resistencias supresoras de sobrevoltaje o dispositivos de avalancha. Los sobrevoltajes externos no son controlables, sin embargo se puede proteger los equipos de estos sobrevoltajes instalando redes RC. Este tipo de redes permite absorber y descargar la energía almacenada en el transformador de alimentación al desconectar el contactor principal.

Los sobrevoltajes internos producidos por la conmutación de los tiristores proporciona pequeñas cantidades de energía que puede deteriorar el elemento -

semiconductor para lo cual se monta una red serie RC.

Un gran valor (du/dt) puede producir el disparo indeseado del tiristor produciendo una sobrecarga perjudicial.

Los circuitos de puerta, también necesitan ser protegidos a causa de su tensión y potencia bajas. Los rápidos cambios de tensión y corriente inducen tensiones indeseables en los conductores de puerta, por lo que son esenciales un apantallado, una puesta a masa y un filtrado cuidadosos.

Cuando se trabaja con cargas inductivas se emplea el diodo de paso libre, para evitar los voltajes transitorios que se producen cuando se interrumpe rápidamente la corriente de carga.

El diodo de paso libre hace que la energía almacenada en la inductancia ($1/2Li^2$) sea disipada fuera del tiristor proporcionando un camino a la corriente.

Como la protección del tiristor puede ser compleja y costosa, es criterio de algunos diseñadores emplear

el menor número de componentes de protección y utilizar tiristores con valores mayores a 3 veces la corriente de carga en estado estable, por lo tanto, en este trabajo se ha usado un tiristor de las siguientes características:

MARCA: AEG

MODELO: T31F 200

$I_N = 60$ AMP.

U = 200 voltios

2.1.6. Métodos de Control

Existen tres tipos básicos para controlar un tiristor:

- Señales de excitación en continua: se ceba el tiristor aplicando a la puerta una señal de c.c., siendo un método no muy conveniente por la disipación de potencia que es ineludible en el tiristor.
- Señales de impulso: este método es más conveniente que el anterior. La disipación de potencia es más reducida. La potencia de los impulsos puede ser más alta para obtener una rápida y confiable conmutación cuando se utilizan impulsos en lugar de señal

les continuas.

- Señales de alterna: el control de fase es una manera generalizada de controlar la potencia de alterna su ministrada a una carga, variando la parte del ciclo de tensión durante la cual puede circular corriente.

2.2. CIRCUITO DE DISPARO

El tipo de circuito de disparo utilizado en este trabajo es el de una señal de impulso.

El elemento de disparo utilizado es el UJT (Unijunction Transistor), representado en la figura N^o. 12.

La forma de utilización normal es aplicar una tensión interbase U_{BB} entre B_1 y B_2 . Ver figura 13.

La característica más importante del UJT corresponde al diodo de entrada, entre E y B. Normalmente el valor de $R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$, está comprendido entre 5 y 10 K Ω .

FIGURA N° 12

SIMBOLO DEL U J T

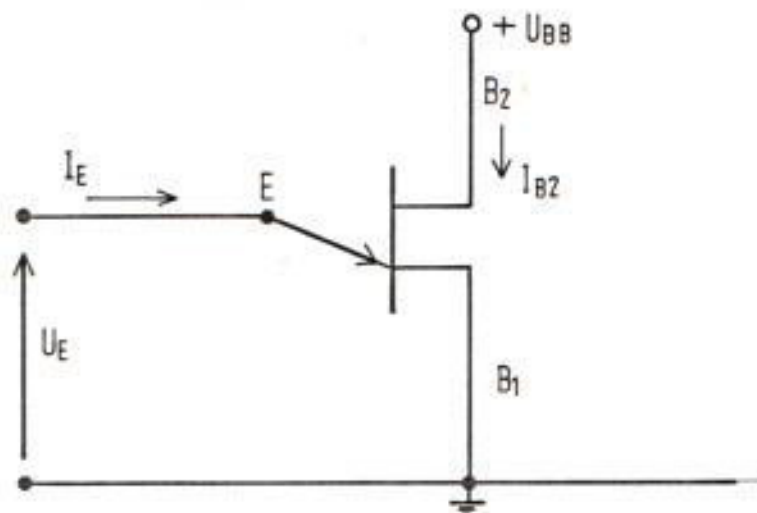
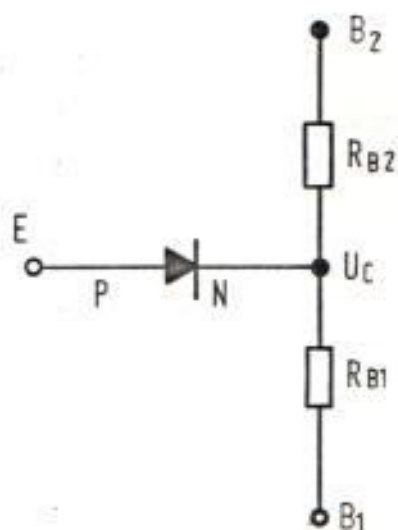


FIGURA N° 13

ESQUEMA ELECTRICO EQUIVALENTE DEL UJT



y

$$U_C = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{BB} = \eta U_{BB}$$

η = relación intrínseca; $0.65 \leq \eta \leq 0.85$

Para la tensión máxima de U_E o de disparo de pico U_p la corriente es muy pequeña.

$$U_p = \eta U_{BB} + U_D$$

Donde U_D es la caída de tensión en el diodo emisor cuando pasa por él, la corriente I_{pico} ; aproximadamente $U_D = 0.50$ V a 25°C , dependiendo del tipo de UJT.

El UJT empleado es el 2N2646 con las siguientes características:

$$U_V = 1 \text{ voltio}$$

$$U_p = 15.90 \text{ voltios}$$

$$I_V = 4 \text{ mA}$$

$$I_p = 0.05 \text{ mA}$$

$$\eta = 0.70$$

Constante de tiempo de carga del condensador.

$$\tau_e = R_3 C_1 \ln \left(\frac{U_{BB}}{U_{BB} - U_p} \right)$$

La constante de tiempo de descarga

$$\tau_d = R_5 C_1$$

El rango en el cual R_3 hace que el circuito se comporte como un oscilador de relajación está comprendido entre:

$$R_3 \text{ m\u00ednimo} = \frac{U_{BB} - U_V}{I_V} = \frac{(22 - 1)V}{4\text{mA}} = 5.25 \text{ K}\Omega$$

$$R_3 \text{ m\u00e1ximo} = \frac{U_{BB} - U_p}{I_p} = \frac{(22 - 15.90) V}{0.05 \text{ mA}} = 122 \text{ K}\Omega$$

$$5.25 \text{ K} \leq R_3 \leq 122 \text{ K}\Omega$$

Luego se encoge un $R_3 = 100 \text{ K}\Omega$

El voltaje promedio (U_{cc}) a la salida del rectificador es 125 voltios de c.c.

$$U_z = 22 \text{ voltios}$$

$$p_z = 1 \text{ vatio}$$

$$I_z = 45 \text{ mA}$$

$$U_{cc} = R_1 I_z + U_z$$

$$125 = R_1 (45 \times 10^{-3}) + 22$$

$$R_1 = 2.29 \text{ K } \Omega$$

Por seguridad se usa $R_1 = 3.90 \text{ K } \Omega$

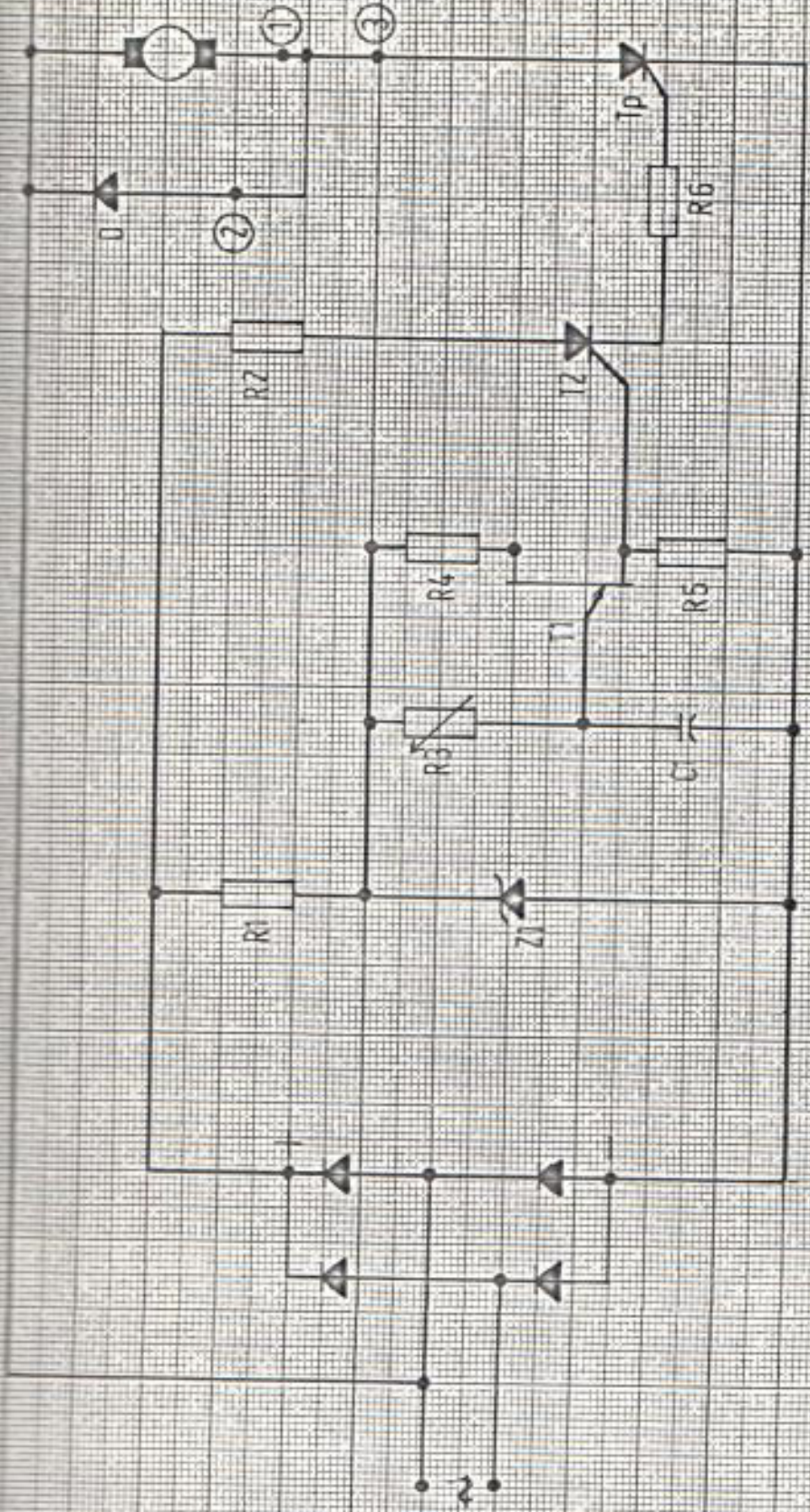
$$\text{Potencia en } R_1 = U^2 / R_1 = \frac{(125 - 22)^2}{3.9K} = 2.72 \text{ vatios}$$

$$\text{Luego } R_1 = 3.90 \text{ K } \Omega$$

Con una Disipación en $R_1 = 4 \text{ vatios}$

Con estos valores se obtiene el diagrama del circuito de disparo que se muestran en las figuras N° 14 y 15.

ESQUEMA PARA ALIMENTACION MONOFASICA CON REGULACION DE MEDIA ONDA

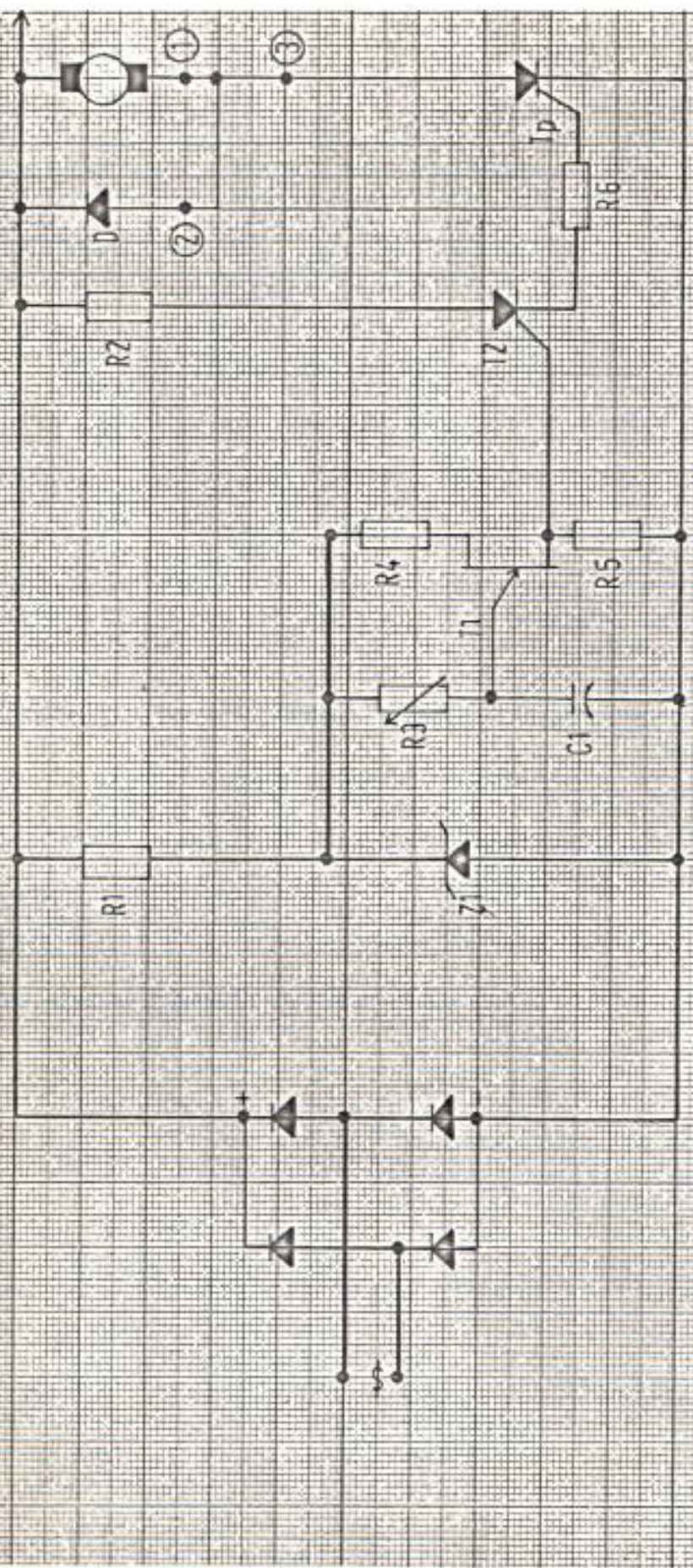


- R1 = 39 K Ω 4 W
- R2 = 35 K Ω 8 W
- R3 = 100 K Ω
- R4 = 470 Ω

- R5 = 47 Ω
- R6 = 100 Ω 5 W
- Z1 = 22 VOLT
- C1 = 2 μ f

- T1 = 2N2029
- Z2 = 2N6397

CIRCUITO PARA ALIMENTACION MONOFASICA CON RECTIFICACION ONDA COMPLETA



CAPITULO III

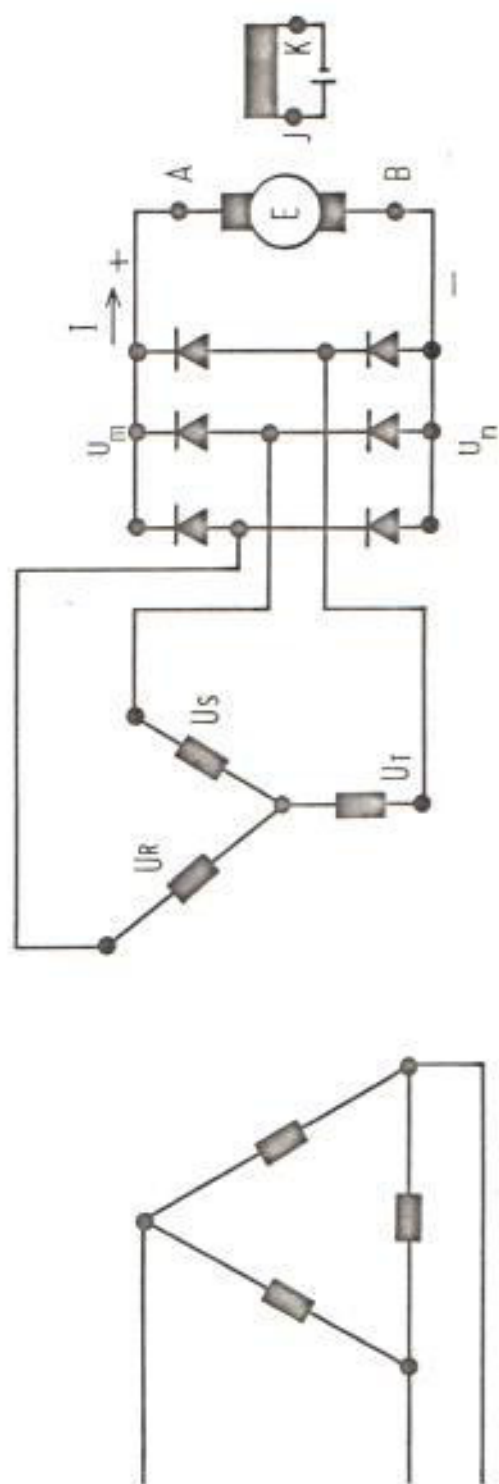
3. ANALISIS DE LOS FENOMENOS PRODUCIDOS EN EL MOTOR DURANTE EL PERIODO DE ARRANQUE Y SU FUNCIONAMIENTO EN ESTADO ESTABLE DEBIDO A LA VARIACION DEL ANGULO DE DISPARO DEL TIRISTOR CUANDO FUNCIONA EN VACIO A 25, 50, 100 y 125 % DE SU CORRIENTE NOMINAL.

3.1. MOTOR ALIMENTADO CON FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA (c.c.)

Para hacer el análisis del comportamiento del motor c.c., - cuando se lo alimenta desde fuentes alternas monofásicas - rectificadas a media onda y onda completa es necesario saber como se comporta el motor cuando es alimentado con corriente continúa.

El motor es alimentado desde una fuente alterna trifásica rectificada a través de un puente de onda - completa (6 diodos) como se muestra en la figura - N^o 16.

DIAGRAMA DE FUERZA PARA LA ALIMENTACION DE UN MOTOR C.C. DESDE UNA FUENTE ALTERNA TRIFASICA A TRAVES DE UN PUNTE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.



Se asume que la corriente rectificadora de esta forma es una co
rriente continua.

El motor utilizado para la realización de este trabajo es un
dinamómetro marca "Hampden" de las siguientes características:

3 kw	4 polos	$U_N = 110$ voltios
2400 - 3600 r.p.m.		$U_{Fmax} = 110$ voltios

Las experiencias se las ha hecho con $U_F = 85$ voltios

Los valores de las medidas tomadas corresponden a: Corriente -
de armadura, voltaje de armadura y de campo, velocidad, par mo
tor, corrientes de arranque y, formas de onda de voltaje y de
corriente de armadura.

Con los datos obtenidos se determina: Velocidad angular, poten
cia de entrada, potencia de salida y rendimiento, de acuerdo -
con lo expuesto en el anexo N° 1.

Los valores así obtenidos están en la tabla N° 1 .

La forma de onda de la tensión de salida del puente rectifica-

TABLA Nº 1

ALIMENTACION DEL MOTOR DE C.C. CON CORRIENTE CONTINUA

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE AMRADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (LB-PIE)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (RADIANES/SEGUNDO).	POTENCIA DE ENTRADA (VA-TIOS).	POTENCIA DE SALIDA (VA-TIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
135.30	5.00	0.50	3090	323.58	676.50	216.80	0.32 (*)
134.60	7.40	0.90	3070	321.49	996.04	387.72	0.39
133.50	10.40	1.80	3040	318.34	1388.40	767.84	0.55
132.90	13.60	2.75	3015	315.73	1807.44	1163.47	0.64 (*)
132.20	15.00	3.20	3000	314.16	1983.00	1347.12	0.68
131.60	17.40	3.80	2980	312.06	2289.84	1589.01	0.69
130.80	20.30	4.70	2960	309.97	2655.24	1952.19	0.74 (*)
128.70	26.60	6.40	2910	304.73	3423.42	2613.36	0.76 (*)
128.10	28.50	6.90	2900	303.68	3650.85	2807.83	0.77

(*) Según Oscilogramas Nº 1 a 4

dor de 6 diodos es la indicada en la figura N° 17 .

3.1.1. Análisis en el período de arranque del motor c.c.:

Si al motor alimentado con corriente continua se lo ha ce arrancar directamente a voltaje nominal, es capaz de alcanzar de 10 a 15 veces la corriente nominal y esto puede dar lugar a que se produzca un gran momento dinámico en el eje del motor que podría averiarlo; también, puede existir un chisporroteo de magnitud - considerable trayendo el consiguiente deterioro del colector, una excesiva temperatura en el arrollamiento del inducido llegando a destruir su aislamiento y además otras causas de origen externo que no interesan - en este estudio. Por todas estas razones no se realizó el arranque del motor.

3.1.2. Análisis del funcionamiento del motor en estado estable:

Los oscilogramas obtenidos con el motor cargado son los N° 1 a 4 .

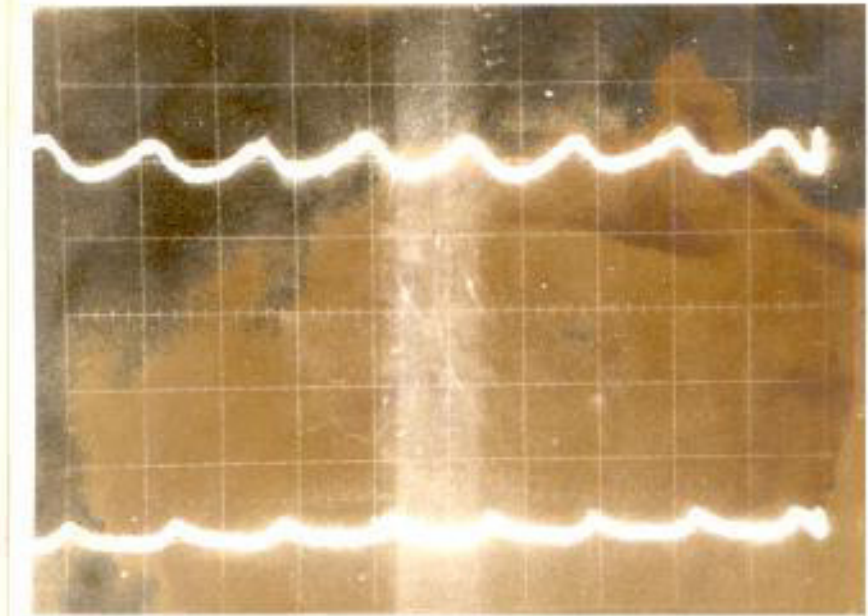
La forma de los oscilogramas corresponden a las expresiones

ALIMENTACION: CORRIENTE CONTINUA

ONDAS SUPERIORES: VOLTAJE DE ALIMENTACION (u)

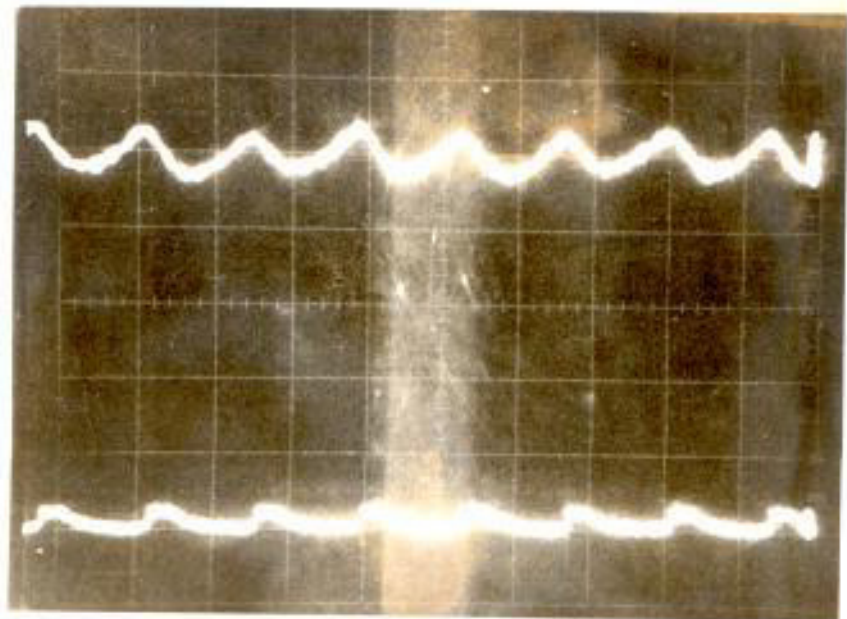
ONDAS INFERIORES: CORRIENTE DE ARMADURA (i)

OSCILOGRAMA N° 1

 $\mu = 50 \text{ V/div.}$ $i = 5 \text{ Amp/div.}$ 

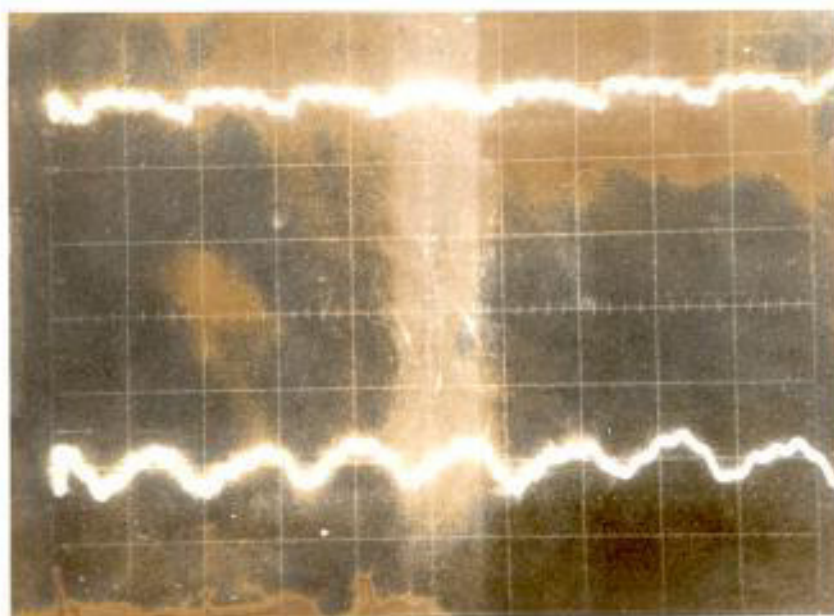
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 2

 $\mu = 50 \text{ V/div.}$ $i = 5 \text{ Amp/div.}$ 

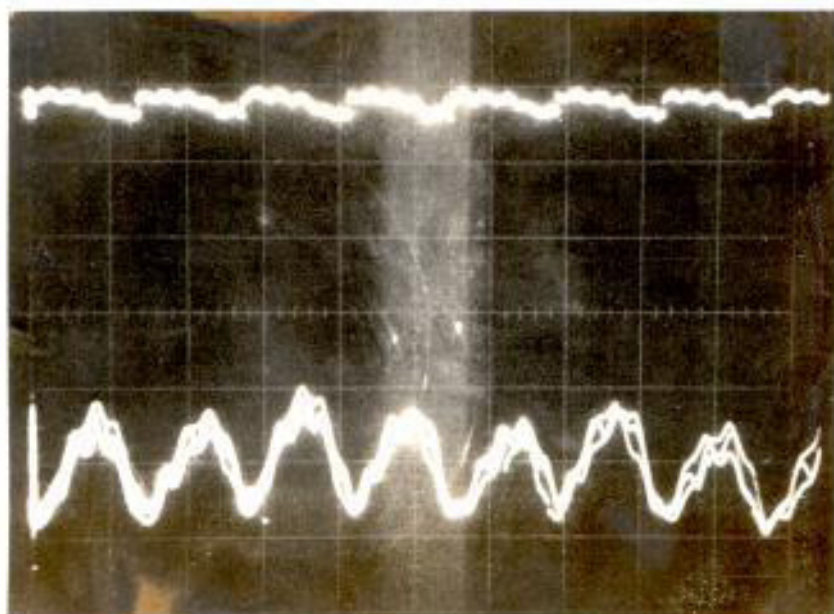
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 3

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

Tiempo : 2 miliseg/div.

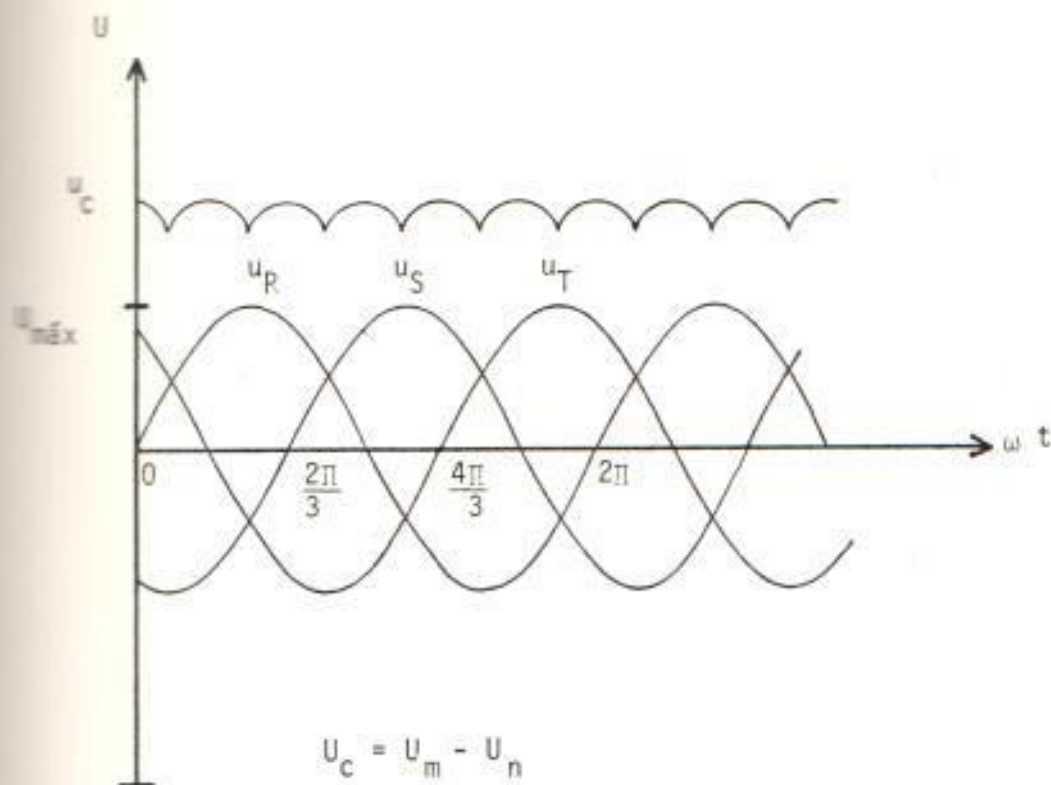
OSCILOGRAMA N° 4

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

Tiempo : 2 miliseg/div.

FIGURA N° 17

FORMAS DE ONDAS DE VOLTAJE DE UN SISTEMA TRIFASICO RECTIFICADO DE ONDA COMPLETA



siones siguientes:

El voltaje promedio de alimentación tiene la siguiente relación respecto al voltaje máximo:

$$U_{\text{prom.}} = \frac{3}{\pi} U_{\text{máx.}} = 0.954 U_{\text{máx.}}$$

La corriente de armadura tiene la siguiente forma:

$$i = \frac{U_{\text{máx.}}}{Z} \sin(2\pi f t + \phi - \theta) - \frac{E}{R_a} + Ae^{-\frac{t}{\tau_m}}$$

El segundo miembro está compuesto de 3 términos: El primero que representa la corriente de c.a. en estado estable, el segundo término corresponde a la corriente c. c. en estado estable y el tercero la componente exponencial del circuito Lr_a .

Siendo:

f = frecuencia del voltaje de alimentación

Z = impedancia c.a. de armadura

r_a = impedancia c.c. de armadura

\emptyset = ángulo de disparo (para este caso es nulo)

A = constante que se la obtiene en base a las condiciones iniciales $t = 0$; $i = 0$

τ_m = constante de tiempo de armadura = $\frac{L}{r_a}$

3.1.2.1. Curva característica del par $C_m = f(I)$

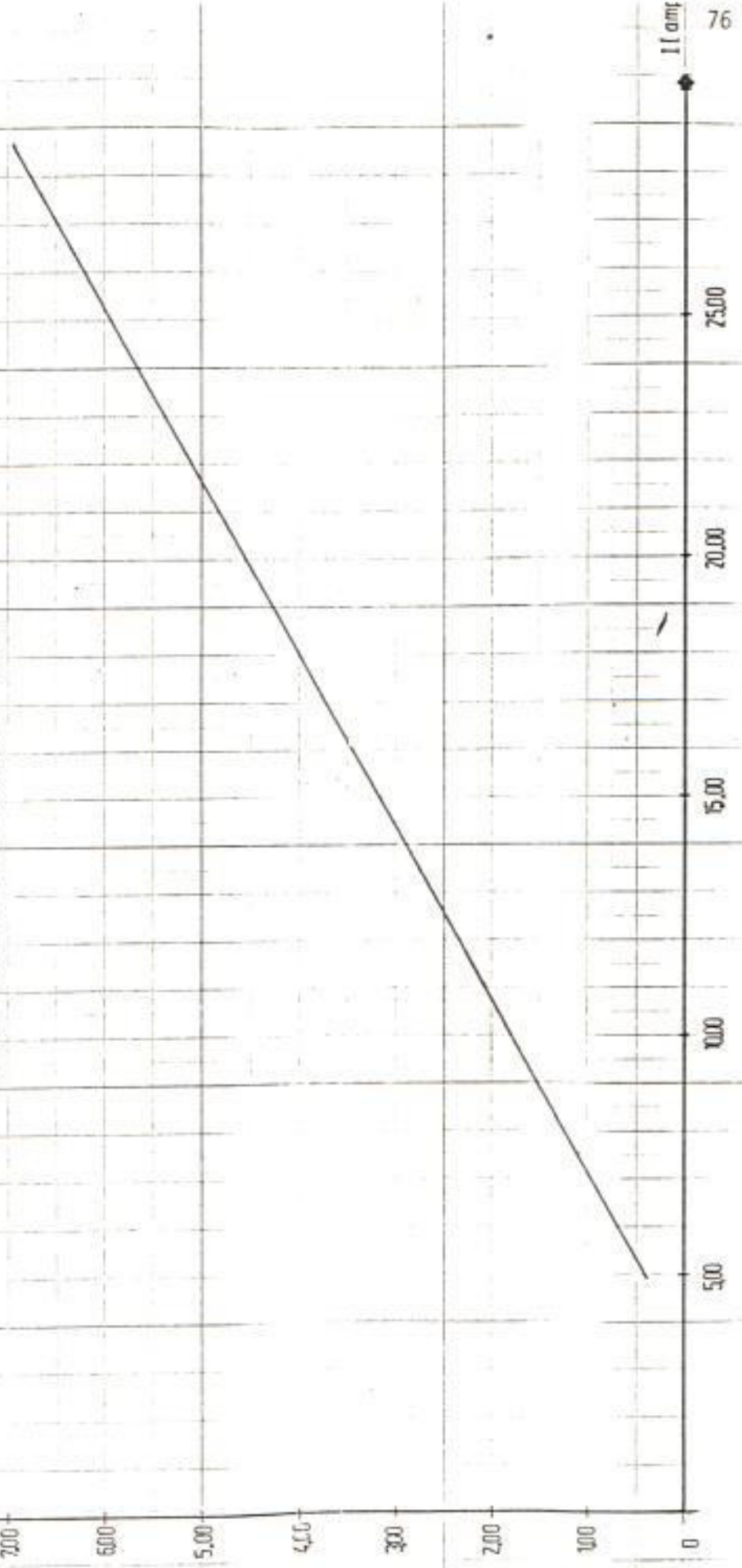
Como en este estudio se ha mantenido el valor del voltaje de campo constante ($U_F = 85$ voltios), la ecuación que rige esta característica queda de la siguiente forma:

$$C_m = K_1 I$$

Ecuación de una recta como lo muestra la curva N° 1. La curva mantiene su linealidad hasta el valor de corriente nominal, luego cambia su forma por efectos de reacción de inducido y saturación magnética.

C
(lb-pie)

PAR [C] vs CORRIENTE DE ARMADURA [I]
MONTAJE : ALIMENTACION DE CORRIENTE CONTINUA



I (amp) 76

% DE CORRIENTE NOMINAL EN BASE A VALORES FIJOS DE PAR MOTOR

POR MOTOR Lb-pie	1.50	3.00	4.50	6.00	6.50	7.00
% DE CORRIENTE NOMINAL (A)	30	53	73	93	100	110

Para diferentes valores de par motor se indica el porcentaje de corriente nominal de armadura que tiene el motor. Tabla N° 2 .

3.1.2.2. Curva característica mecánica $C_m = f(n)$

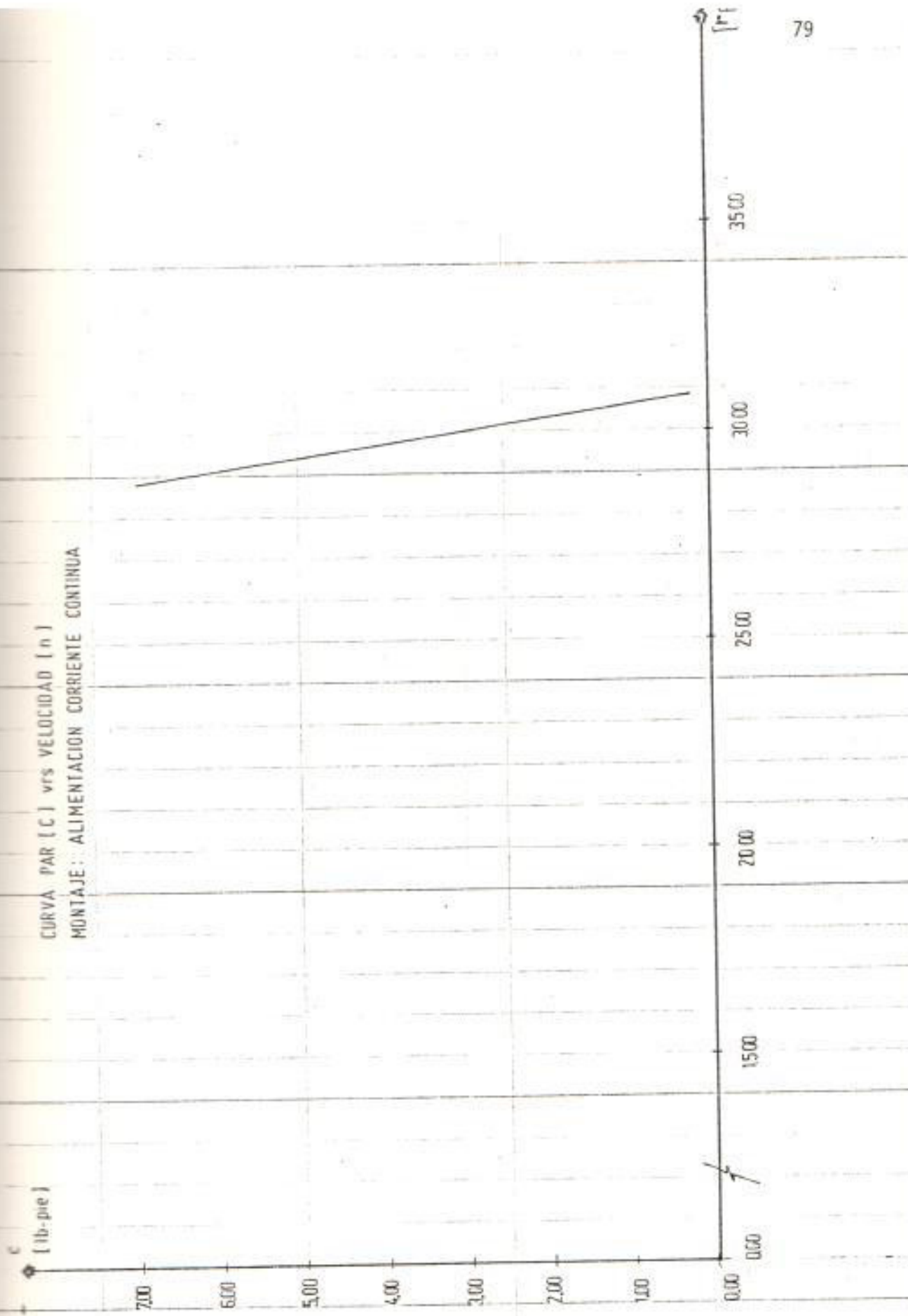
Esta característica está representada por la curva N°2 en la cual se puede apreciar lo siguiente:

La velocidad varía muy poco desde carga nula a plena carga, lo que lleva a la conclusión de que el motor excitación separada autoregula su velocidad; además, el grado de estabilidad de este motor es muy elevado, lo cual está de acuerdo con la expresión:

$$dC_m/dn$$

Al cargar el motor la corriente de armadura aumenta en su amplitud, pero su período permanece constante, porque tiene una forma de onda continua.

CURVA PAR (C) vrs VELOCIDAD (n)
MONTAJE: ALIMENTACION CORRIENTE CONTINUA



Esto se lo puede apreciar en los oscilogramas N^o 1 a 4 .

De la regulación de velocidad se tiene:

$$\% \text{ Reg} = \frac{n_{\text{vacio}} - n_{\text{carga}}}{n_{\text{carga}}} \times 100$$

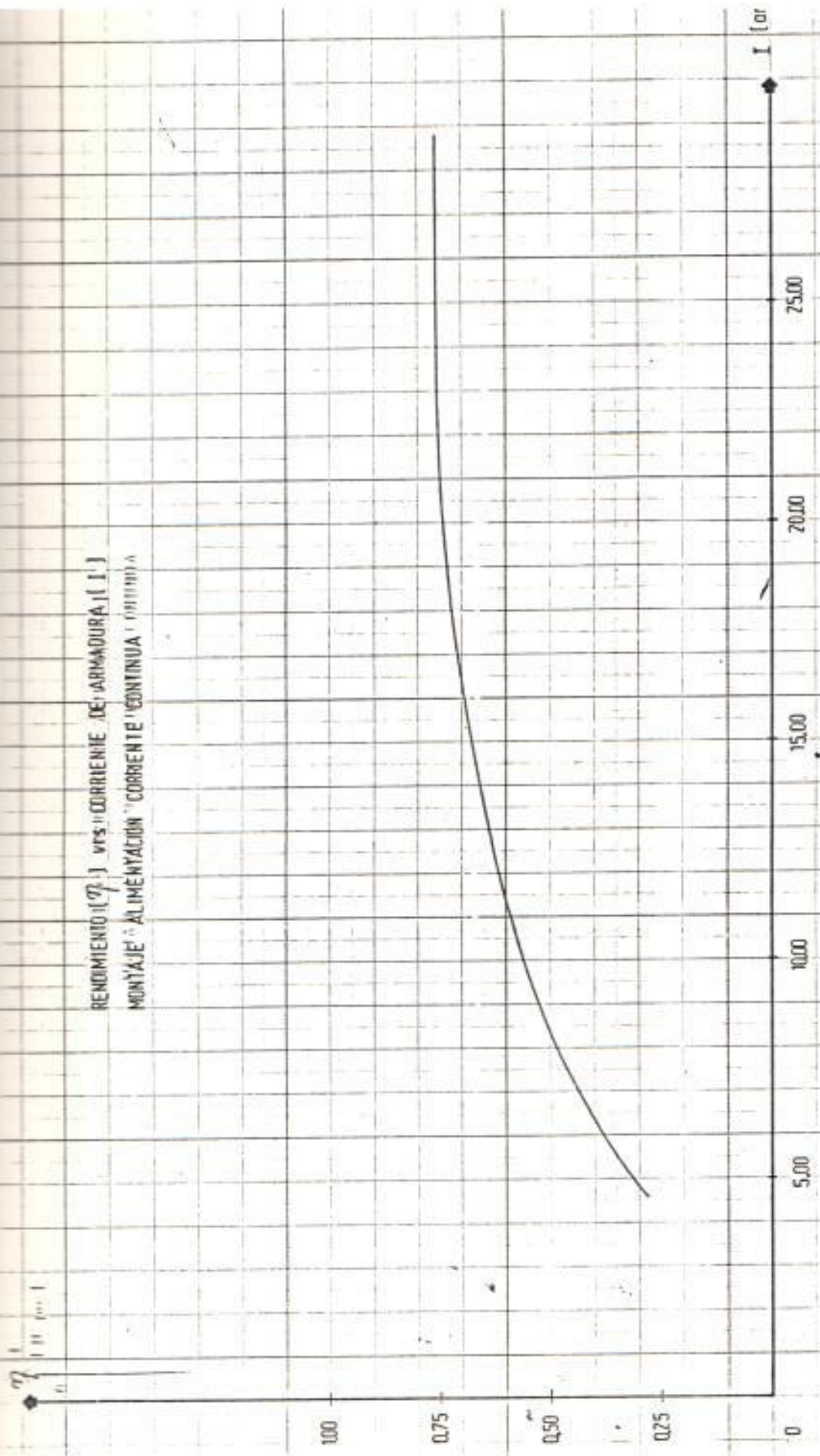
Se obtiene un valor de 6,50 % con el 100% de carga nominal.

Este valor está dentro de los límites de regulación para este tipo de motores (2 a 8 %).

3.1.2.3. Curva característica de rendimiento $\eta = f(I)$

Esta característica está mostrada en la curva N^o 3 y se la ha obtenido de valores directos y experimentales, observándose que el mayor rendimiento se lo obtiene cuando el motor trabaja a corriente nominal.

RENDIMIENTO (η) vs. CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE DE ALIMENTACIÓN CORRIENTE CONTINUA



3.1.2.4. Curva característica de voltaje promedio de alimentación -corriente de armadura $U = f(I)$ -

Esta curva corresponde a la N° 4.

Al cargar el motor hasta su valor nominal la caída del voltaje de alimentación es de 7,20 voltios, que corresponde a un 5.32 % del voltaje de alimentación en vacío. Esto es debido a la caída de tensión en los elementos del rectificador y en el secundario del transformador alimentador. Así la f.c.e.m.E disminuye muy poco su valor, manteniendo un porcentaje de regulación de velocidad aceptable. (6.50%).

3.2. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CONTROLADO POR ACCION SOBRE ARMADURA DESDE UNA FUENTE ALTERNA MONOFASICA A TRAVES DE UN TIRISTOR

3.2.1. Análisis en el período de arranque del motor:

El diagrama de conexiones de la figura N° 14 muestra

VOLTAJE ALIMENTACION PROMEDIO (U) vs CORRIENTE ARMADURA (I)
MONTAJE : ALIMENTACION CORRIENTE CONTINUA

U
(volts)

150 V

100V

50V

0

5 A

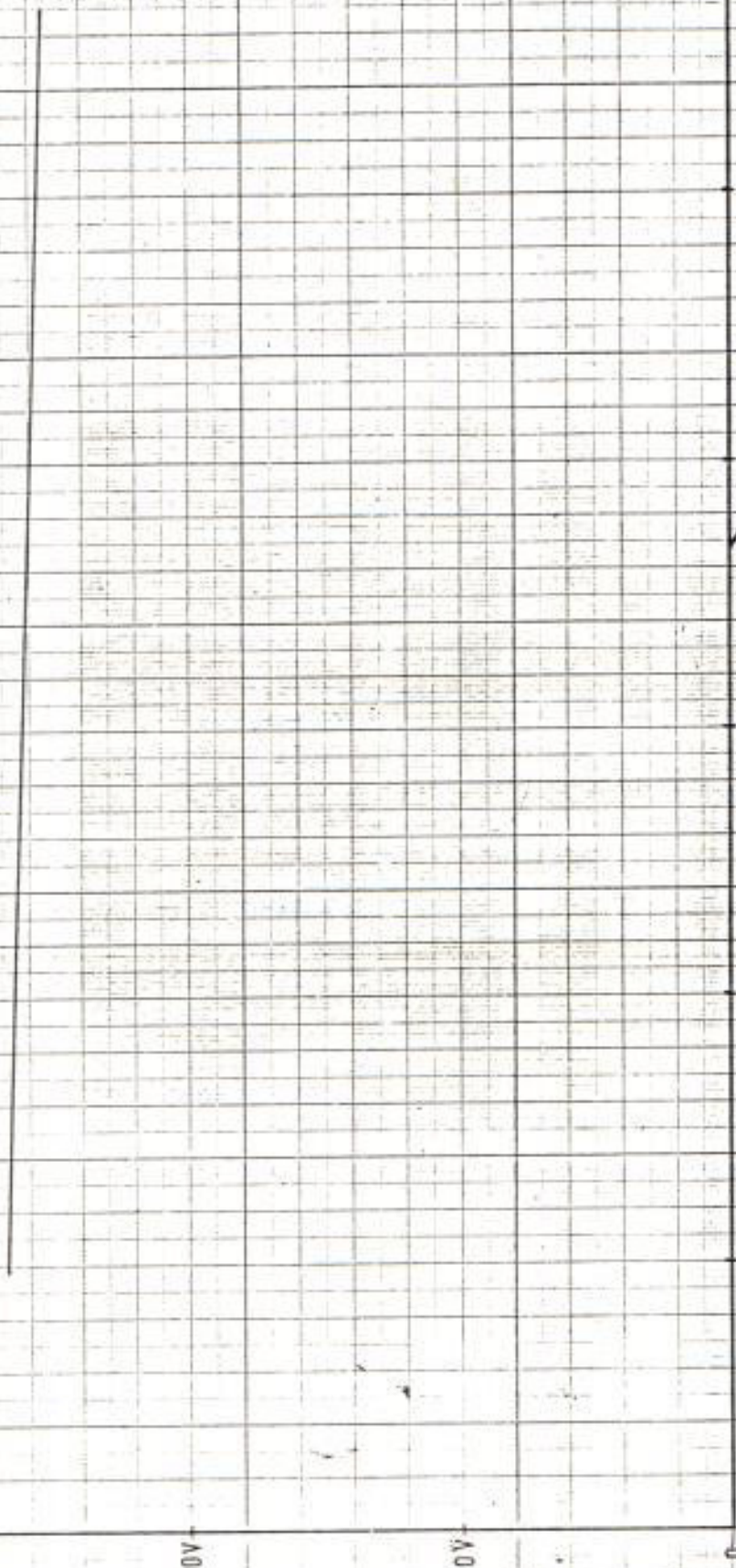
10 A

15 A

20 A

25 A

I [amp]



que el motor de c.c. queda alimentado desde una fuente alterna monofásica rectificadora a media onda, cuya forma de onda se indica en la figura N^o 18.

Además por medio del circuito de disparo del tiristor, por ejemplo calibrando el disparo a 30°, 60°, 90° y 120°, figura N^o 19, se puede variar la cantidad de energía suministrada al motor.

Las curvas N^o 5 a 8 indican la envolvente en los cinco primeros segundos de la corriente de armadura (1), de la corriente por el diodo de paso libre (2), de la corriente por el tiristor (3) y la velocidad del motor (4).

En el Anexo N^o 2 está la relación entre voltaje de salida del taco dínamo V_{rs} vs. velocidad en R.P.M. del mismo.

En las curvas N^o 9 a 12, muestran la forma del voltaje de alimentación a la armadura U y el crecimiento de la f.c.e.m.E.

El motor no pudo arrancar a $\theta = 120^\circ$, puesto que el va

FIGURA N° 18

VOLTAJE MONOFASICO RECTIFICADO A MEDIA ONDA

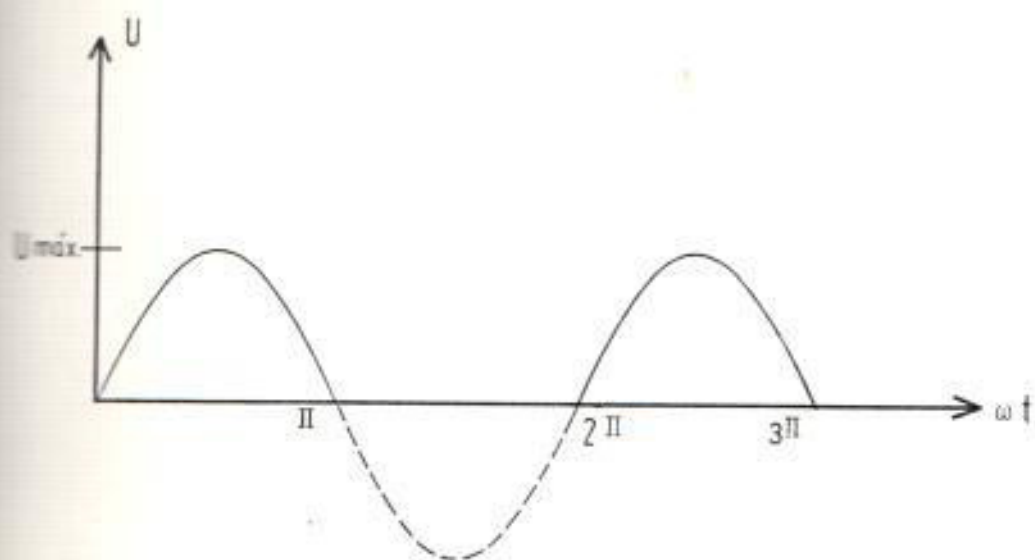
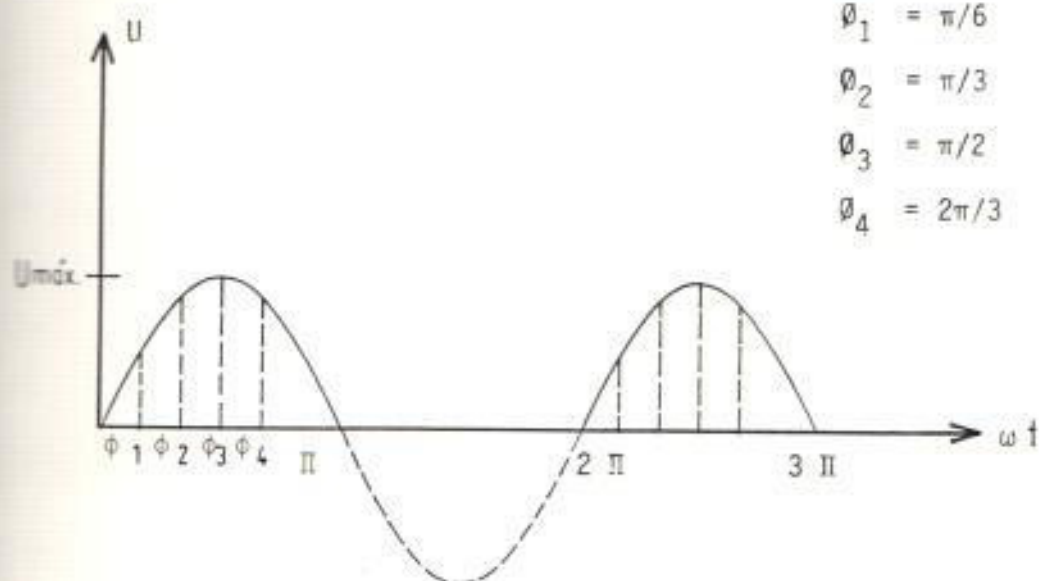


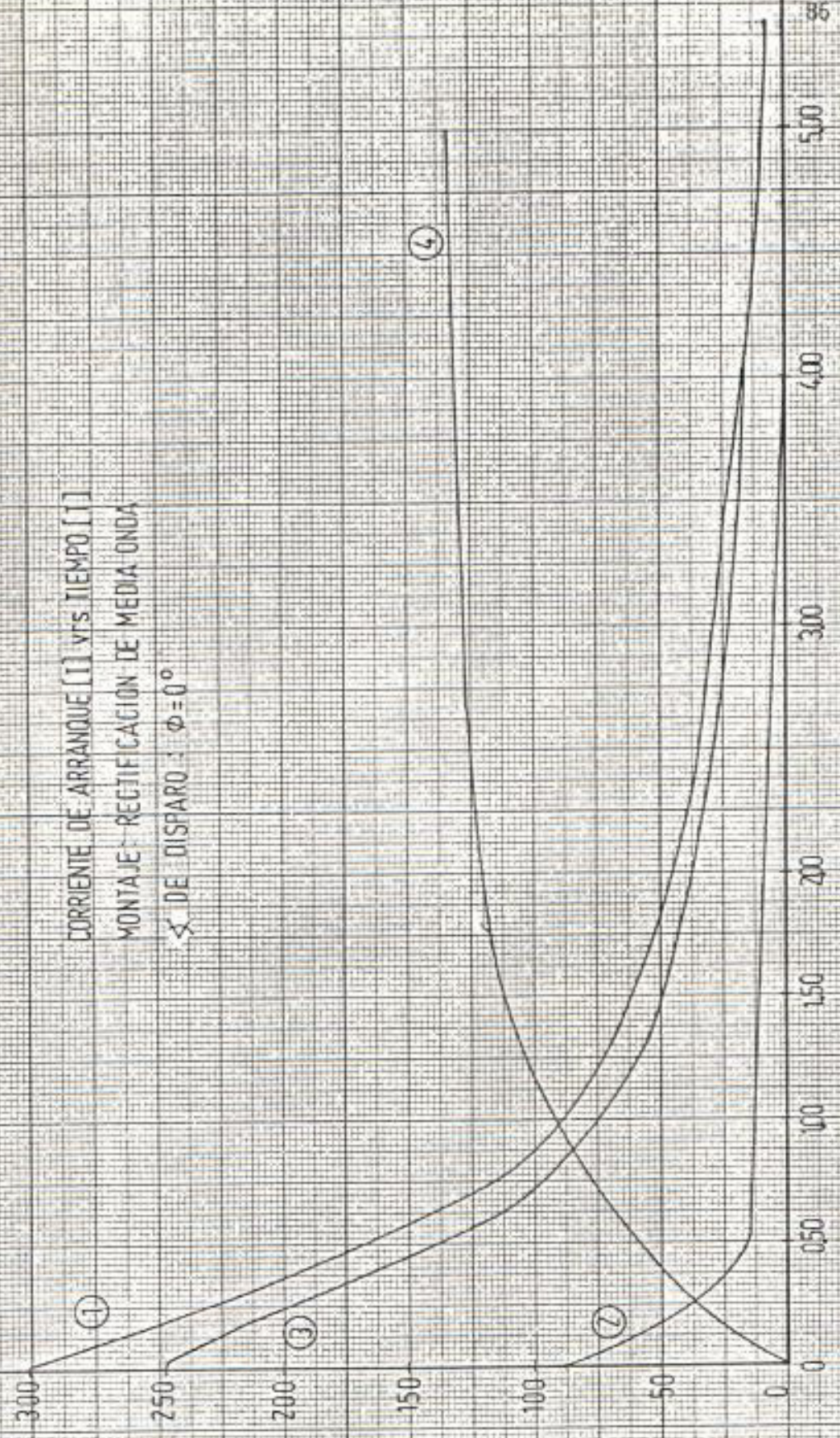
FIGURA N° 19



$$\begin{aligned} \theta_0 &= 0 \\ \theta_1 &= \pi/6 \\ \theta_2 &= \pi/3 \\ \theta_3 &= \pi/2 \\ \theta_4 &= 2\pi/3 \end{aligned}$$

VOLTAJE MONOFASICO RECTIFICADO A MEDIA ONDA Y DIFERENTES VALORES DE ANGULO DE DISPARO DEL TIRISTOR.

Corriente (amp)

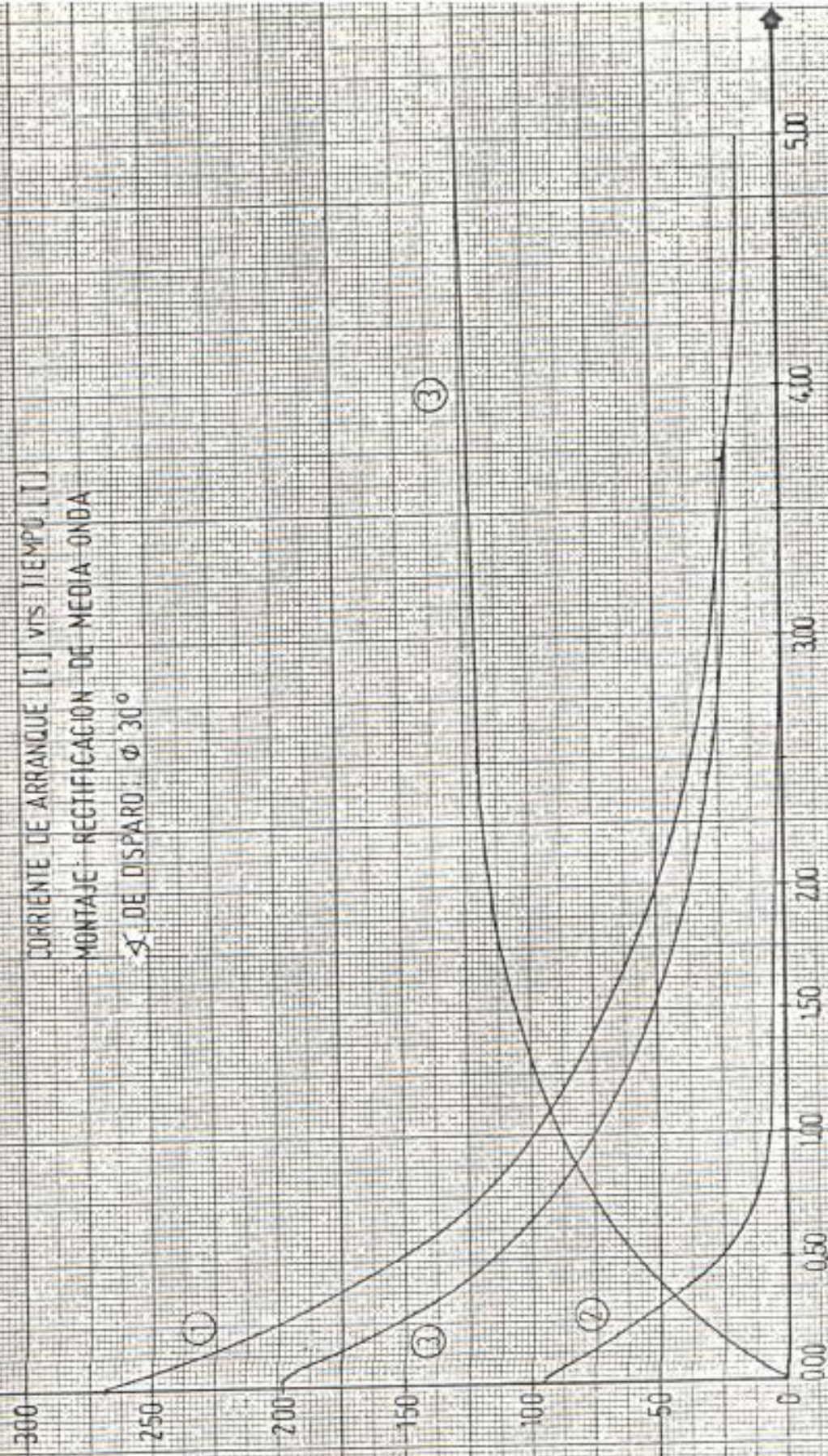


CORRIENTE DE ARRANQUE [I] V/S TIEMPO [t]

MONTAJE: RECTIFICACION DE MEDIA ONDA

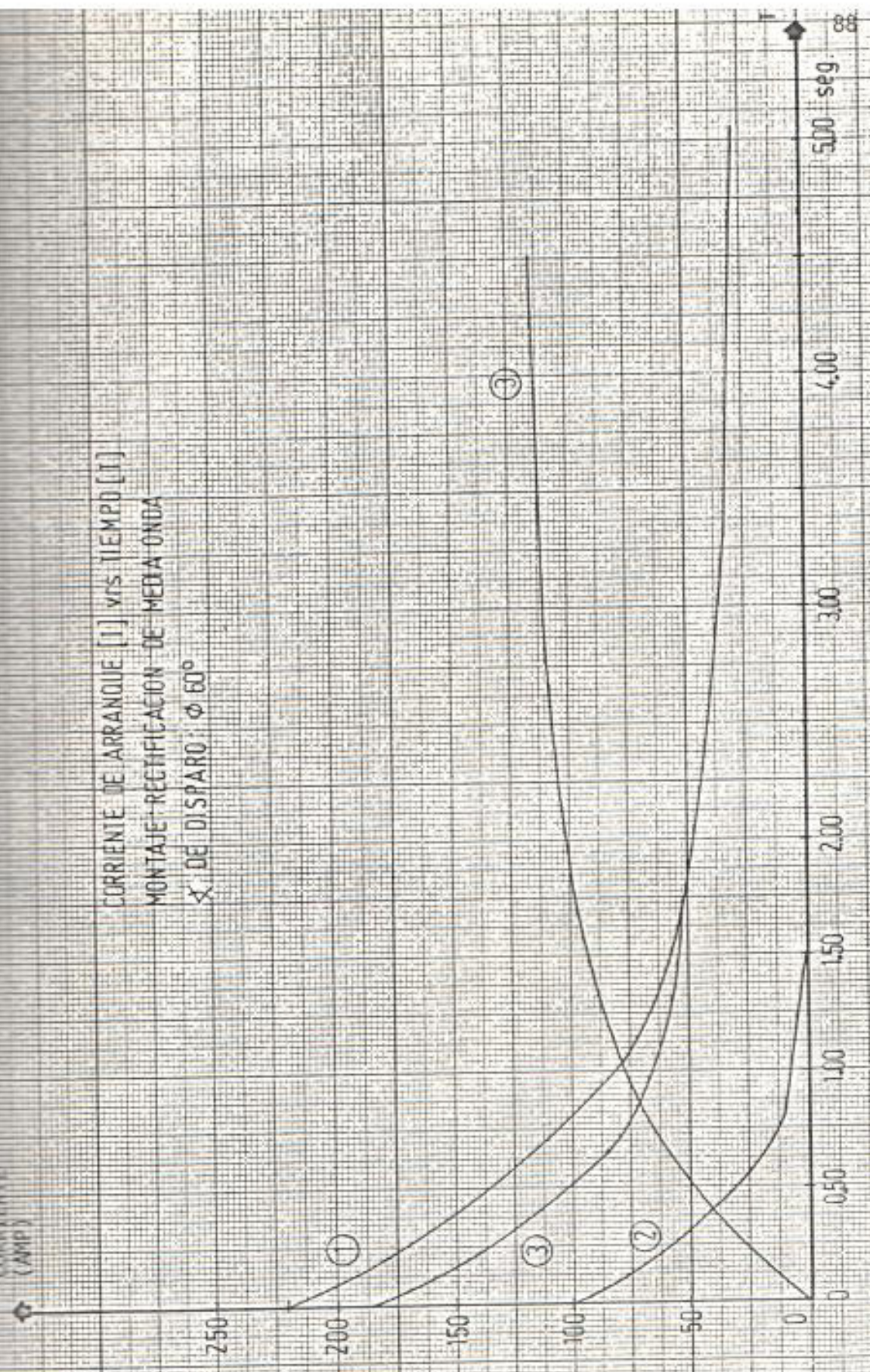
α DE DISPARO : $\phi = 0^\circ$

CORRIENTE DE ARRANQUE [I] V/S TIEMPO [s]
MONTAJE RECTIFICACION DE MEDIA ONDA
 α DE DISPARO: $\phi 30^\circ$



CORRIENTE (AMP)

CORRIENTE DE ARRANQUE [1] vrs TIEMPO [T]
MONTAJE RECTIFICACION DE MEDA ONDA
 α DE DISPARO $\phi 60^\circ$



5.00 seg.

4.00

3.00

2.00

1.50

1.00

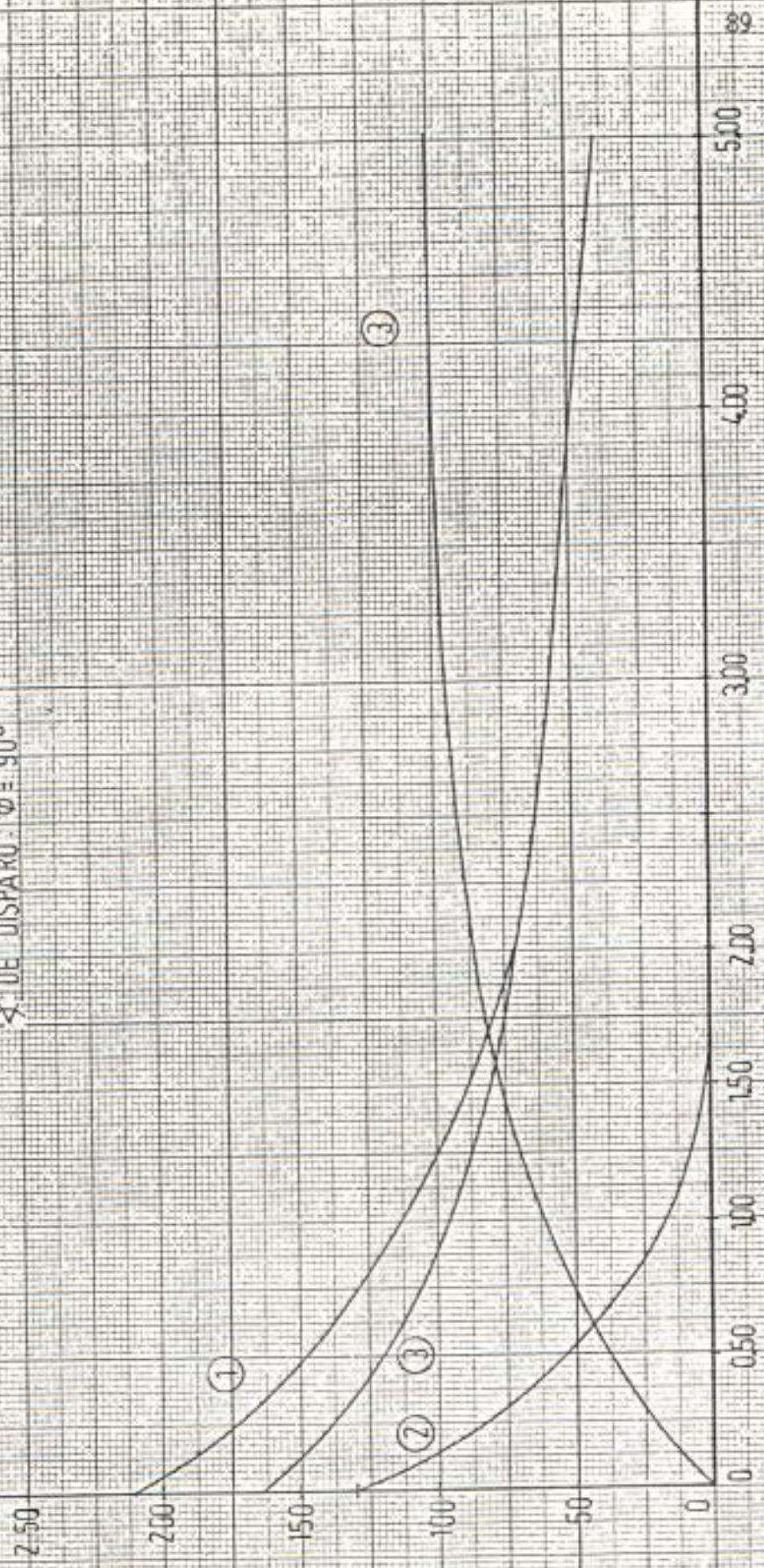
0.50

0

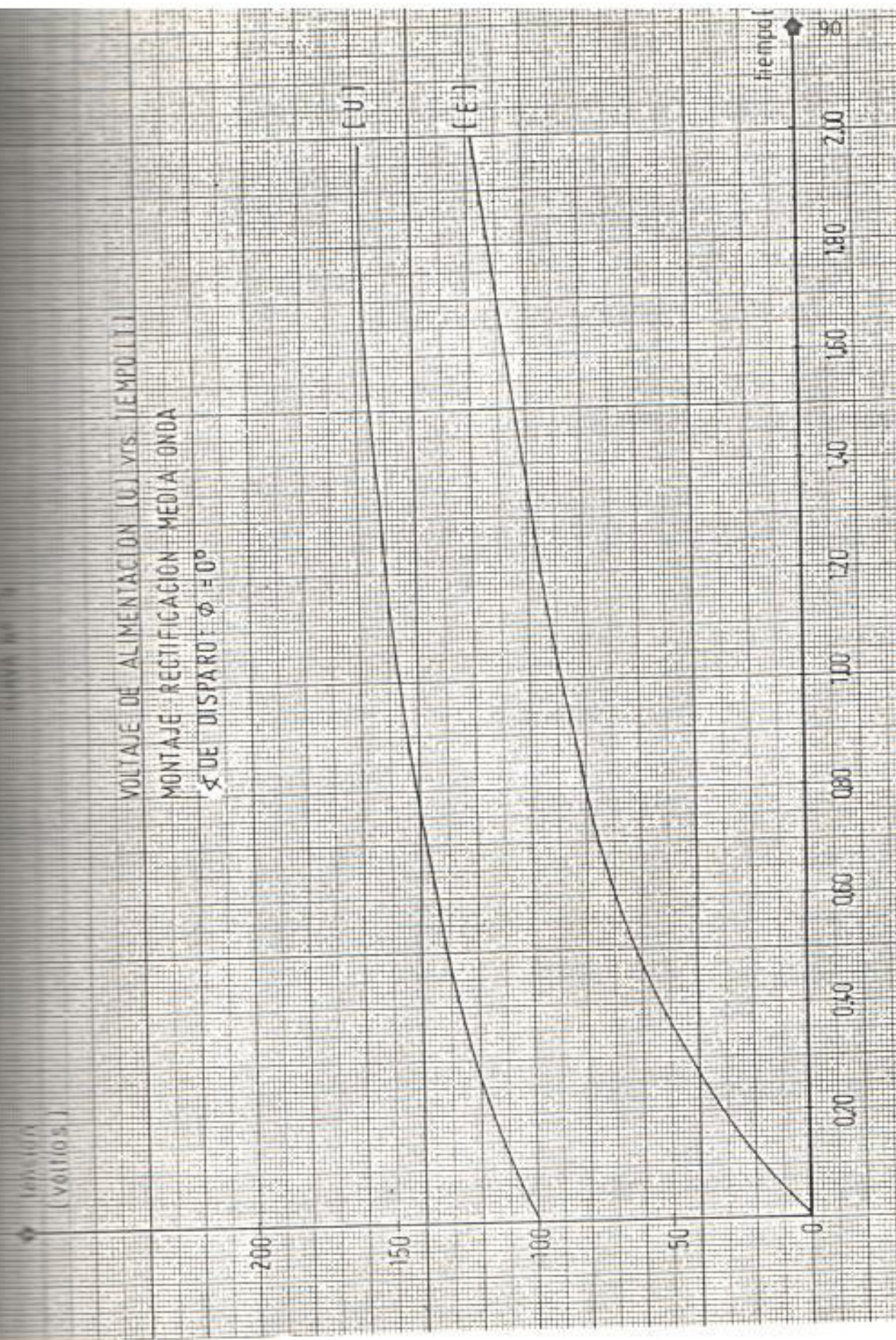
T

CORRIENTE (Amp)

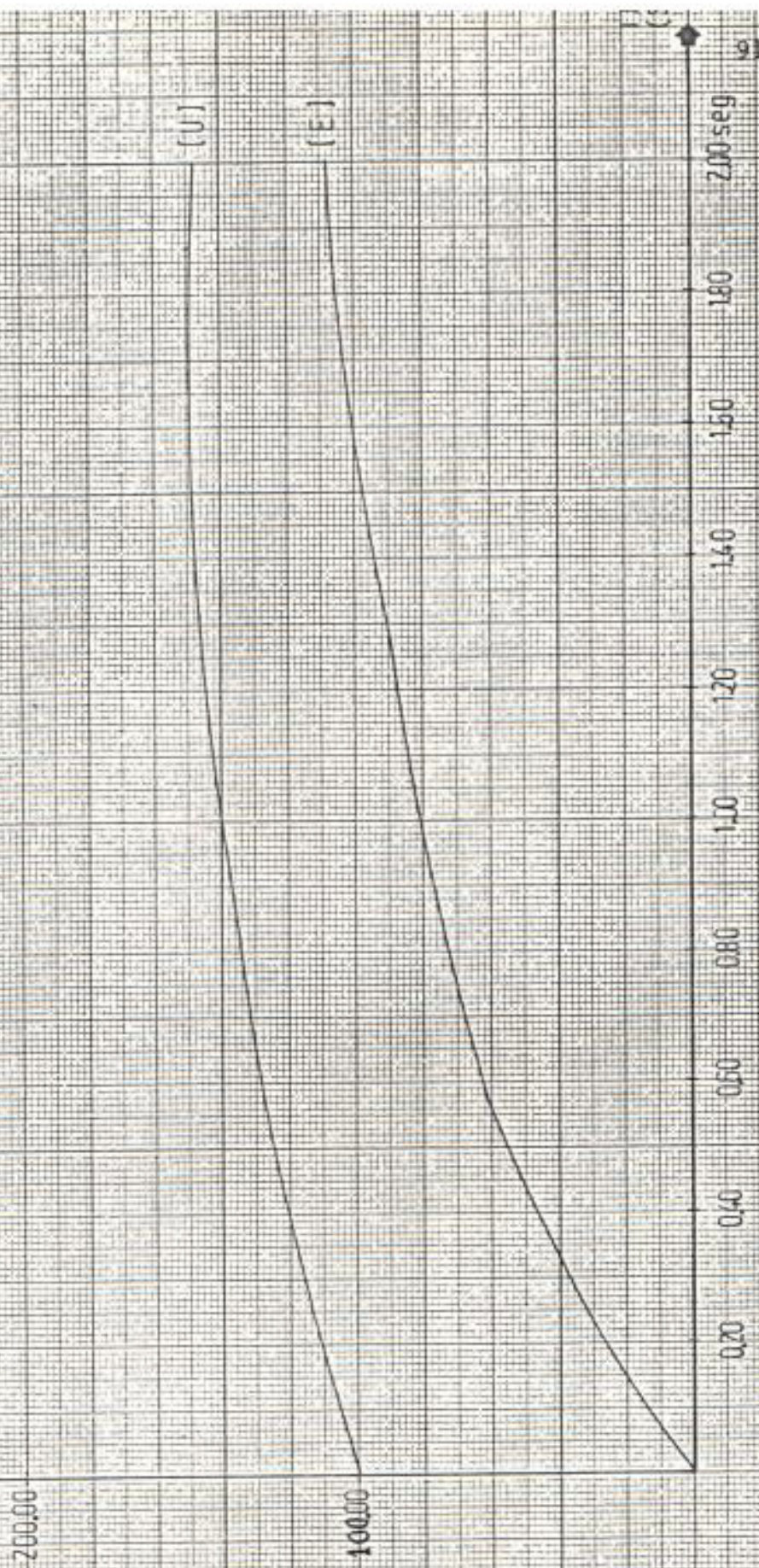
CORRIENTE DE ARRANQUE [I] vs TIEMPO [T]
MONTAJE RECTIFICACION DE MEDIA ONDA
 α DE DISPARO: $\phi = 90^\circ$



VOLTAJE DE ALIMENTACION (U) vs. TIEMPO (t)
MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA
 ϕ DE DISPARO: $\phi = 0^\circ$



VOLTAJE DE ALIMENTACION [U.] vs. TIEMPO [T.]
MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA
 α DE DISPARO $\phi = 30^\circ$



VOLTAJE DE ALIMENTACION [U] VRS. TIEMPO [T]
MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA
 α DE DISPARO: $\phi = 50^\circ$

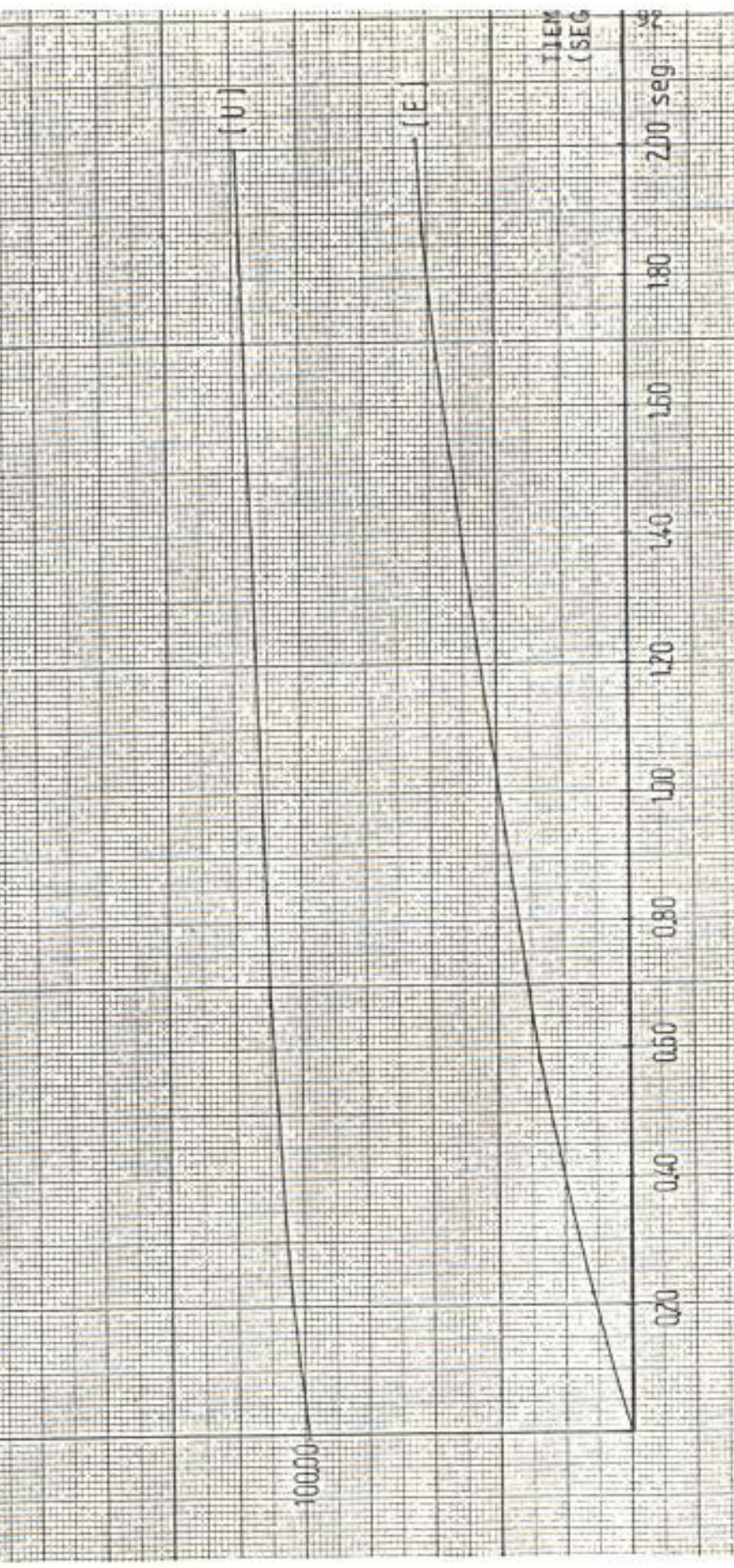
voltios
200,00

100,00

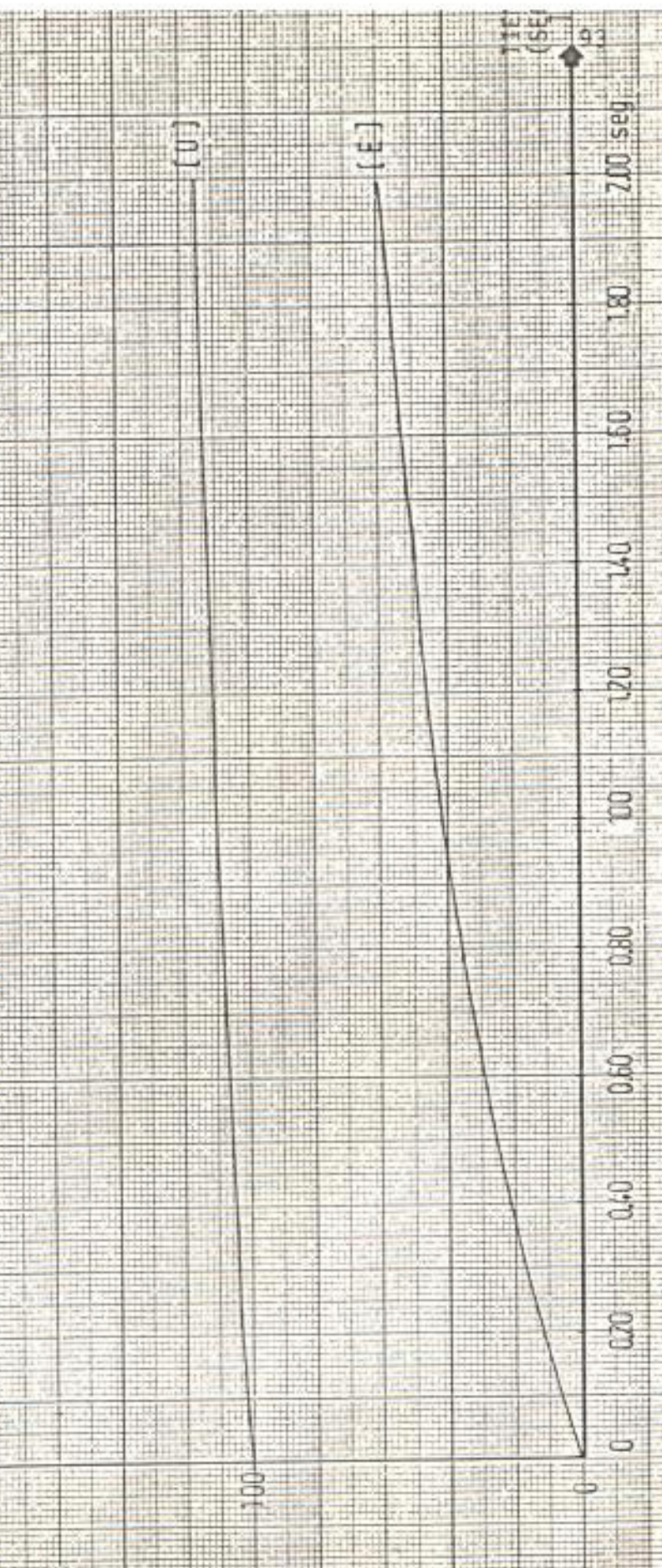
TIEMPO
(SEG)

0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 seg.

(U)
(E)



VOLTAJE DE ALIMENTACION [U] vs. TIEMPO [T]
 MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA
 \angle DE DISPARO $\phi = 90^\circ$



lor del voltaje de alimentación y la potencia eléctrica, para este ángulo de disparo, no fueron suficientes para superar el par resistente.

Para efecto de cálculos teóricos, en el instante en el que se inicia el arranque, se asume que el circuito del motor c.c. es el de la figura N° 20 puesto que en ese instante la f.c.e.m. E no existe.

Los valores de resistencia y de inductancia de armadura se los obtuvo de acuerdo a lo indicado en los anexos 3 y 4, respectivamente.

La expresión de la corriente promedio es:

$$I_R = \frac{I_{\text{máx}}}{2\pi} \int_{\phi}^{\phi+\gamma} \{ \text{sen}(\omega t - \theta) - \text{sen}(\phi - \theta) e^{(r/L)(\frac{\phi - \omega t}{\omega})} \} d(\omega t)$$

(Ver anexo N° 5)

ϕ = ángulo de disparo del tiristor

$$I_{\text{max}} = I_{\text{pico}}$$

La tabla N°3 indica valores de la corriente de armadura pico y promedio rectificadas en la envolvente al inicio del arranque del motor.

FIGURA N° 20

CIRCUITO EQUIVALENTE DE ALIMENTACION DE UN MOTOR C.C. EN EL INSTANTE DE ARRANQUE.

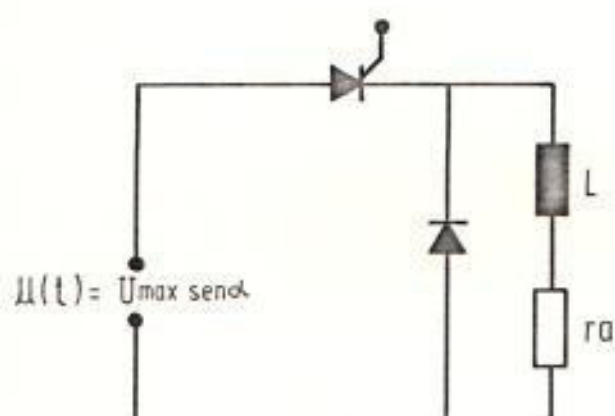


TABLA N° 3

VALORES DE CORRIENTE PICO Y RECTIFICADAS EN EL ARRANQUE

α DE DISPARO \varnothing	0°	30°	60°	90°
CORRIENTE PICO I_p (AMPERIO)	300	270	220	210
CORRIENTE RECTI- FICADA I_R (AMPERIO)	237	192	112	59

Con los valores obtenidos en la tabla N° 3, se puede decir que el motor podría arrancar con un ángulo de disparo entre los 90° y 60° porque la corriente de arranque promedio estaría ubicada entre un 219 % a 415 % de su valor nominal, observándose de las curvas 5 al 8 que el motor alcanza su estado estable aproximadamente a los 9 y 6 segundos, respectivamente.

En las curvas N° 5 al 8, se puede observar lo siguiente:

- La corriente en el instante de arranque que pasa por el SCR es la diferencia entre la corriente de armadura con la corriente que pasa por el diodo libre.
- Existe una corriente en el diodo libre durante el arranque a pesar de que se arranca al motor sin carga. En estado estable no circula corriente por el diodo antedicho. Esto tiene su explicación, puesto que, en estado estable, la corriente es totalmente discontinua. El término discontinuo es aplicado a la condición en el cual la corriente de armadura es igual a cero en cada semiciclo antes de ser disparado el tiristor. Esto es debido a un elevado Factor de Forma y además por que el sistema no tiene realimentación (lazo abierto).

Pero al inicio del arranque, como el par resistente es muy fuerte y además la f.c.e.m. es nula, la corriente adquiere un gran valor y su forma casi continua. La condición de continua es óptima y deseada puesto que se tiene mejor factor de forma.

- La corriente en el diodo de paso libre se hace cada vez mayor mientras aumenta el ángulo θ , puesto que aumenta el tiempo de aceleración del motor, en cuyo caso la f.c.e.m. crece más lentamente con la correspondiente disminución de la corriente de armadura.
- El tiempo que la máquina demora para estabilizarse es mayor mientras mayor es el ángulo θ porque la diferencia entre par motor y par resistente es menor entonces el tiempo de aceleración será mayor.
- La corriente pico y rectificadora en la armadura al momento del arranque disminuye de valor conforme el ángulo θ aumenta. Esta situación ocurre porque el voltaje promedio de alimentación es cada vez menor.
- La velocidad que alcanza el motor en cada caso es di

ferente y menor, conforme mayor es el valor del ángulo θ , esto es cierto porque la velocidad depende del voltaje de alimentación, corriente de armadura y flujo principal.

En las curvas 9 a 12, se puede distinguir lo siguiente:

- El voltaje de alimentación U cae en el momento del arranque pero a medida que el motor se acelera crece su f.c.e.m. con lo que el valor de la corriente disminuye y el voltaje de alimentación comienza a aumentar.
- La f.c.e.m. crece con mayor rapidez y alcanza un valor mayor cuando el valor del ángulo θ es menor.
- Se nota que el valor del voltaje pico de alimentación es igual en los 4 casos. Esto sucede debido a que las curvas corresponden a valores de la envolvente y en 0° , 30° , 60° y 90° el valor del voltaje pico es igual.

3.2.2. Análisis del funcionamiento del motor en estado estable:

Las tablas N^os. 4 a 8, indican los valores obtenidos

TABLA N° 4

ALIMENTACION DE MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA ϕ 0°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (lb-pie)	VELOCIDAD r.p.m.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS).	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
127.20	4.80	0.50	2875	301.06	610.56	201.71	0.33(*)
125.80	5.20	0.60	2835	296.88	654.16	238.69	0.36
121.00	7.60	1.00	2725	285.36	919.60	382.38	0.41(*)
115.20	8.80	1.60	2610	273.31	1013.76	585.97	0.57
109.40	11.00	2.40	2495	261.27	1203.40	840.24	0.69(*)
101.30	15.00	3.50	2335	244.52	1519.50	1146.79	0.75
98.20	16.50	3.90	2275	238.23	1620.30	1244.99	0.77
92.80	19.20	4.70	2190	229.33	1781.76	1444.32	0.81(*)

(*) según Oscilogramas N° 5 á 8

TABLA N° 6
ALIMENTACION DE MOTOR C.G. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA $\theta 30^\circ$

N°	TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AM-PERIOS)	PAR MOTOR (Lb.-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (Radianes/(VATIOS seguido))	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
1	126.70	4.75	0.50	2840	298.20	601.83	199.79	0.33 (*)
2	122.30	6.00	0.85	2750	288.75	733.80	386.93	0.53
3	115.90	8.00	1.40	2600	273.00	927.20	512.15	0.55
4	107.70	11.10	2.30	2430	255.15	1195.47	786.37	0.66 (*)
5	101.30	13.00	2.80	2340	245.70	1316.90	921.87	0.70
6	99.00	15.00	3.45	2240	235.20	1485.00	1087.33	0.73
7	97.00	16.00	3.70	2200	231.00	1552.00	1145.30	0.74
8	92.00	18.40	4.40	2120	220.50	1692.80	1300.07	0.77 (*)

(*) Según Oscilograma N°s 9 a 11

TABLA N° 6

ALIMENTACION DE MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA Ø60°

N°	TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (Lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA DE ENTRADA (VA TIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VA TIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCIO)
1	126.50	4.80	0.50	2750	287.97	607.20	192.93	0.31(*)
2	120.80	5.50	0.90	2580	270.17	664.40	325.83	0.49
3	114.50	8.00	1.45	2470	258.65	916.00	502.55	0.59
4	104.60	11.30	2.35	2280	238.76	1181.98	751.85	0.63(*)
5	99.90	13.00	2.80	2240	234.57	1298.70	880.10	0.67
6	97.30	14.70	3.00	2180	228.28	1430.31	917.72	0.65
7	92.80	15.60	3.55	2110	220.95	1447.68	1051.05	0.72
8	91.30	16.30	3.70	2090	218.86	1488.19	1085.12	0.73(*)

(*) Según Oscilograma N° 12 á 14

TABLA N° 7

ALIMENTACION DE MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA ϕ 90°

N°	TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS).	PAR MOTOR (lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
1	105.00	4.60	0.55	2410	253.05	483.00	186.50	0.39 (*)
2	97.00	5.80	0.85	2230	234.15	562.60	266.70	0.47
3	91.70	6.70	1.15	2101	220.60	614.39	339.94	0.55
4	83.00	9.00	1.75	1920	201.60	747.00	472.75	0.63
5	78.40	10.40	2.15	1810	190.05	815.36	547.53	0.67 (*)
6	71.40	12.10	2.70	1650	173.25	863.94	626.82	0.73
7	67.90	13.10	3.00	1580	165.90	889.49	666.92	0.75
8	60.40	15.20	3.55	1410	148.05	918.08	704.27	0.77 (*)

(*) según Oscilograma N° 15 a 17

TABLA Nº B

ALIMENTACION DE MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA Ø120°

Nº	TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (Lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/segundos)	POTENCIA ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
1	61.10	3.00	0.50	1440	151.20	183.30	101.30	0.55 (*)
2	46.20	6.00	1.15	1100	115.50	277.20	177.99	0.64
3	41.40	6.80	1.50	960	100.80	278.80	202.61	0.73
4	35.00	8.00	1.70	840	88.20	280.00	200.92	0.72
5	31.00	8.70	2.20	660	69.30	269.70	204.30	0.76
6	30.00	9.00	2.30	640	67.20	270.00	207.11	0.77
7	26.00	9.50	2.55	550	57.75	247.00	197.33	0.80
8	23.50	10.00	2.70	495	51.97	235.00	188.03	0.80 (*)

(*) Según Oscilograma Nº 18 y 19.

de las experiencias realizadas.

La expresión del voltaje promedio para esta experiencia es la siguiente:

$$U_{\text{prom}} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\phi}^{\pi} U_{\text{max}} \text{sen}(\alpha + 2\pi E \frac{\gamma}{180}) \right.$$

γ = posición del ángulo donde interviene la f c e m
 (E)

$$\alpha = 2\pi ft = \omega t$$

La expresión de la corriente de armadura viene dada por:

$$i_1 = \frac{U_{\text{max}}}{Z} \text{Sen}(\alpha - \theta + \phi) - \frac{E}{r_a} + Ae^{-\frac{r_a}{L}t}$$

También la corriente que circula por el diodo de paso i_2 (de descarga) viene dada por la ecuación:

$$i_2 = -\frac{E}{r_a} + A' e^{-\frac{t}{\tau_m}}$$

Para obtener el valor de A' se necesitará de condiciones iniciales tomadas de la ecuación i_j cuando el voltaje de alimentación se hace cero.

Los oscilogramas obtenidos N^o 5 al 19, muestran: en la parte superior el voltaje de alimentación U con el efecto respectivo de la f.c.e.m. E y en la parte inferior aparece la corriente de armadura fuera del lazo armadura - diodo de paso libre, por lo tanto no se observa la corriente de descarga en los oscilogramas a excepción de los siguientes: 11, 14.

Los casos donde no hay corriente de descarga por el diodo de paso libre, son aquellos en los cuales el motor está funcionando con un valor de carga menor al 50 % de su potencia nominal, porque el valor de la corriente de armadura se hace cero momentos antes que lo haga el voltaje de alimentación U ; además, el valor de la f.c.e.m. E es muy cercano al del valor promedio de U . El motor es cargado gradualmente (incremento del par de carga) y se puede apreciar esto en orden numérico - en los oscilogramas, para los diferentes ángulos de disparo. Además se producen ciertos efectos tales como

ALIMENTACION: CON RECTIFICACION DE MEDIA ONDA

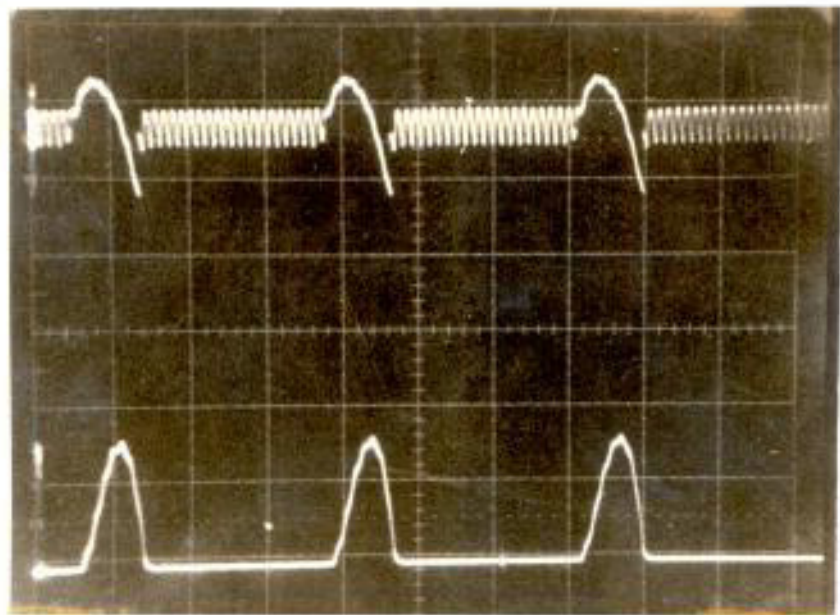
ONDAS SUPERIORES: VOLTAJE DE ALIMENTACION(u)

ONDAS INFERIORES: CORRIENTE DE ARMADURA (i)

$u : 50 \text{ V/div.}$

$\theta : 0^\circ$

$i : 20 \text{ Amp/div.}$



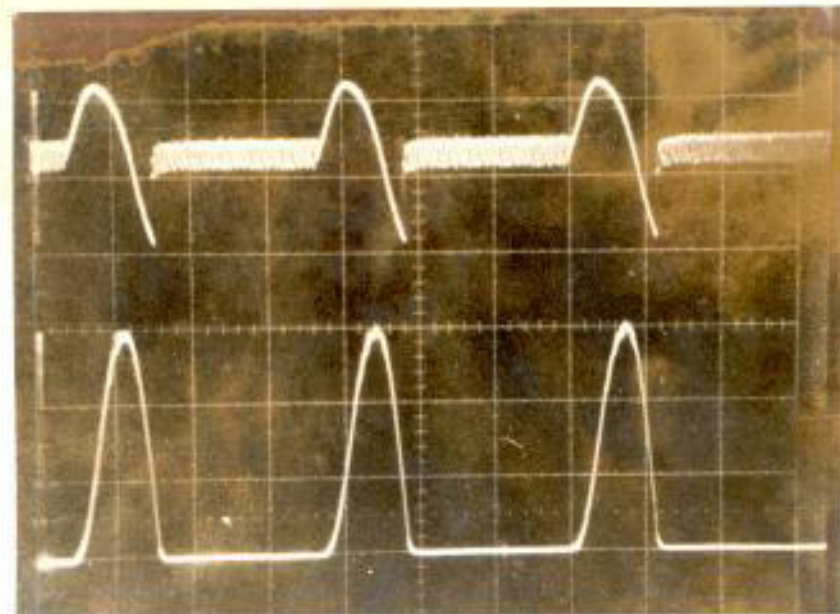
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 6

$u : 50 \text{ V/div.}$

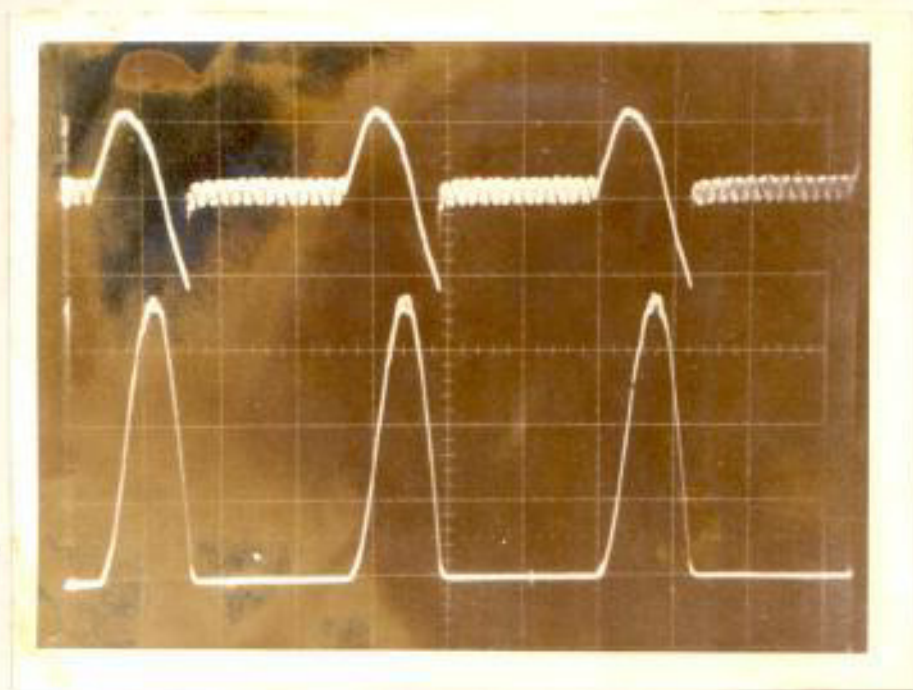
$\theta : 0^\circ$

$i : 20 \text{ Amp/div.}$



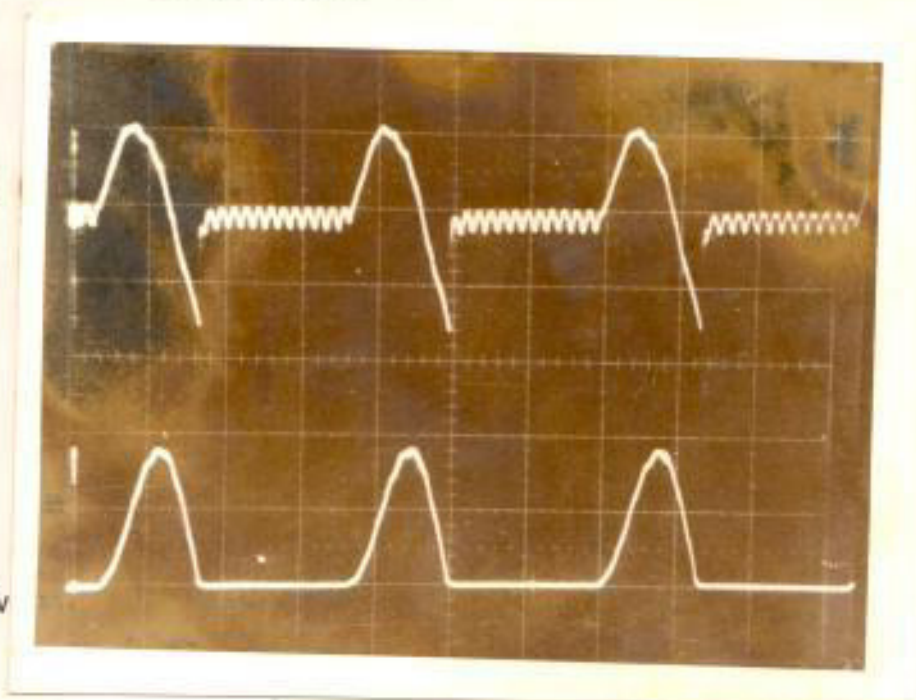
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 7

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varphi : 0^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

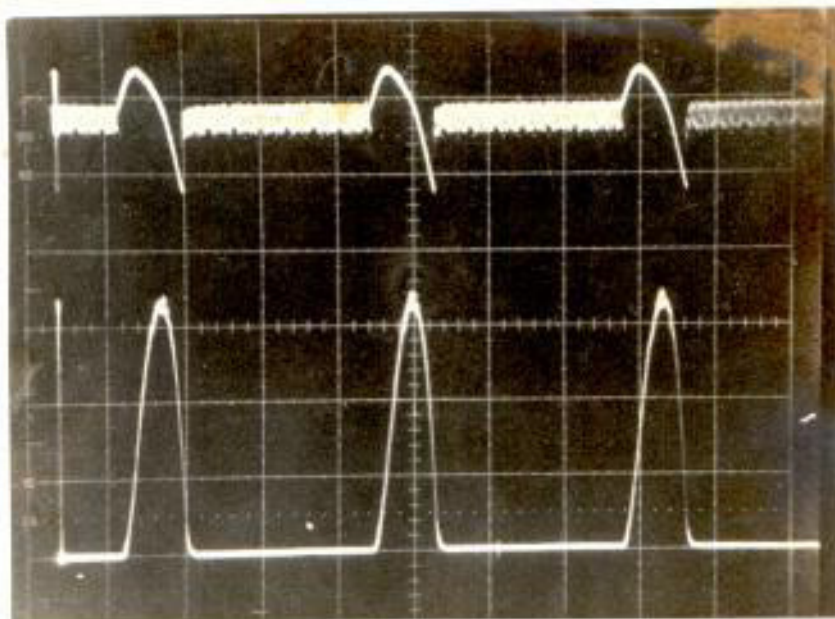
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 8

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varphi : 0^\circ$ $i : 50 \text{ Amp/div}$ 

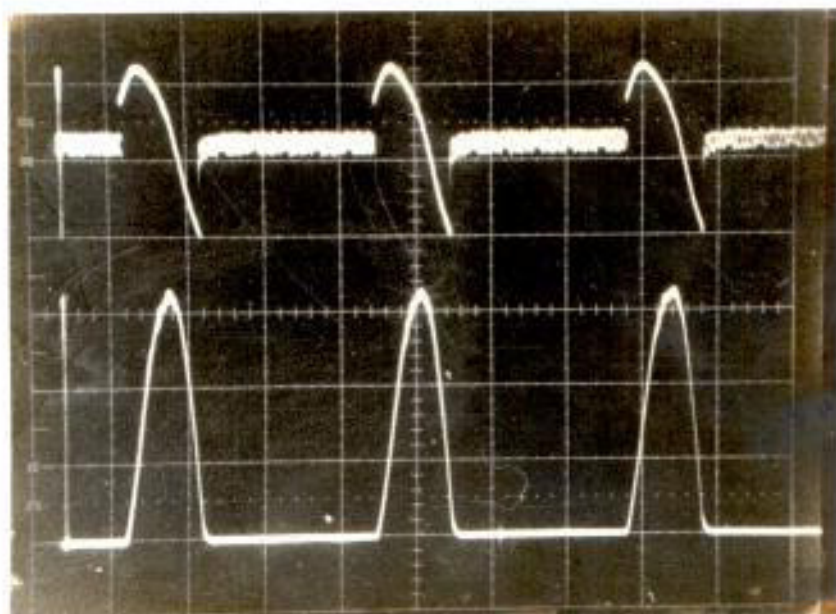
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 9

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varphi : 30^\circ$ $i : 10 \text{ Amp/div.}$ 

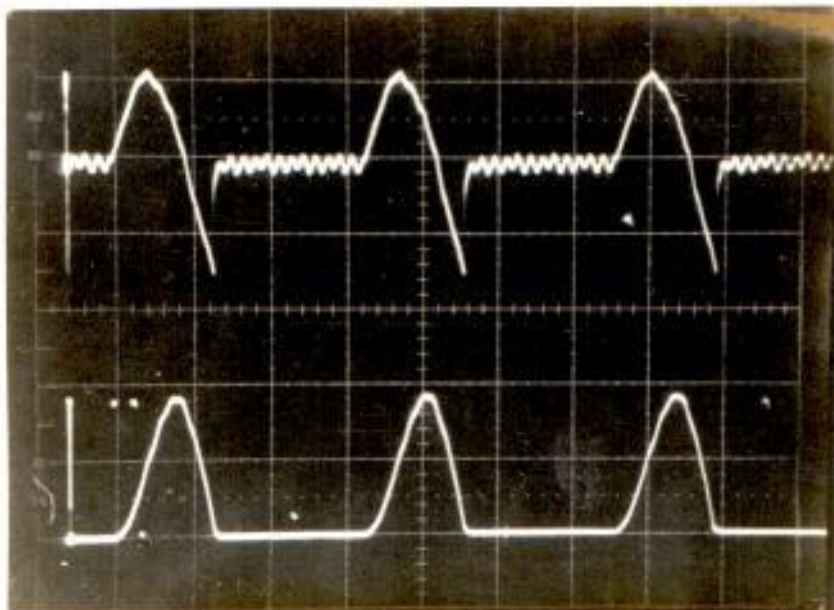
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 10

 $u : 50 \text{ V/div}$ $\varphi : 30^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

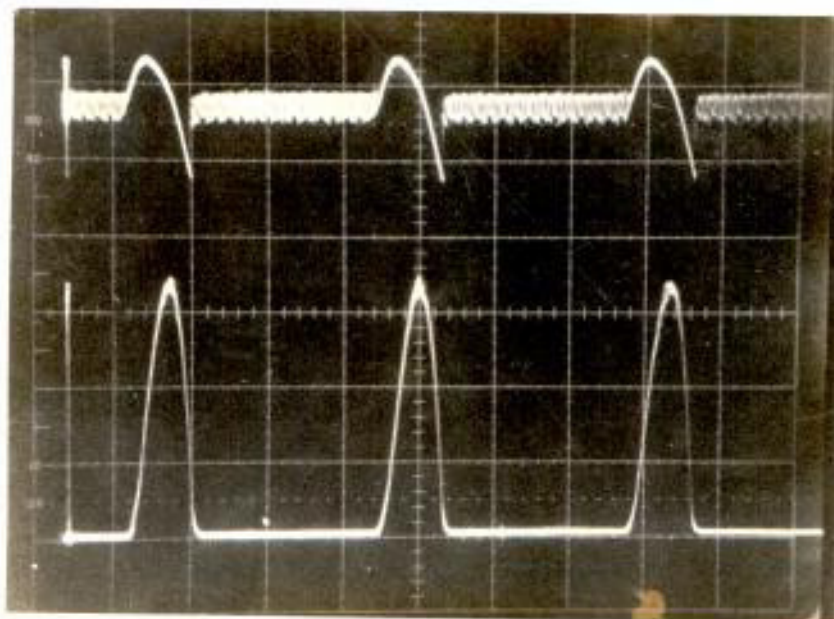
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 11

 $\mu = 50 \text{ V/div}$ $\theta = 30^\circ$ $\omega = 50 \text{ Amp/div}$ 

Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 12

 $\mu = 50 \text{ V/div}$ $\theta = 60^\circ$ $\omega = 10 \text{ Amp/div}$ 

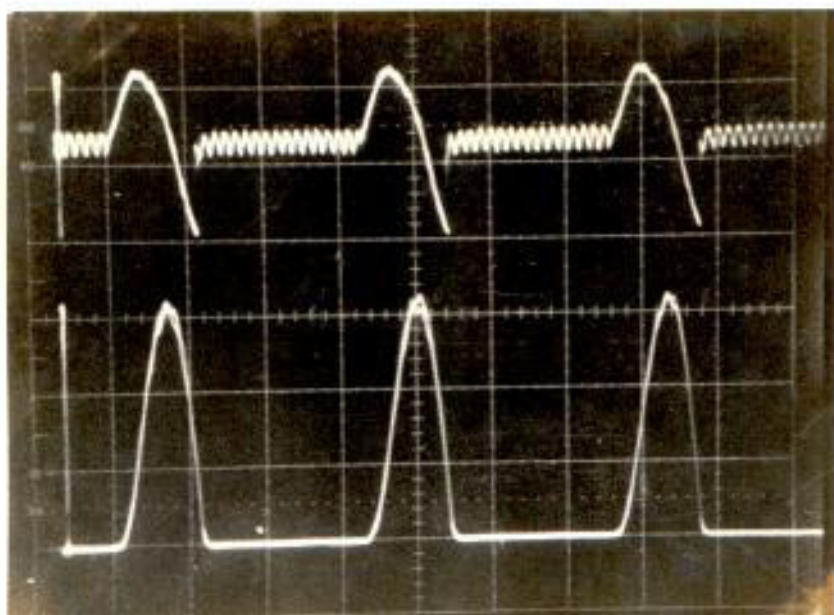
Tiempo : 5 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 13

u : 50 V/div

θ : 60°

i : 20 Amp/div.



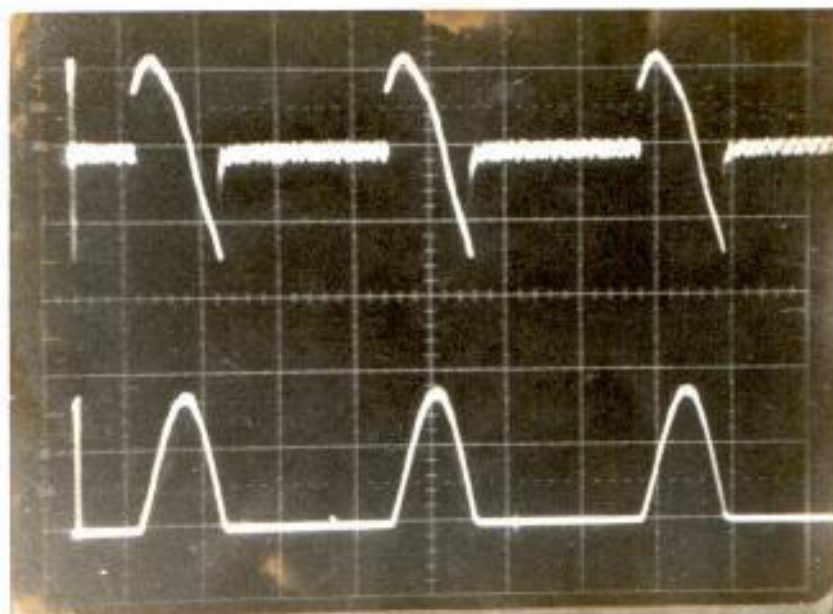
Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 14

u : 50 V/div.

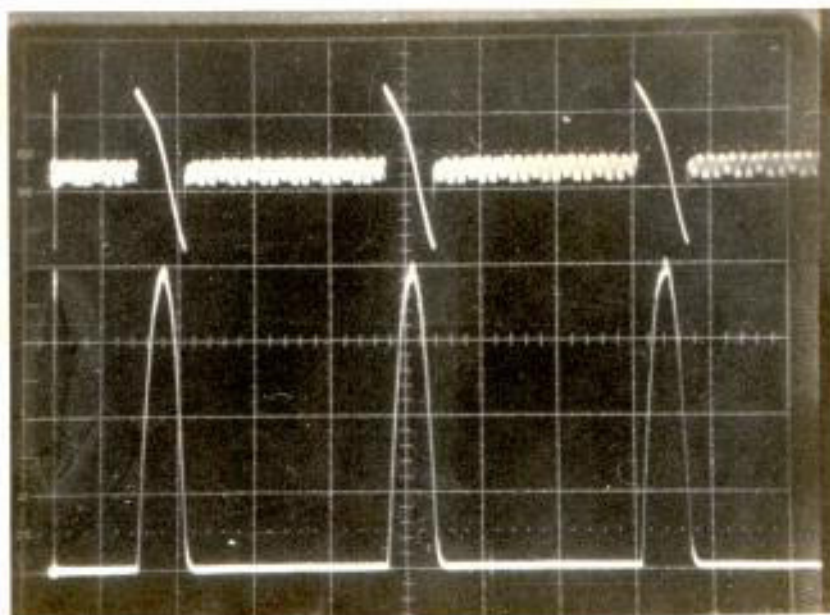
θ : 60°

i : 50 Amp/div.



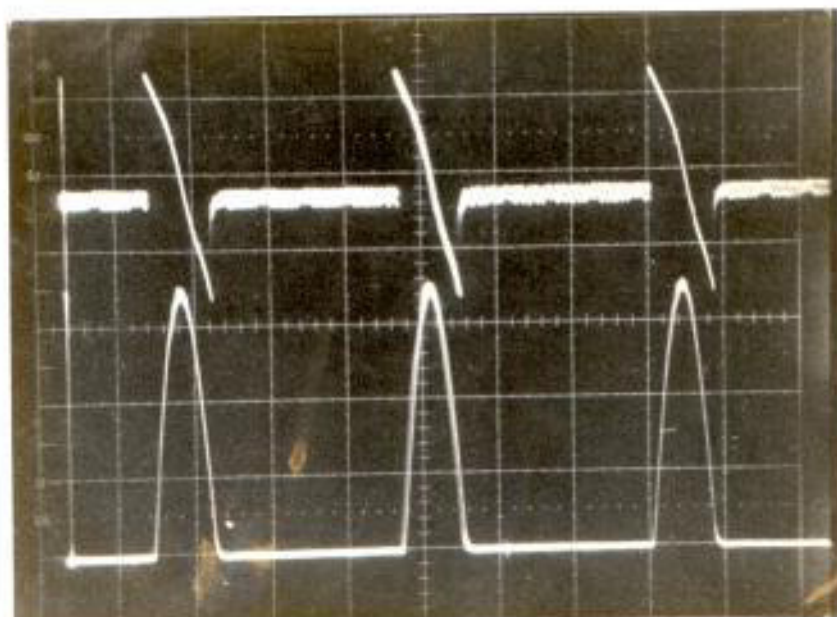
Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 15

 $u : 50 \text{ V/div}$ $\theta : 90^\circ$ $i : 10 \text{ Amp/div}$ 

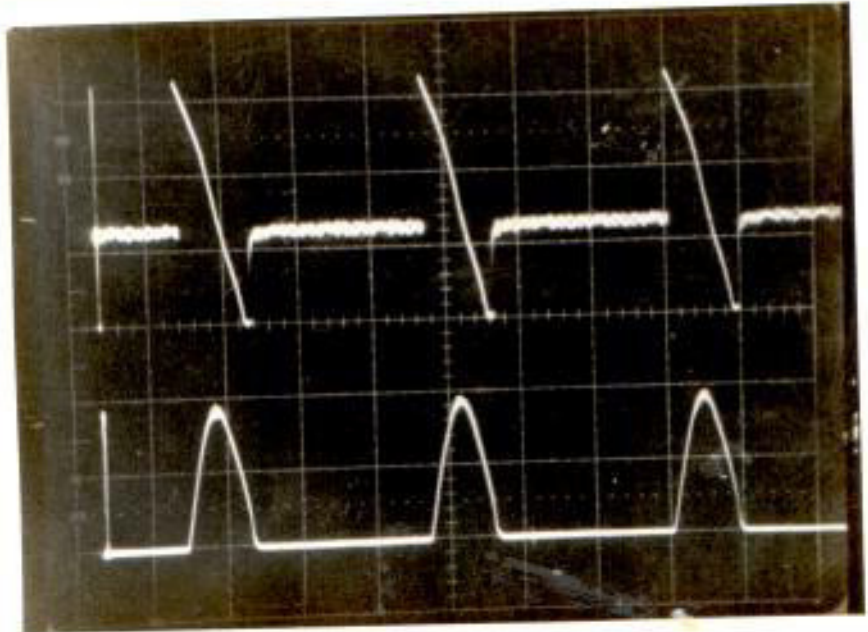
Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 16

 $u : 50 \text{ V/div}$ $\theta : 90^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

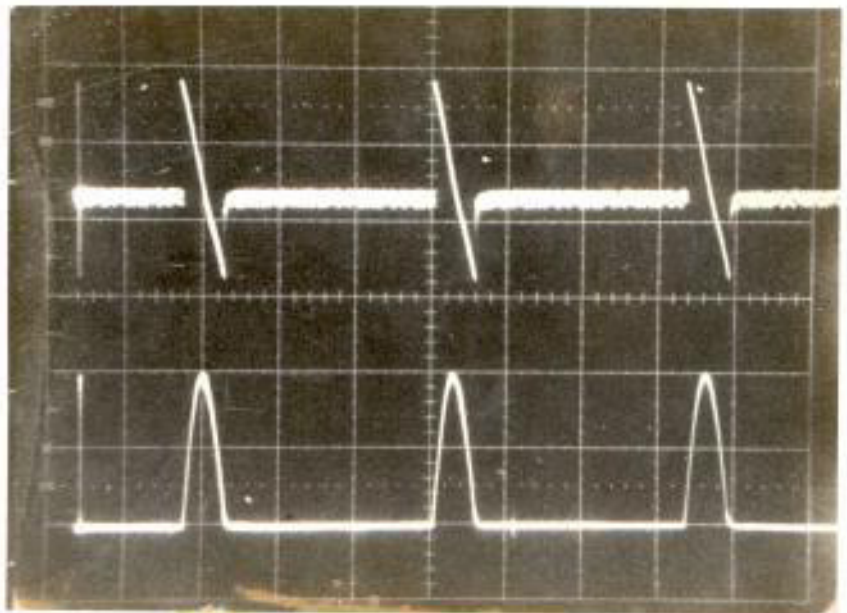
Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 17

 $u : 50V/div$ $\theta : 90^\circ$ $i : 50 \text{ Amp/div}$ 

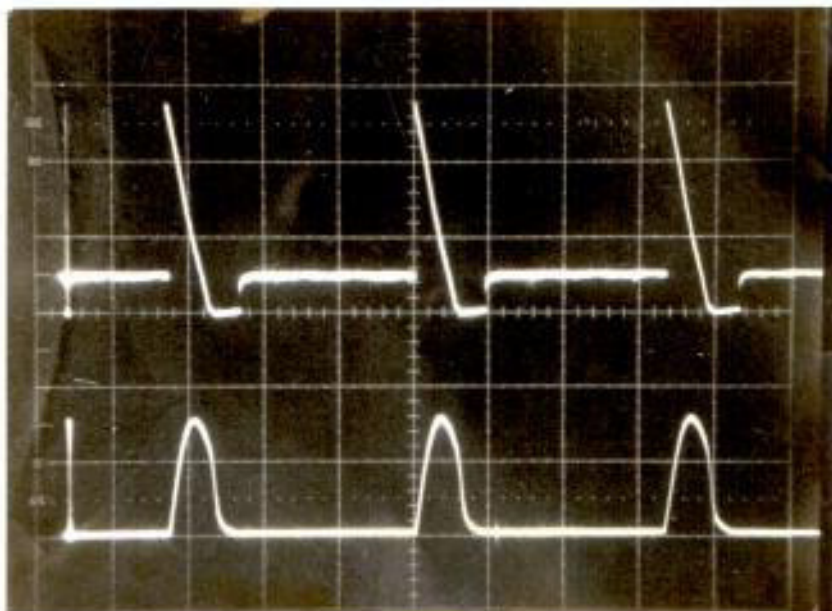
Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 18

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 120^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

Tiempo : 5 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 19

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 120^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

Tiempo : 5 miliseg/div.

mo el aumento de la amplitud de la onda de corriente y la disminución del valor de la f.c.e.m. Por lo tanto, se incrementa el período de conducción de la corriente y decrece la posición de intervención de la f.c.e.m en el semiciclo (γ). Se puede decir que al incrementar el par de carga el voltaje de alimentación pico decrece levemente, pero no así el voltaje promedio que tiene una variación más acentuada debido a la disminución de la f c e m E. Figura N° 21.

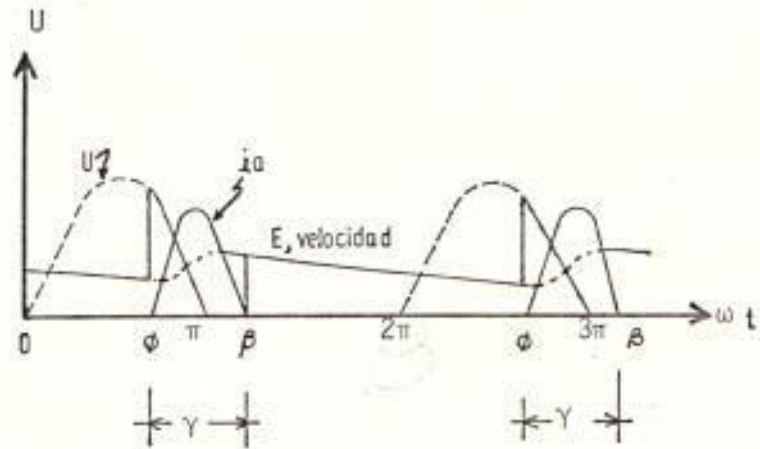
3.2.2.1. Curva característica del par $C_m = f(I)$

Como el flujo principal permanece constante, entonces el par motor varía solo con la corriente de armadura; teóricamente se debe obtener una recta.

Sin embargo, en las curvas 13 a 17, existe una parte donde el par motor no crece en forma lineal con la corriente; esto se debe a que se incrementa la reacción del inducido y el flujo resultante disminuye igual a lo ocurrido con la curva de magnetización.

FIGURA N° 21

FORMAS DE ONDAS DEL VOLTAJE, CORRIENTE, f.e.c.m. DE UN MOTOR C.C. CUANDO ES ALIMENTADO A TRAVES DE UN RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA CONTROLADO.



MEMORANDUM FOR THE RECORD
SUBJECT: MONTAJE DE CORRIENTE DE ARMADURA

PAR (C) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)

MONTAJE: RECTIFICACION MEDIA ONDA

ϕ DE DISPARO: $\phi = 0^\circ$

ϕ (lb-pie)

800

700

600

500

400

300

200

100

0

11,500

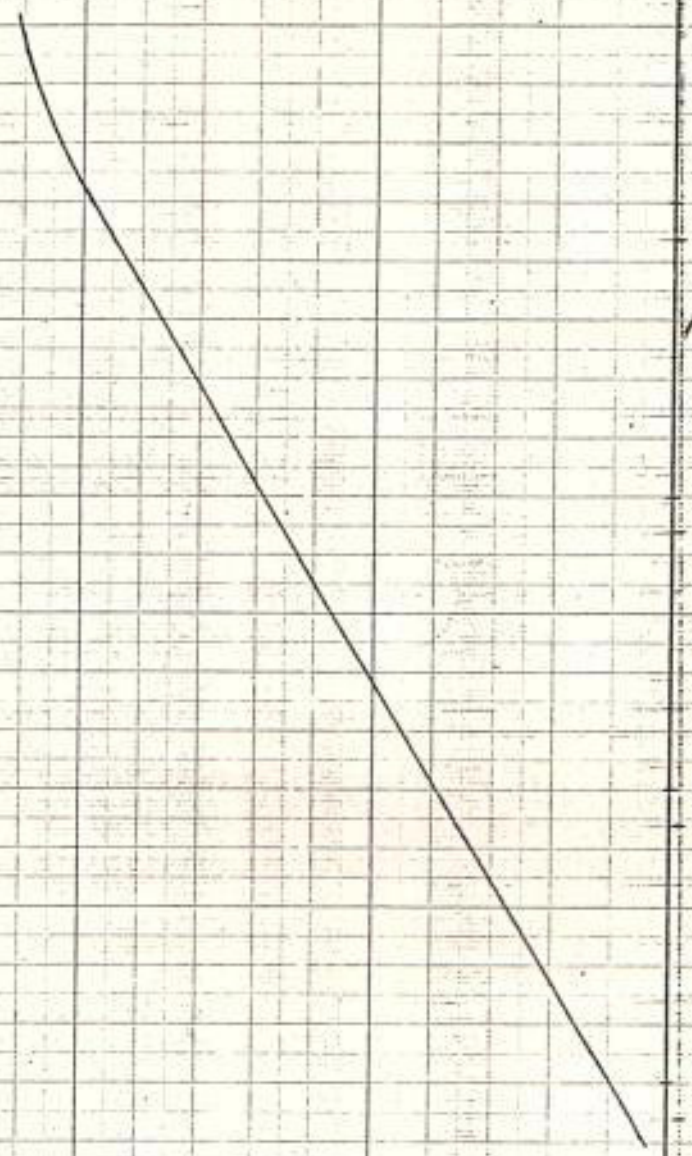
11,000

11,500

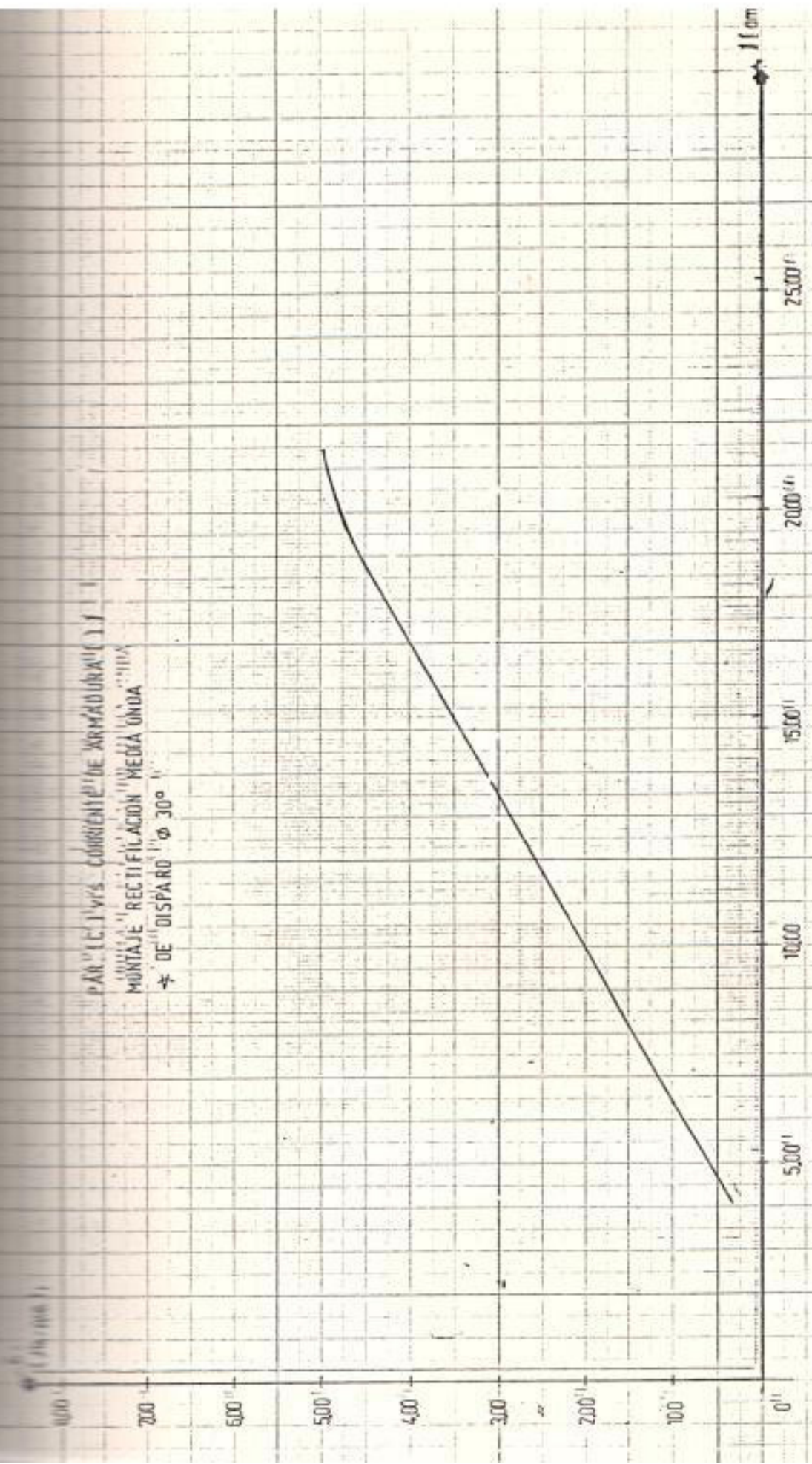
11,000

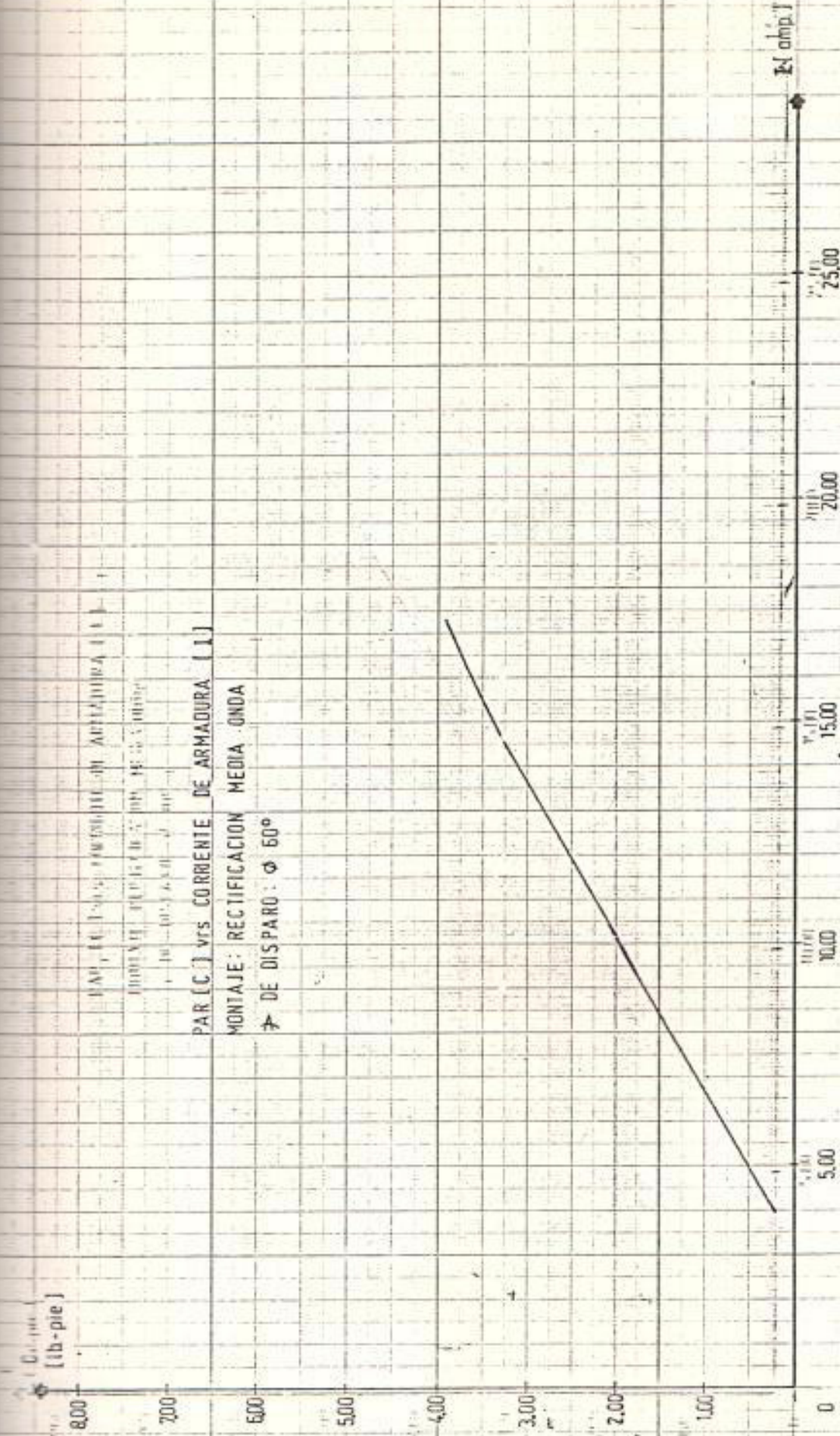
11,500

1 empty (cm)



PÁR. (C.I.) VS. CONVENIENTE DE ARMADURA ()
MONTAJE " RECTIFICACION " MEDIA ONDA
* DE " DISPARO " ϕ 30°

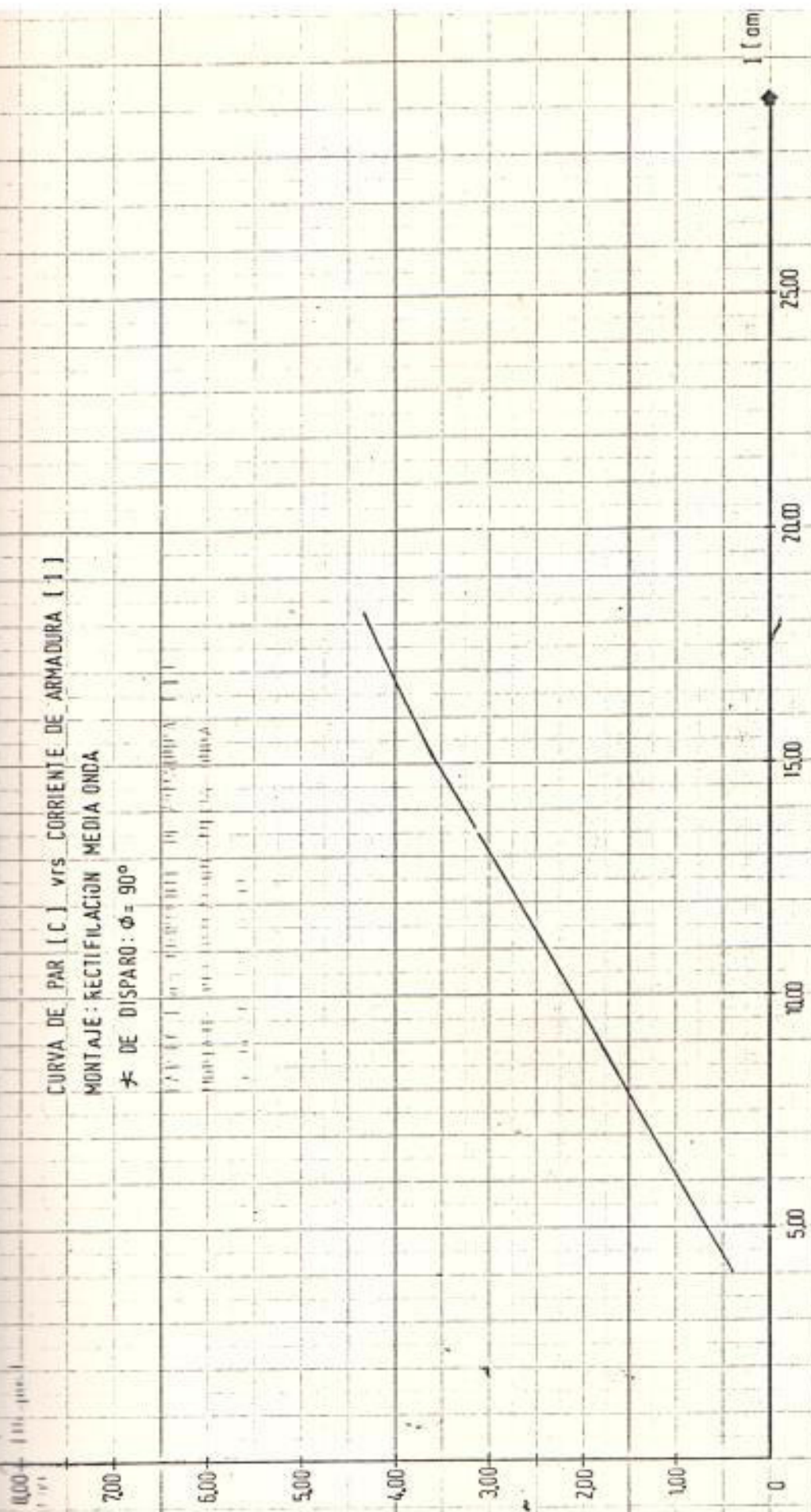




PAR (C) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
 MONTAJE: RECTIFICACION MEDIA ONDA
 ANGULO DE DISPARO : $\phi = 60^\circ$

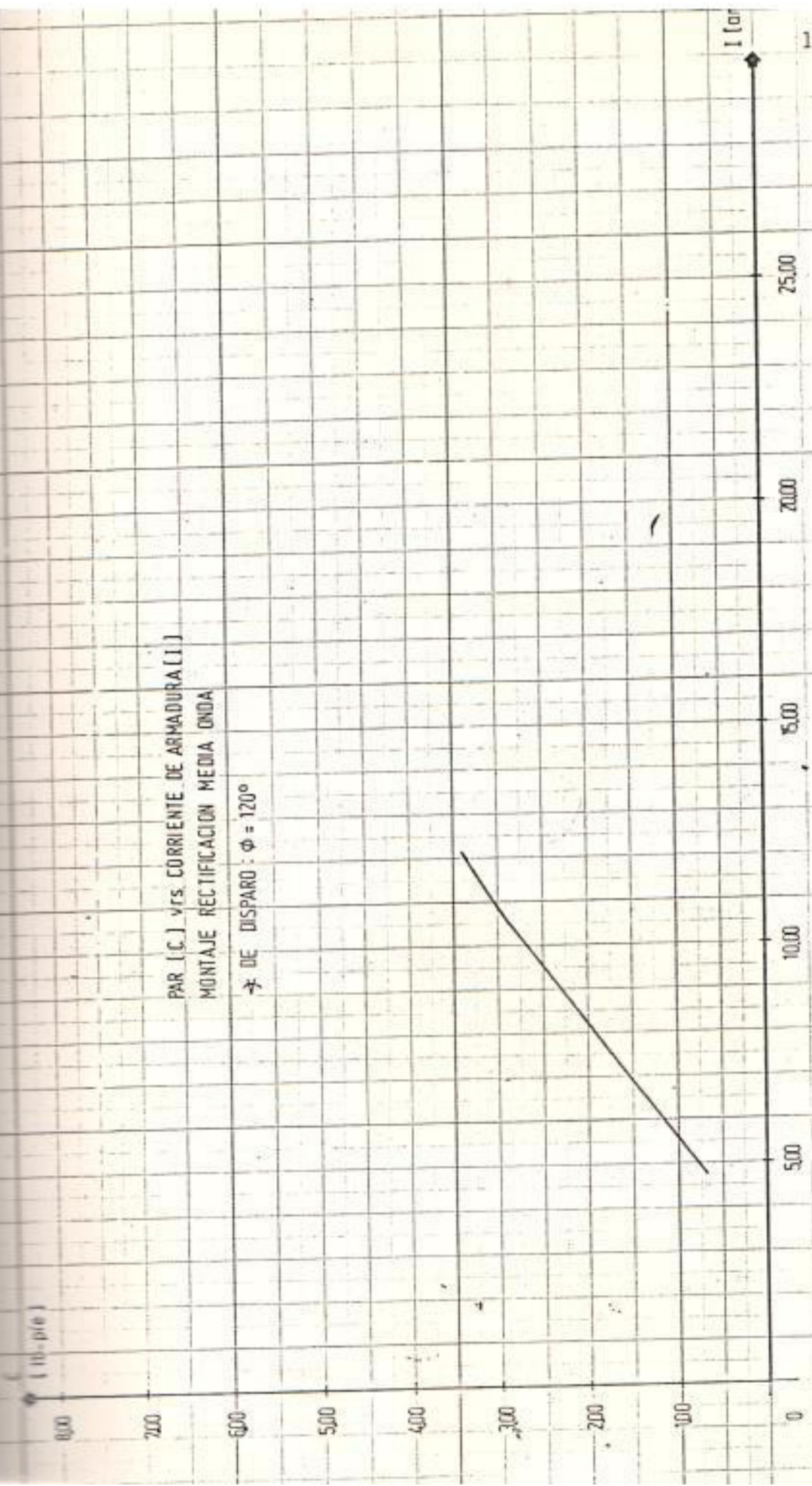
El amp

CURVA DE PAR [C] VRS CORRIENTE DE ARMADURA [I]
MONTAJE: RECTIFICACION MEDIA ONDA
* DE DISPARO: $\phi = 90^\circ$



PAR [C.] vs. CORRIENTE DE ARMADURA [I]
MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA

→ DE DISPARO : $\phi = 120^\circ$



El motor no se lo puede cargar a su valor nominal puesto que, a pesar de que el transformador de alimentación es de 6 KVA (dos veces la capacidad del motor), es saturado rápidamente y esta saturación se hace cada vez mayor mientras se vaya incrementando el valor del ángulo de disparo del tiristor.

Debido a lo anteriormente expuesto, de las curvas 13 a 17 se escogen 4 valores de par motor de los cuales se obtienen ciertos porcentajes de corriente nominal (tabla N° 9).

Con este tipo de montaje para la alimentación del motor se puede obtener hasta un 71 % de su capacidad total .

Además, se nota que el efecto de reacción de armadura, conmutación y saturación magnética se acentúa mucho cuando se alimenta al motor disparando el tiristor a 90° y 120°. (Ver curvas N° 13 al N° 17).

TABLA N° 9

% CORRIENTE NOMINAL EN BASE A VALORES FIJOS DE PAR MOTOR Y DIFERENTES ANGULOS DE DISPARO.

\varnothing par carga lb-pie	0°	30	60	90	120
1.50	30	30	30	29	25
3.00	50	50	50	48	-
4.50	70	70	-	-	-
4.70	71	-	-	-	-

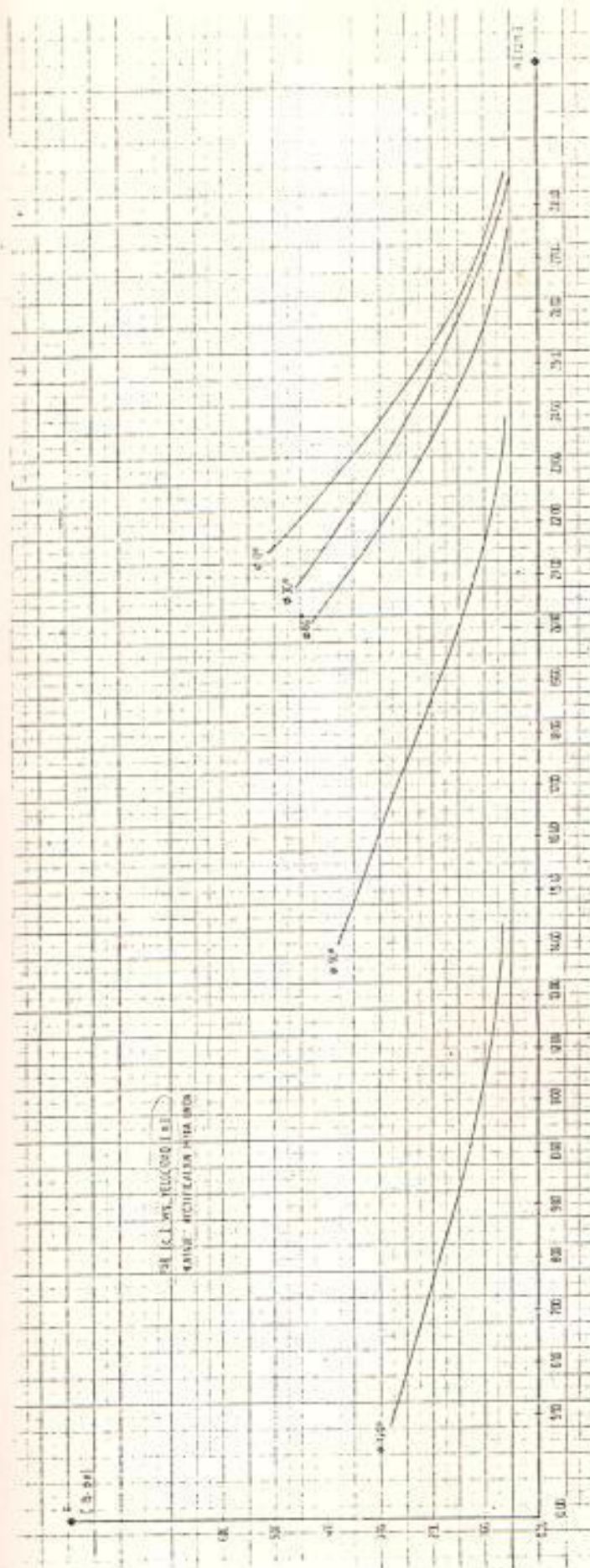
3.2.2.2. Curva Característica mecánica $C_m = f(n)$

La curva 18 muestra la velocidad de funcionamiento del motor en estado estable para un cierto valor de par motor ; se observa que las curvas cuyo ángulo $\theta = 0^\circ$ y 30° , tienden a unirse para valores reducidos del par motor y ; esto se debe a que la diferencia del voltaje medio de alimentación correspondiente es mínima.

Manteniendo constante el par motor para todas las curvas a diferentes ángulos de disparo se observa que la velocidad disminuye cuando se incrementa el ángulo θ . Esto se debe a que al incrementarse el valor de θ disminuye el valor del voltaje medio y por lo tanto también el valor de la f.c.e.m.

Además, puede observarse que el incremento del ángulo θ produce una reducción del valor de la pendiente de las curvas, de lo cual se deduce que el motor se vuelve cada vez menos estable.

PAR (C) VS. VELOCIDAD (n)



De estas curvas se obtiene el porcentaje (%) de regulación de velocidad para todas las condiciones de disparo y para 4 puntos de carga Ver tabla N° 10 .

Luego, para diferentes condiciones de disparo y para un mismo par de carga, existe una diferencia en el porcentaje de regulación debido a una disminución del valor del voltaje medio de alimentación.

Uno de los mayores problemas que causa esta pobre regulación de velocidad es el efecto de la saturación magnética, la cual va íntimamente ligada con el factor de forma del tipo de montaje de rectificación.

El factor de forma se define como la relación existente entre los valores eficaz y medio de la tensión rectificada.

$$F_f = \frac{U}{U_R} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

TABLA N° 10

% REG. VELOCIDAD EN BASE A LA VARIACION DE ϕ

ϕ PAR CARGA (Lb-pie)	0°	30°	60°	90°	120°
1.50	9.73	10.07	12.01	22.95	60.89
3.00	19.73	23.31	27.31	51.57	
4.50	29.50	35.56	-	-	-
4.70	31.30	-	-	-	-

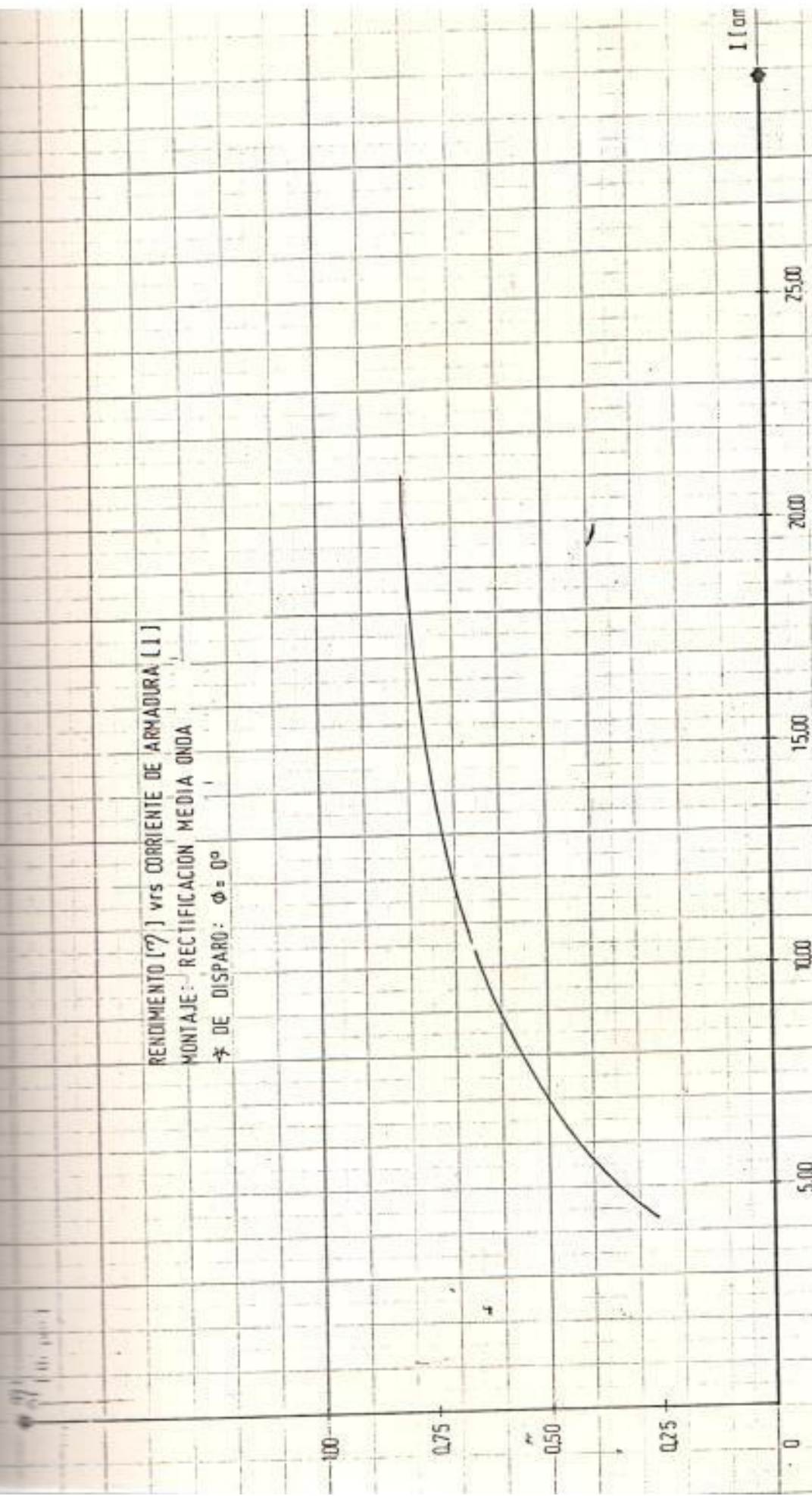
Cuando un montaje de rectificación tiene un factor de forma cercano a la unidad, el rendimiento es mucho mayor, como se apreciará en el capítulo siguiente.

3.2.2.3. Curva Característica de rendimiento $\eta = f(I)$

Esta característica se muestra en las curvas N^o 19 a 23 , donde se apreciará lo siguiente:

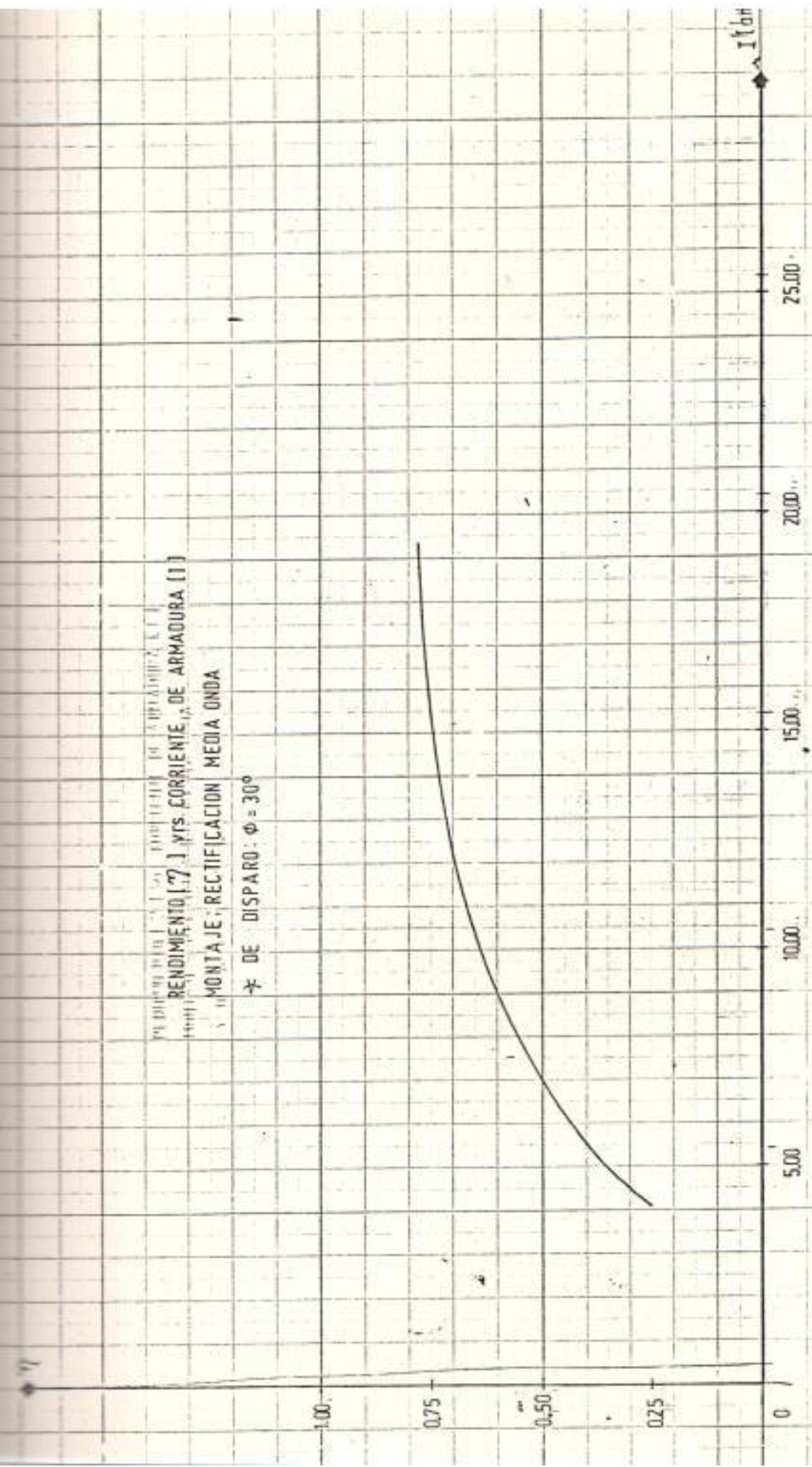
- La forma de las curvas es la misma en los cinco casos, pero cuando trabaja el motor con $\emptyset = 120^\circ$ se notan perturbaciones muy marcadas, que son propias de la discontinuidad de la corriente y la escasa energía que se le aplica.
- El motor tiene un máximo rendimiento para diferentes valores de corriente de armadura de acuerdo al valor del ángulo \emptyset ; mientras menor es \emptyset , el rendimiento máximo - tendrá lugar en valores mayores de corriente de armadura. Esto es otra causa del fenómeno de saturación.

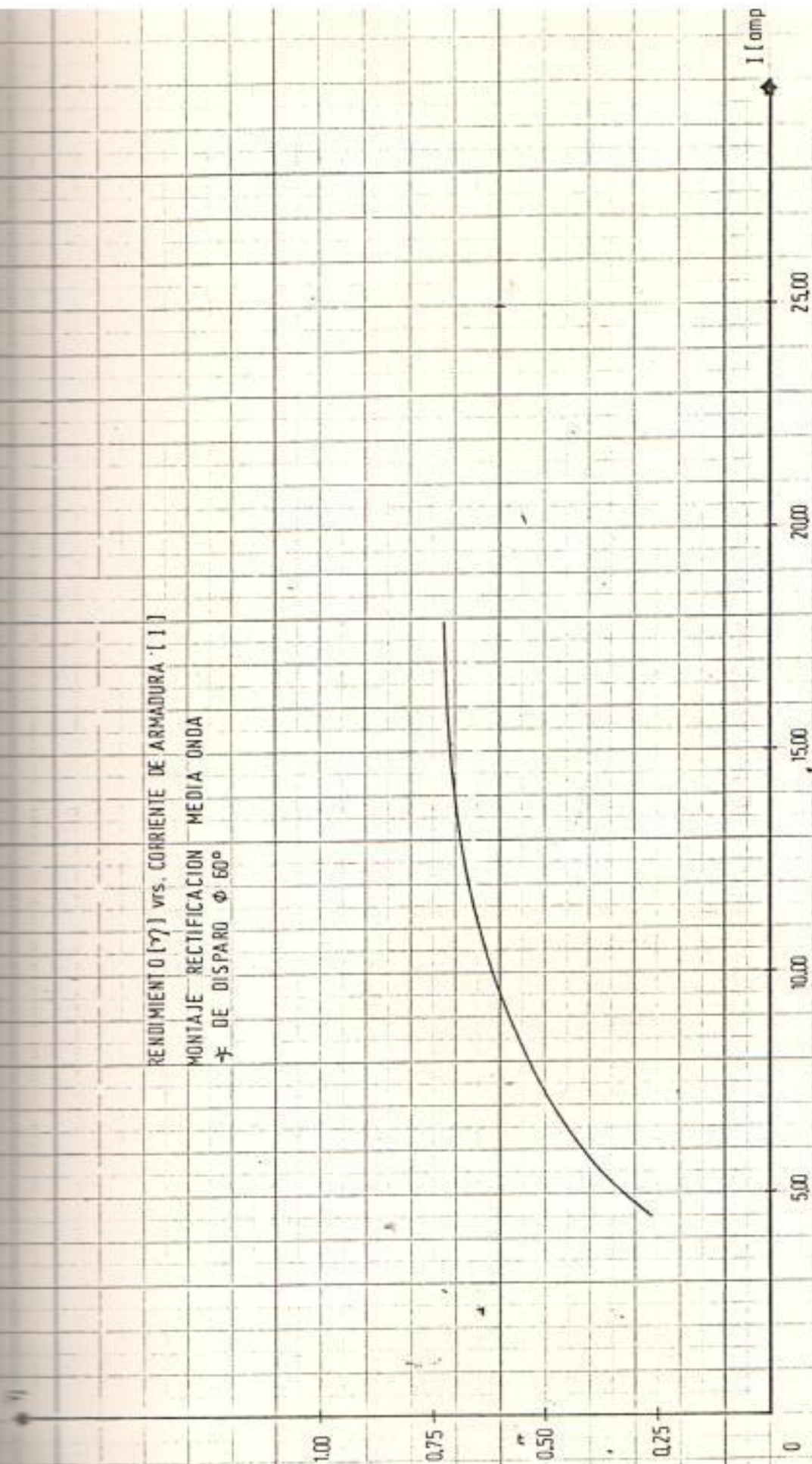
RENDIMIENTO (%) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I) [1]
MONTAJE: RECTIFICACION MEDIA ONDA
* DE DISPARO: $\phi = 0^\circ$



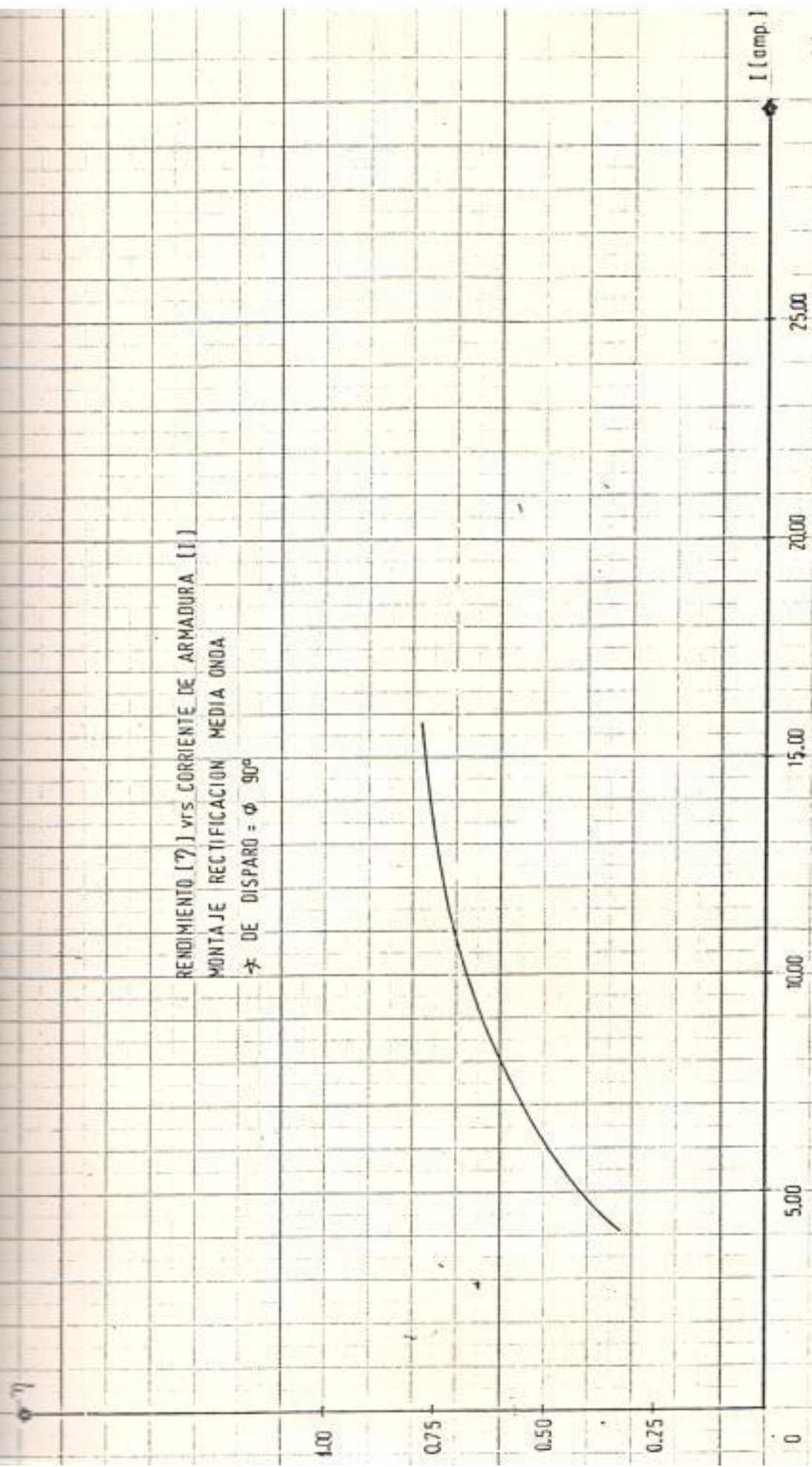
RENDIMIENTO (%) VS. CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE: RECTIFICACION MEDIA ONDA

φ DE DISPARO: φ = 30°



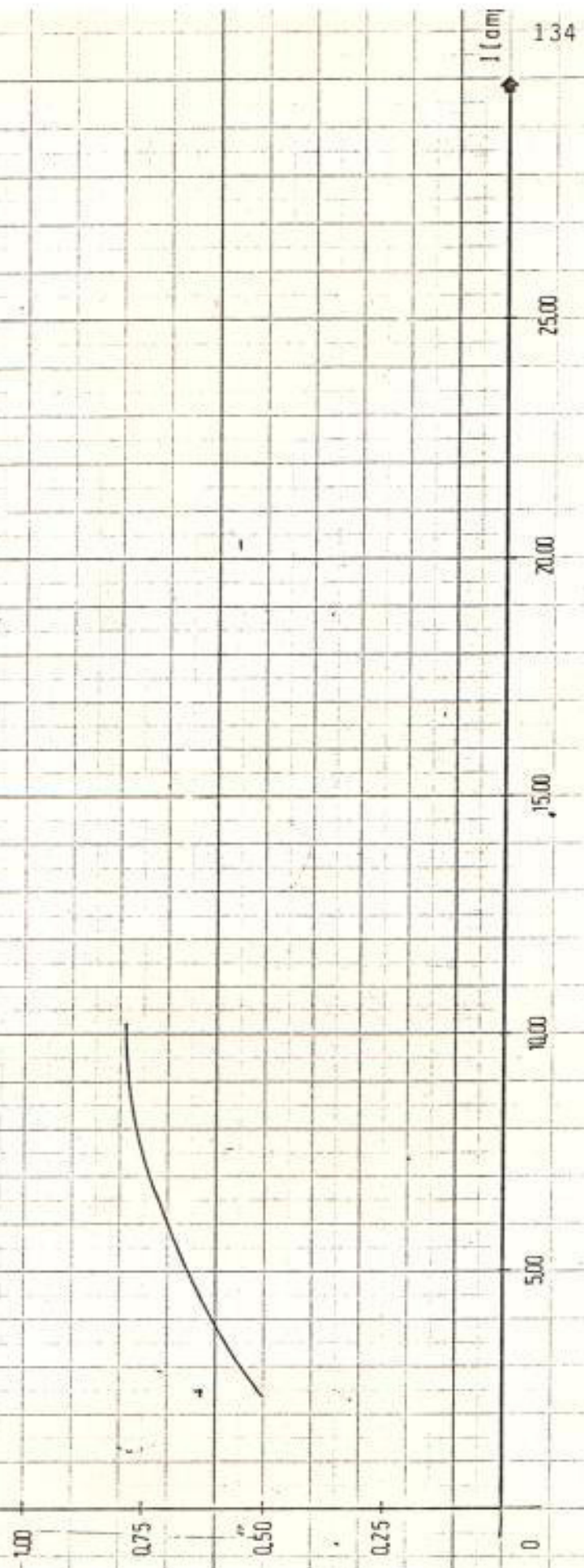


RENDIMIENTO (η) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE RECTIFICACION MEDIA ONDA
* DE DISPARO = ϕ 90°



CURVA DE

RENDIMIENTO (77) vs. CORRIENTE DE ARMADURA (611)
MONTAJE RECTIFICACION MEDA ONDA
 ϕ DE DISPARO $\phi = 120^\circ$



11(om) 134

3.2.2.4. Curva característica de voltaje de alimentación
Vrs. Corriente de armadura $U = f(I)$

Característica mostrada en las curvas N^o 24 .

Si se carga el motor se observa que la caída de voltaje de alimentación en cada caso se hace cada vez más significativa. Esta característica no depende de los parámetros del motor sino del tipo de circuito de alimentación, en este caso, del rectificador de media onda.

Pero esta caída de voltaje produce un porcentaje de regulación de velocidad muy pobre.

El rendimiento máximo que puede tener el transformador de alimentación cuando trabaja con montajes de rectificación de media onda es del 40% de su capacidad total, debido a que con estos montajes solo se deja pasar corriente en los semiciclos positivos, llevando de esta forma al transformador a una rápida saturación. Esta es una de las razones por las cuales en este tipo

VOLTAJE PROMEDIO [U] vs. CORRIENTE DE ARMADURA [I]
MONTAJE = RECTIFICACION MEDIA ONDA

EL VALOR PROMEDIO DE LA CORRIENTE [I]...

...DE LA CORRIENTE DE LA ARMADURA...

U
(volts)

150V

100V

50V

0

5A

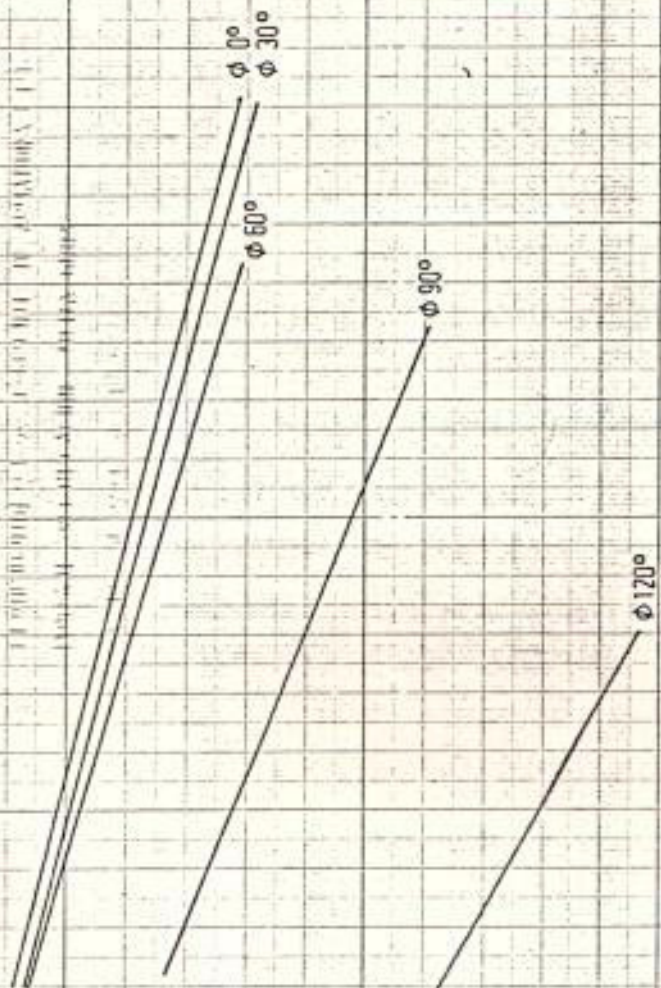
10A

15A

20A

25A

I (amp)



de montajes se puede suministrar energía a motores c.c. de hasta 1.00 HP.

3.3. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CONTROLADO POR ACCION SOBRE ARMA- DURA DESDE UNA FUENTE ALTERNA MONOFASICA A TRAVES DE UN PUEN- TE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA Y DE UN TIRISTOR

3.3.1. Análisis en el período de arranque del motor:

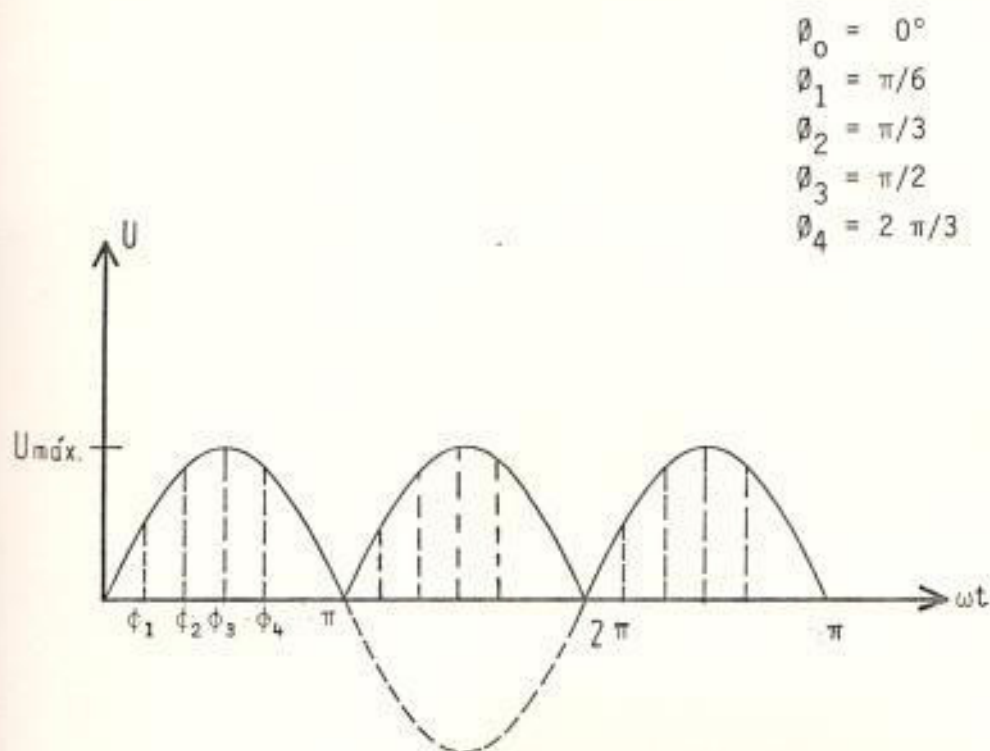
El diagrama de conexiones de la figura 15 , muestra -
que el motor de c.c. queda alimentado desde una fuente
alterna monofásica rectificada en onda completa, (ver fi-
gura 22) , cuando conduce el tiristor T_p .

Igual que en el caso anterior, por medio del circuito
de disparo del tiristor se controla la cantidad de po
tencia suministrada al motor.

Las curvas 25 a 29 muestran la envolvente en los
2 primeros segundos de la corriente de armadura (1), de
la corriente en el diodo de paso libre (2), de la corrien-
te en el tiristor (3) y de la velocidad del motor (4) pa-
ra diferentes valores del ángulo θ .

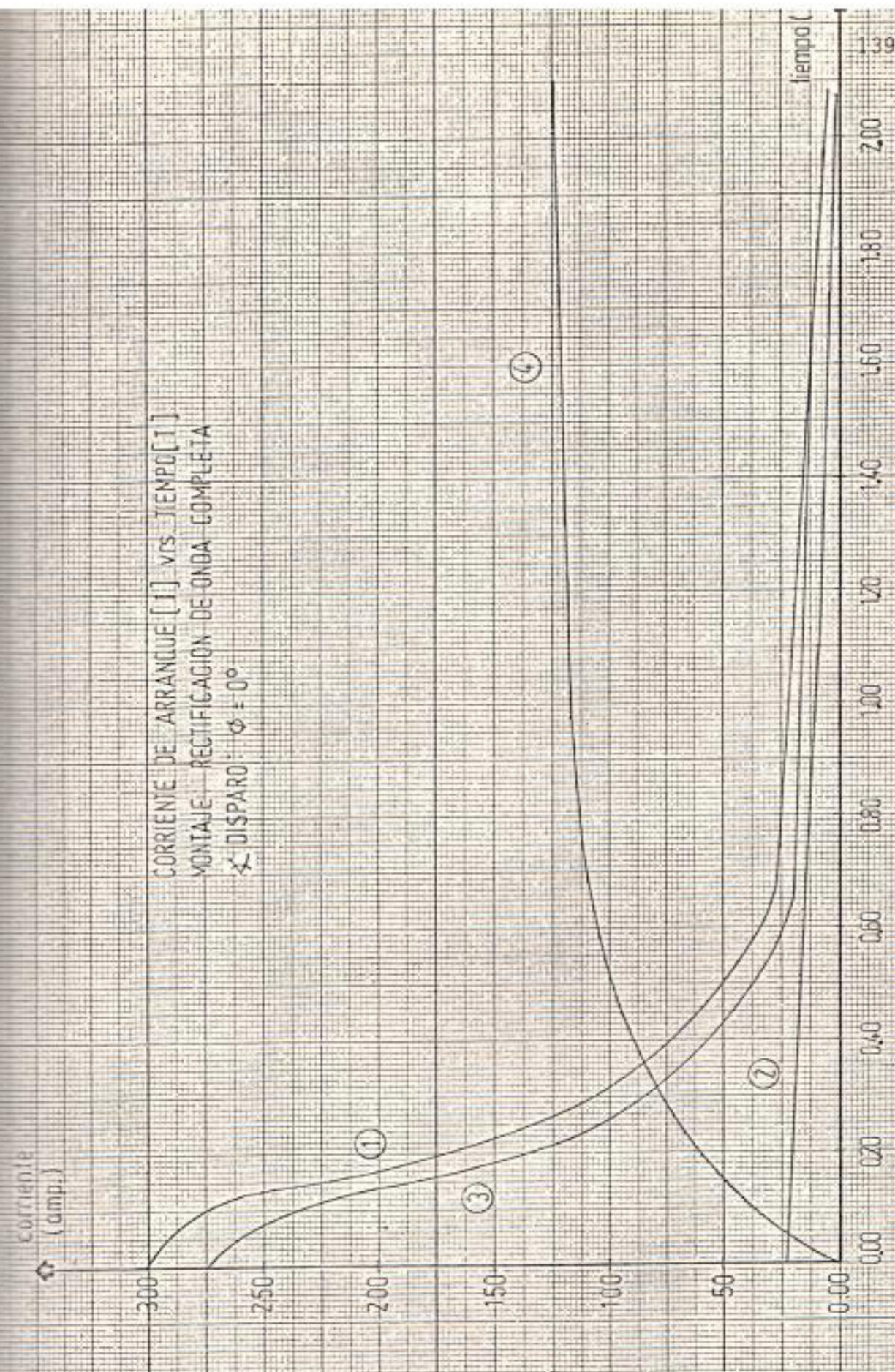
FIGURA N° 22

FORMA DE ONDA DE VOLTAJE EN LOS TERMINALES DE UN RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA (SISTEMA MONOFASICO)



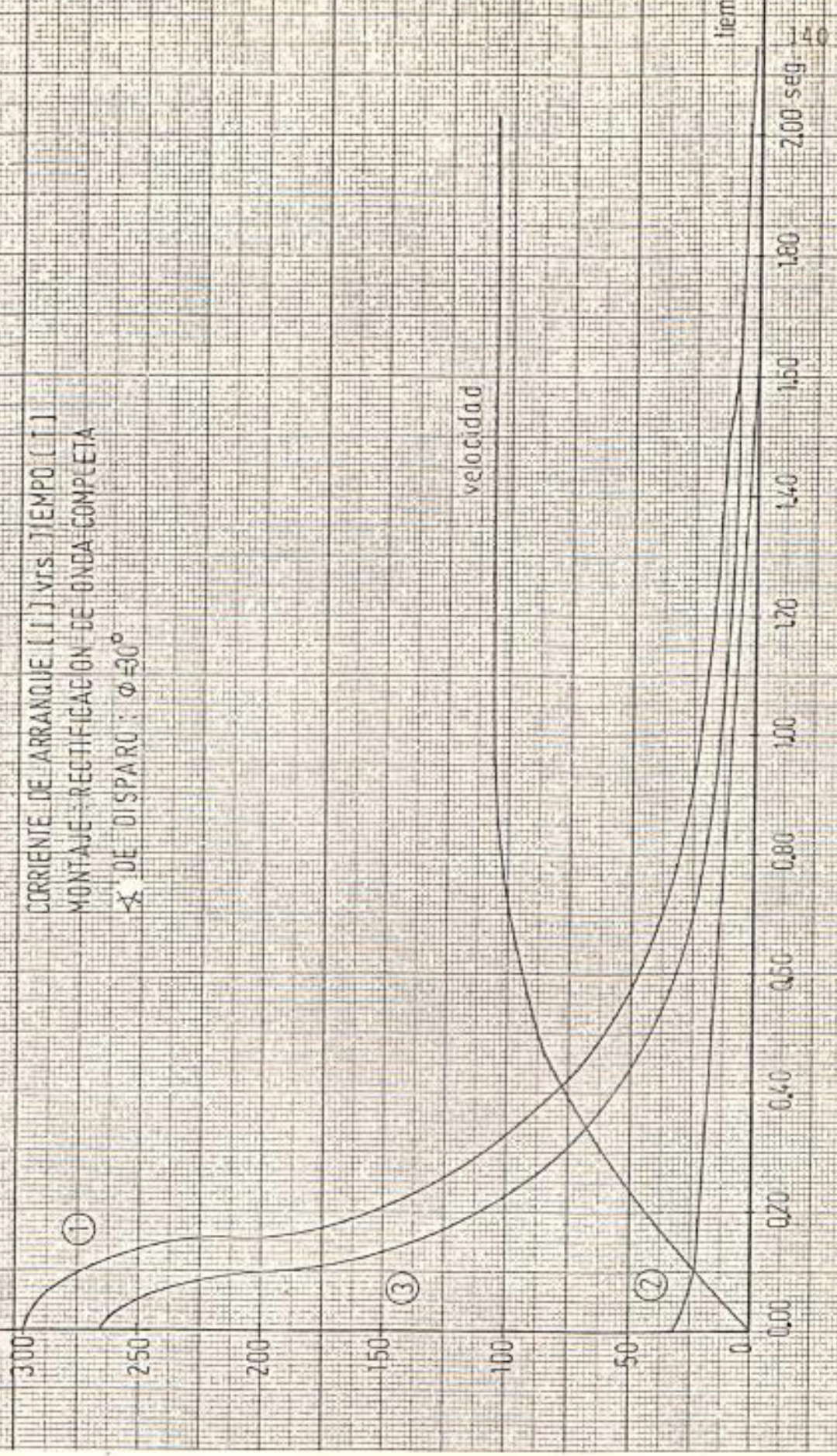
corriente
(amp.)

CORRIENTE DE ARRANQUE [1] vs TIEMPO [1]
MONTAJE: RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA
 α DISPARO: $\phi = 0^\circ$

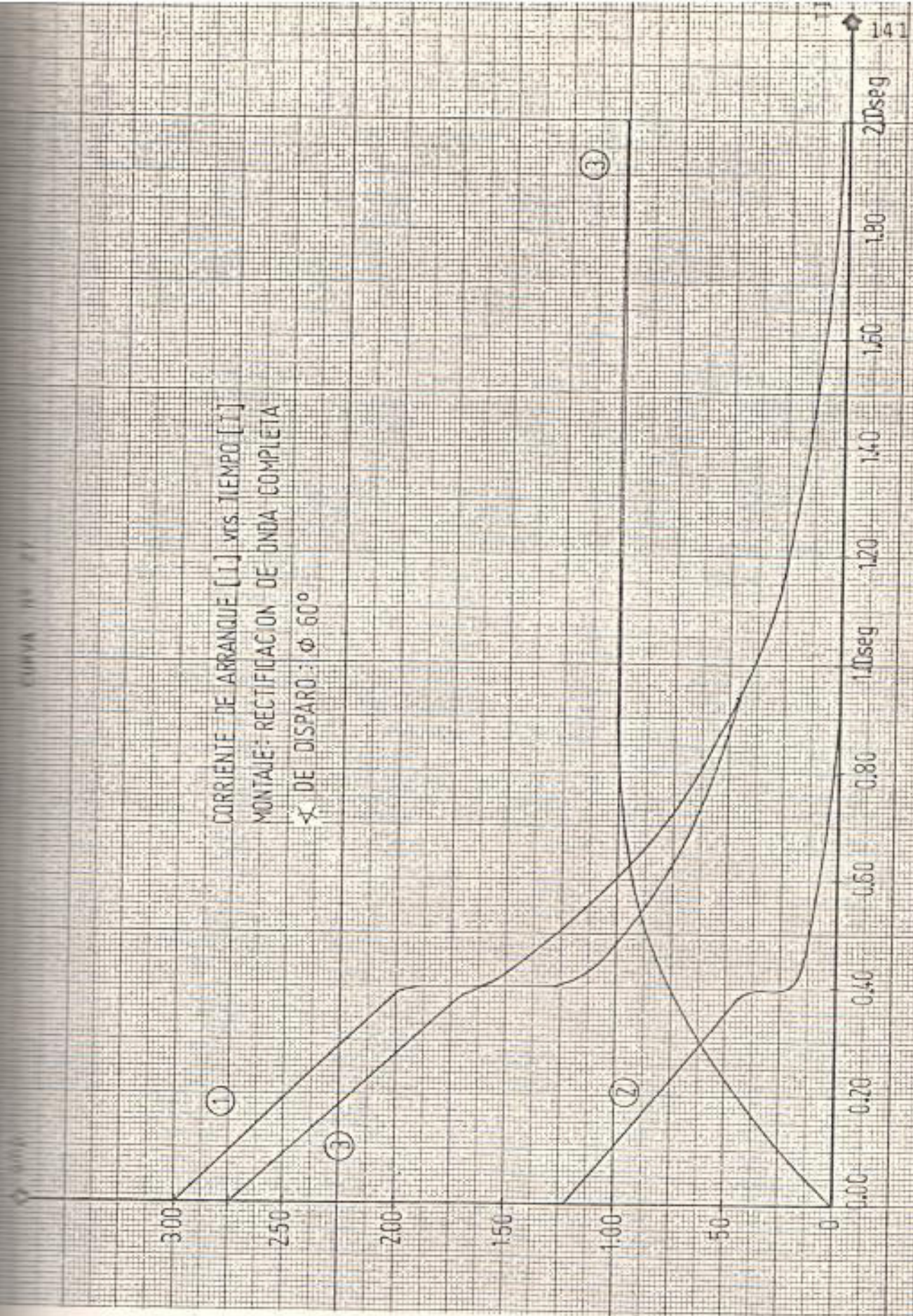


tiempo (s)

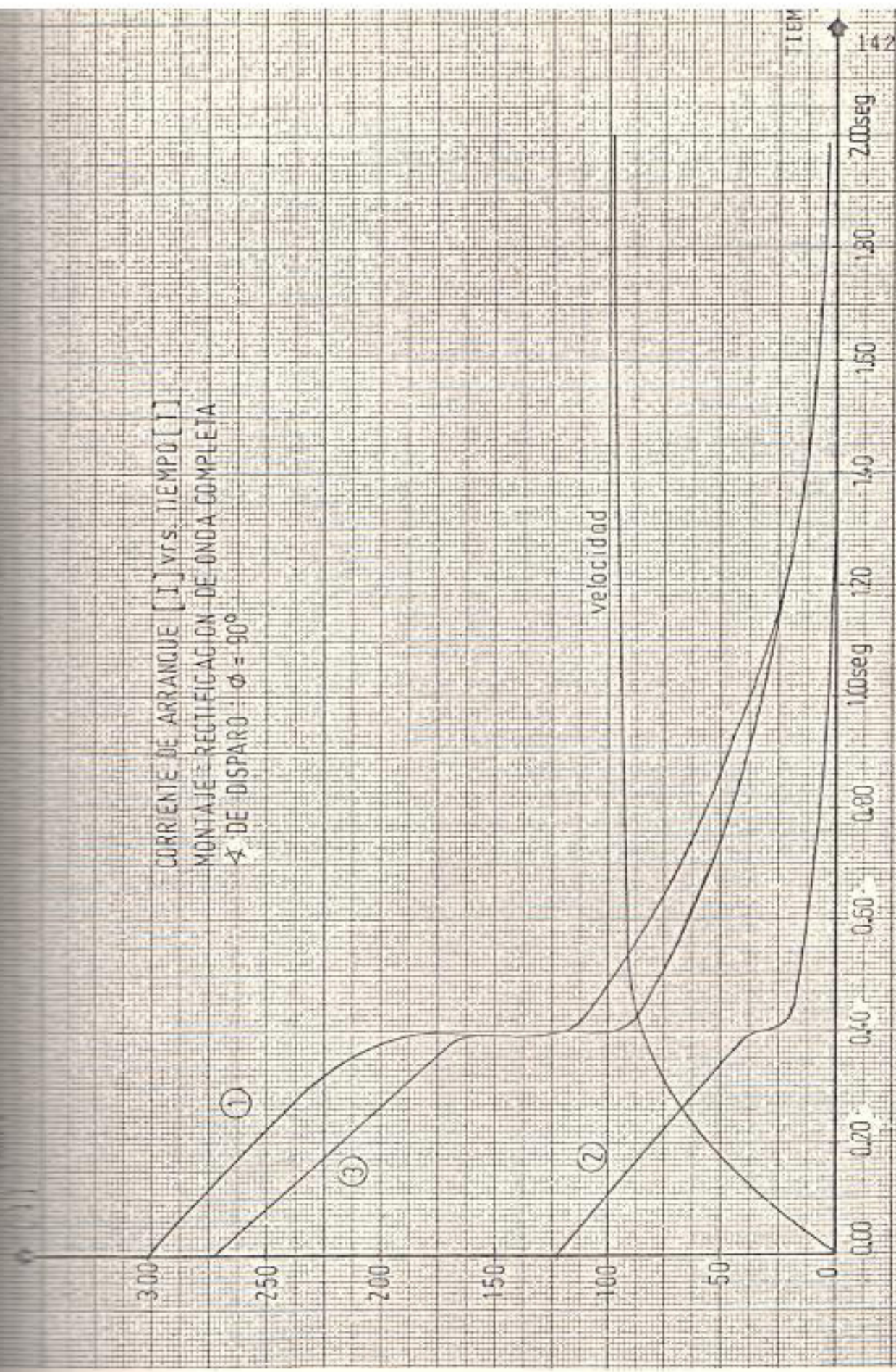
CORRIENTE DE ARRANQUE (A) vs. TIEMPO (s)
MONTAJE RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: $\phi = 30^\circ$



CORRIENTE DE ARRANQUE [1] vs. TIEMPO [1]
MONTAÑE: RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: ϕ 60°



CORRIENTE DE ARRANQUE [I] vs. TIEMPO [t]
 MONTAJE RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: $\phi = 90^\circ$



ϕ [A]

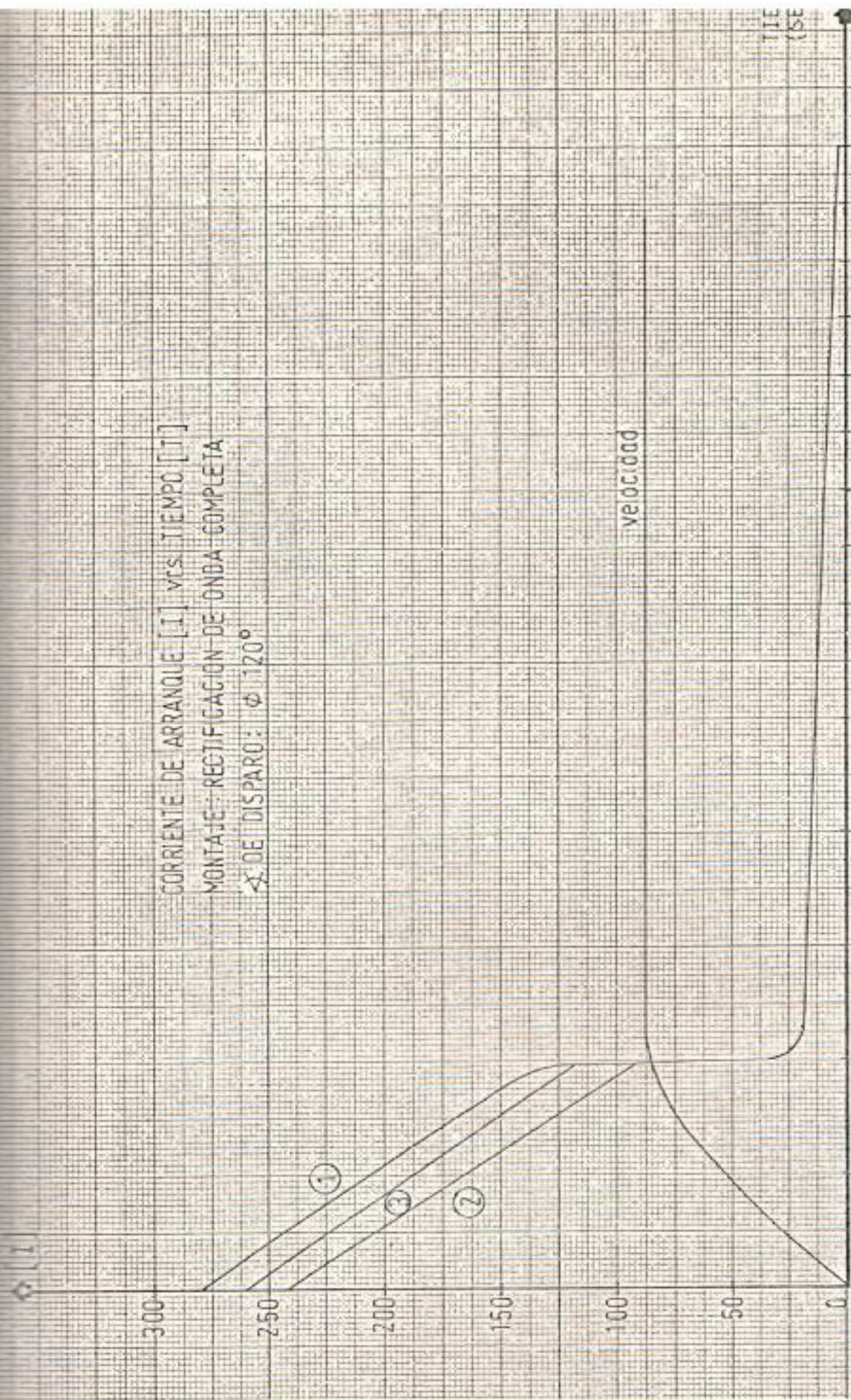
CORRIENTE DE ARRANQUE [A] vs. TIEMPO [T]
MONTAJE: RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: ϕ 120°

velocidad

T [SE]

143

0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 seg 1.20 1.40 1.50 1.80 2.0 seg



En las curvas N^o 30 a 34 se muestra las formas del voltaje de alimentación a la armadura y la f.c.e.m.

En el instante del arranque, el valor de la corriente rectificadora puede ser calculado en base a la siguiente expresión:

$$I_R = \frac{I_{\max}}{\pi} (1 + \cos \phi) \quad \text{Ver anexo N}^{\circ} 6$$

La tabla N^o 11 dá valores de la corriente pico de armadura y rectificadora en la envolvente al inicio del arranque.

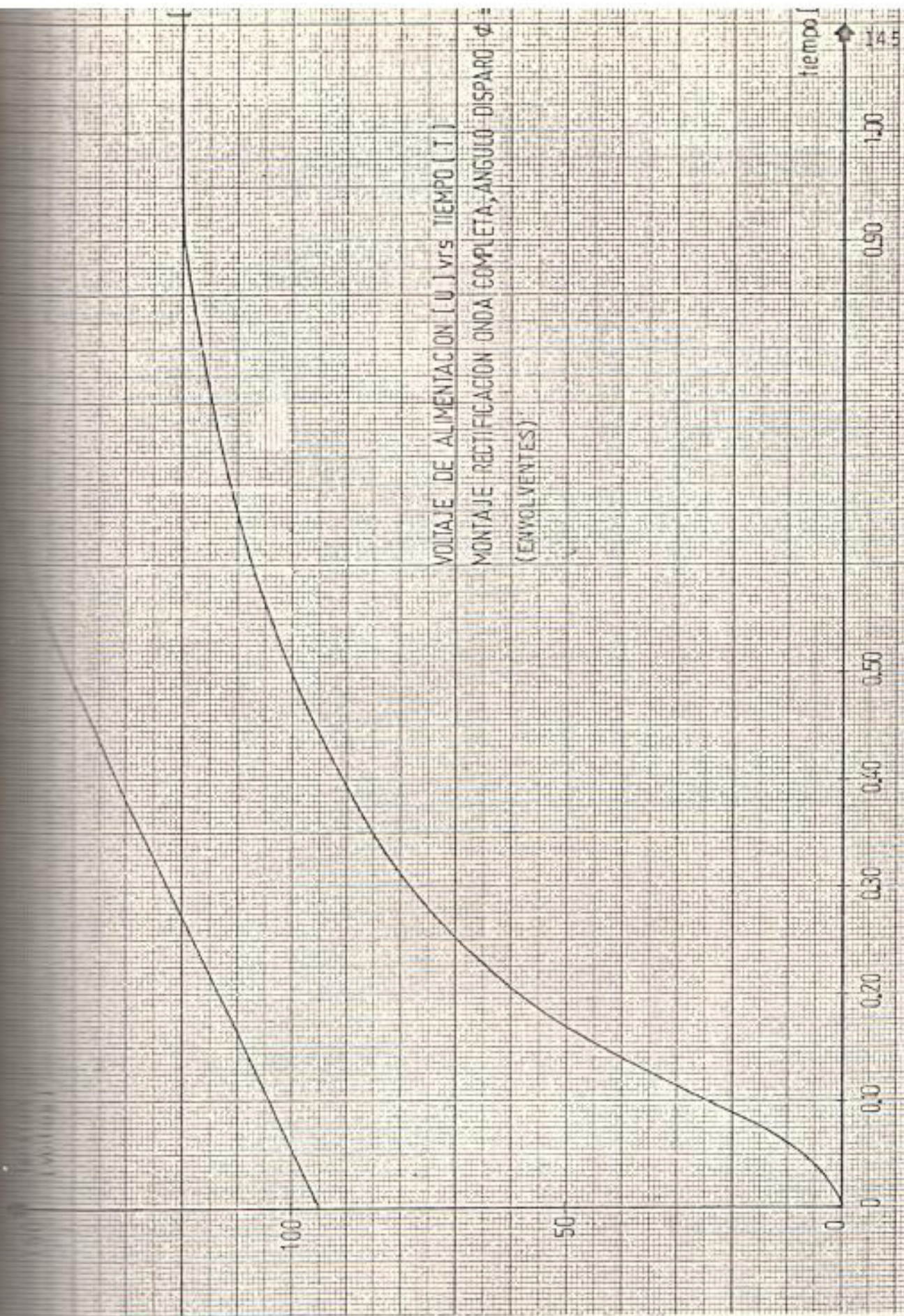
De la tabla N^o 11 se deduce que este montaje permite un arranque con una corriente no peligrosa para el motor. Esto se obtiene regulando entre 120° y 90° en el instante del arranque, cuya corriente media se encontraría entre 200% a 353 % de la corriente nominal del motor.

También se observa que según curvas 25 a 29 el motor alcanza su estado estable aproximadamente a los 2.00 segundos luego de ser arrancado.

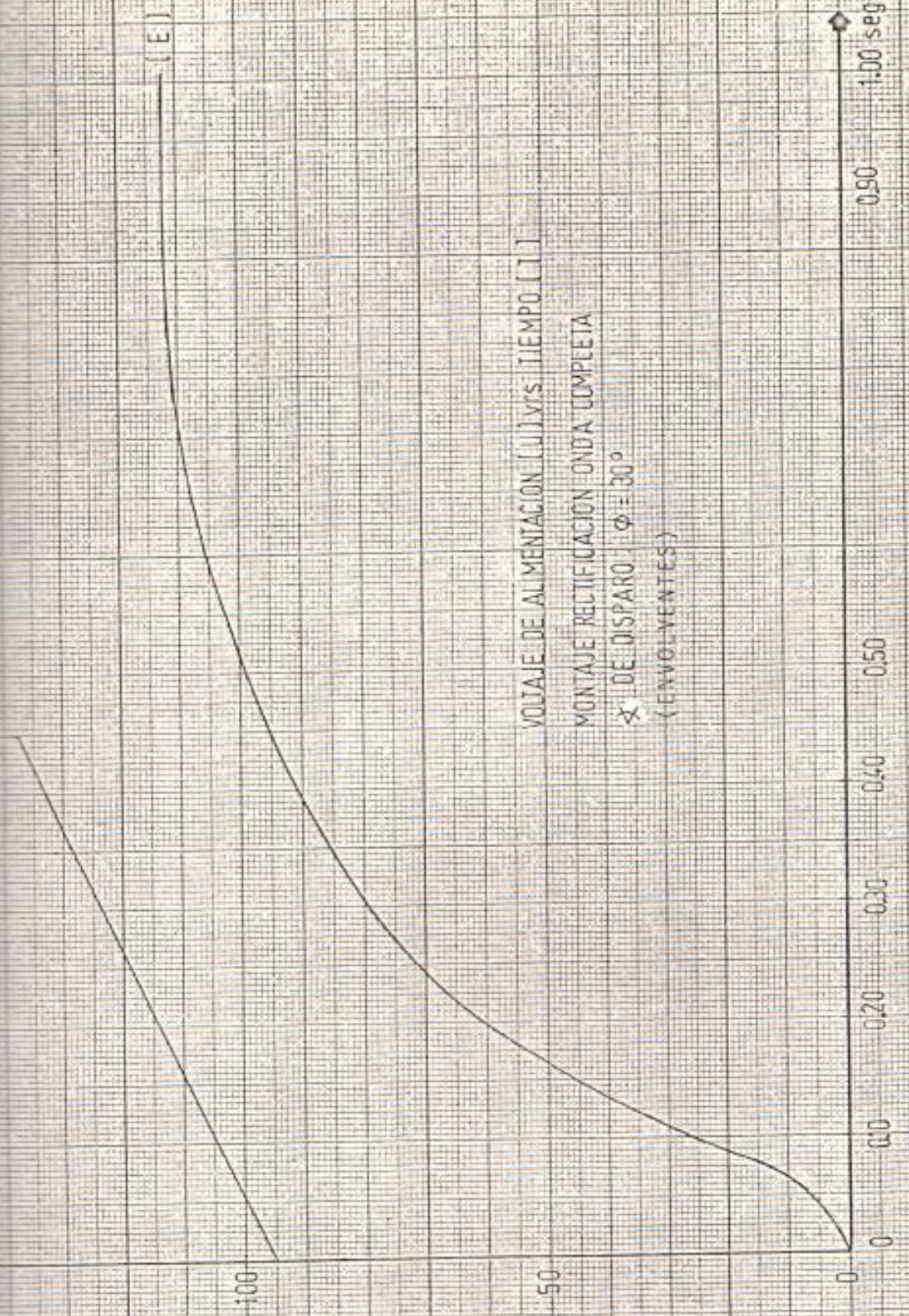
VOLTAJE DE ALIMENTACION (U) vs TIEMPO (T)

MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA, ANGULO DISPARO $\phi =$

(ENVOLVENTES)



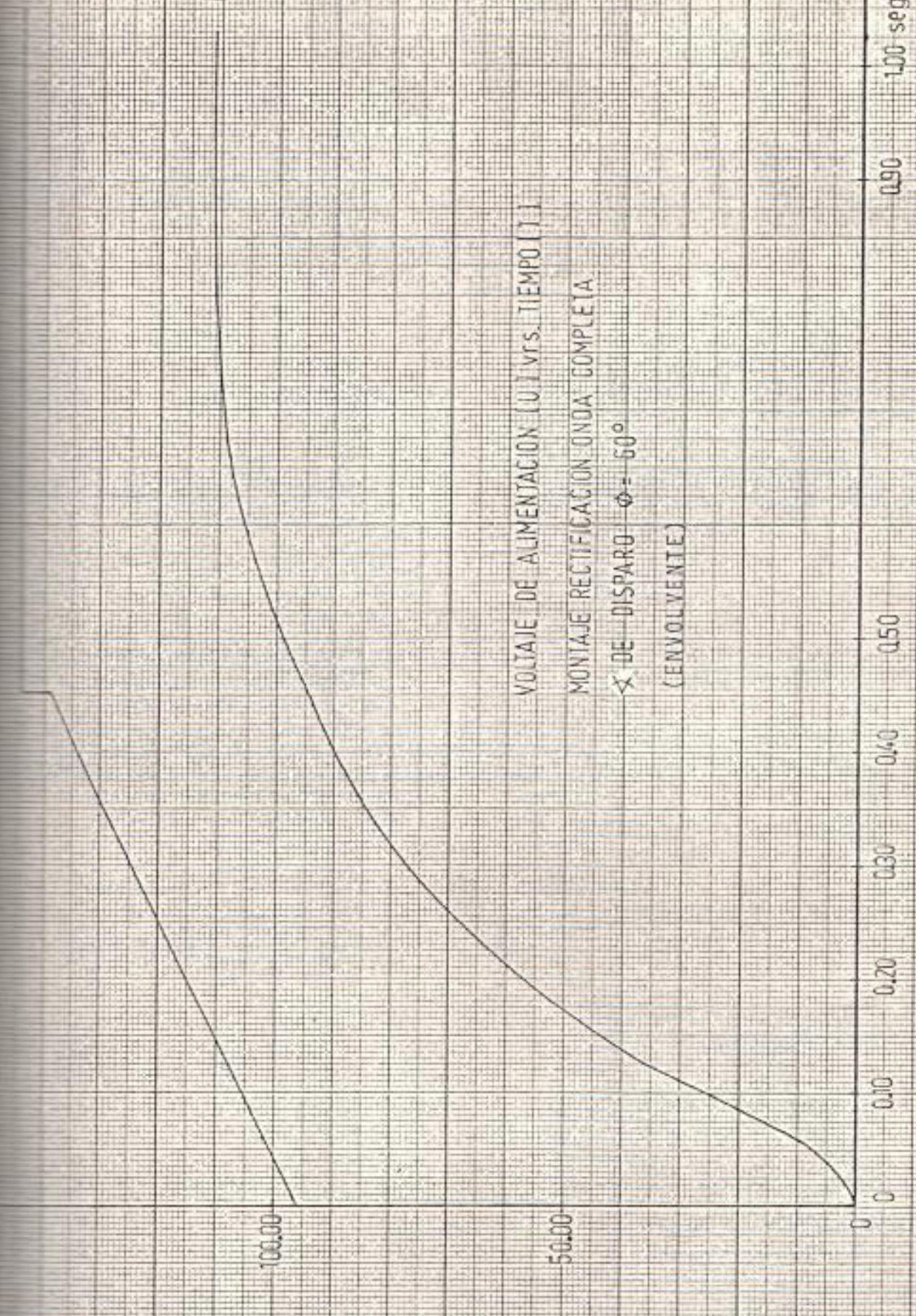
VOLTAJE DE ALIMENTACION [V] vs TIEMPO [T]
MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO $\phi = 30^\circ$
(ENVOLVENTES)



(U)

(E)

(s)

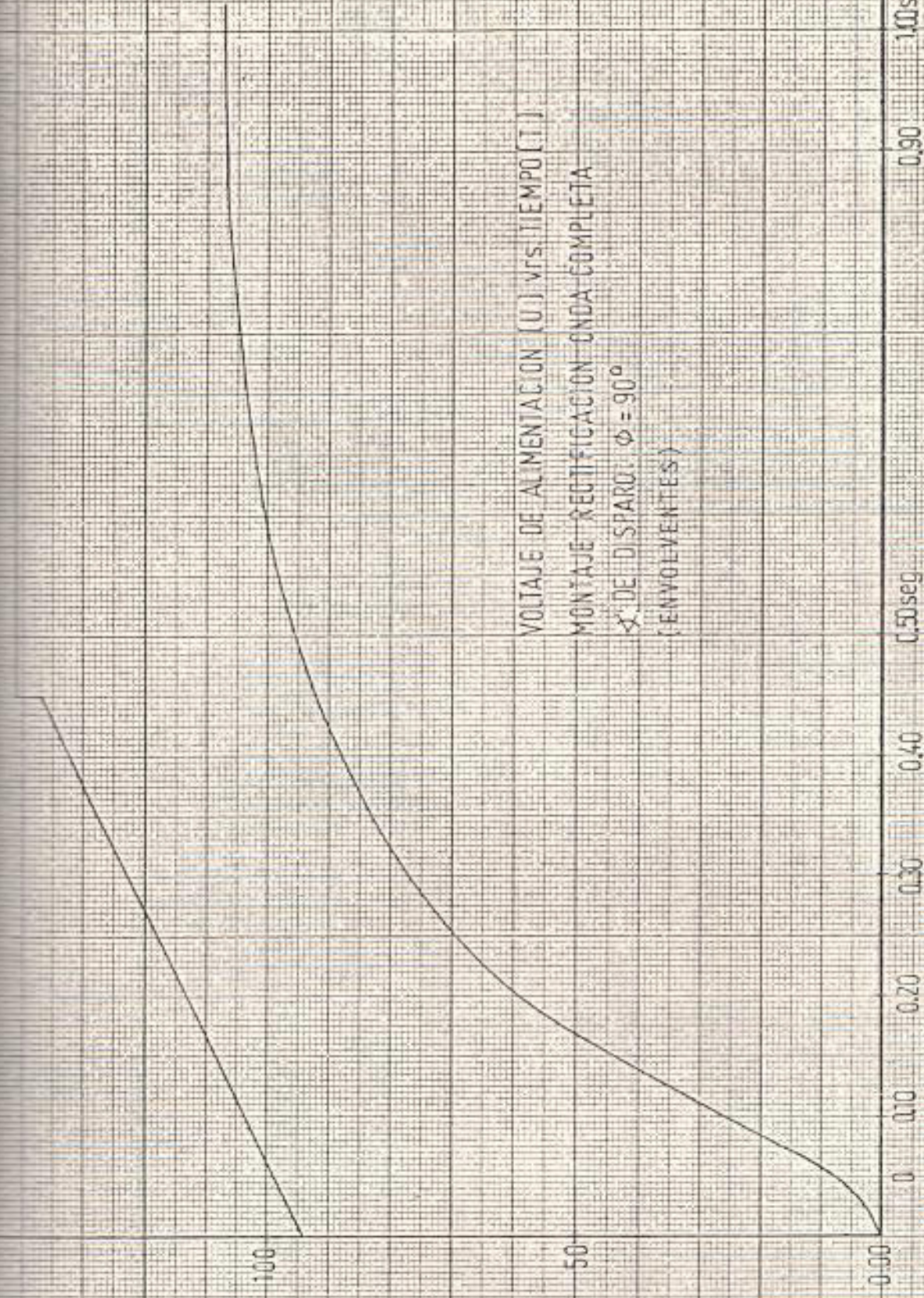


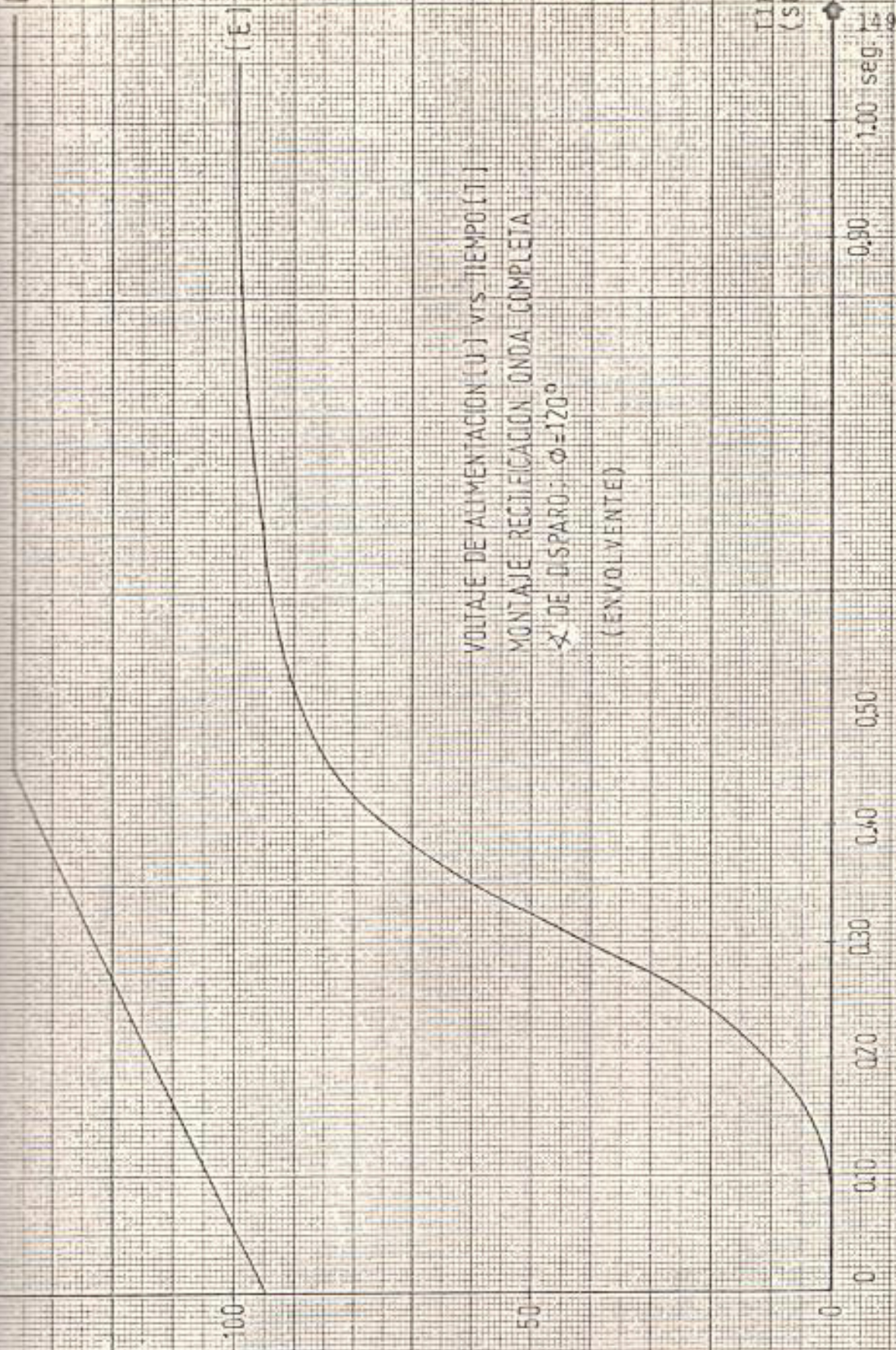
(U)

(E)

TIE
(SEG)

148





VOLTAJE DE ALIMENTACION (U) vs TIEMPO (T)
 MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: $\phi = 120^\circ$
 (ENVOLVENTE)

TIE
(SE) 1.00 seg

100 (V)

50

0

0

0.10

0.20

0.30

0.40

0.50

0.90

1.00

1.49

TABLA N° 11

VALORES DE CORRIENTE PICO Y RECTIFICADA EN EL ARRANQUE

∠ DISPARO θ	0°	30	60	90	120
CORRIENTE PICO (AMPERIOS) I_p	300	300	300	300	280
CORRIENTE RECTI FICADA (AMPERIOS) I_R	190.98	178.18	143.23	95.49	56.00

Por otra parte en las curvas 25 a 29 se puede distinguir lo siguiente:

- Así como en monofásico media onda, la corriente en el tiristor en el instante de arranque es la diferencia entre la corriente de armadura y la corriente en el diodo libre D.
- Existe una corriente en el diodo D. como en el caso anterior a pesar que se arranca a motor sin carga, sin embargo en estado estable no circula corriente por D.
- La corriente en el diodo D se hace cada vez mayor, - cuando aumenta ϕ .
- El tiempo que la máquina demora para estabilizarse es mayor mientras mayor es el ángulo ϕ .
- La velocidad que alcanza el motor en cada caso es diferente y menor mientras mayor es el valor del ángulo ϕ .
- Estos 5 fenómenos se explican de la misma manera que

en el caso del motor con voltaje rectificado a media onda.

- El área que ocupa la envolvente de la corriente de armadura en los 0.40 primeros segundos es mayor mientras mayor es el valor del ángulo ϕ .

Esto se debe a que a mayor ángulo ϕ hay menor energía proporcionada, y por lo tanto es necesario un mayor tiempo de aceleración, ya que la diferencia entre par motor y par resistente es menor.

- Las variaciones en las curvas de corriente para $\phi=60^\circ$, 90° y 120° se deben a que el tiempo durante el cual el valor de la corriente permanece elevado, es mayor que cuando se arranca el motor con $\phi = 0^\circ$ y 30° y, la velocidad alcanzada hasta que el motor entre a funcionar en estado estable es menor.
- La corriente de armadura al momento del arranque disminuye con el ángulo ϕ , debido a que el voltaje medio de alimentación también disminuye. No se aprecia esta disminución en la corriente pico de armadura porque en $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ y 90° existe la presencia del valor

máximo de la onda y como se tiene una envolvente, entonces todos los valores en el instante de arranque serán iguales. Pero, para $\phi = 120^\circ$ no entra la cresta de la onda del voltaje de alimentación, y por eso el valor de la envolvente en el instante de arranque es menor.

En las curvas 30 a 34 se puede apreciar lo siguiente:

- El voltaje de alimentación cae en el momento del arranque, luego a medida que aumenta la f.c.e.m del motor recobra su valor nominal.
- La f.c.e.m. crece con mayor rapidez y alcanza valores mayores cuando ϕ es menor.
- Cuando $\phi = 0, 30, 60$ y 90° el voltaje pico de alimentación se mantiene igual por la misma razón dada por el arranque con voltaje rectificado de media onda. Pero, cuando $\phi = 120^\circ$ el valor de la envolvente es menor puesto que se está trabajando por debajo de la cresta de la onda del voltaje de alimentación.

3.3.2. Análisis del funcionamiento del motor en estado estable:

Las tablas N° 12 a 16 indican los valores obtenidos de las experiencias realizadas; además en la figura N° 23 y 24, se observan las formas de onda. La expresión del voltaje promedio para esta experiencia es la siguiente:

$$U_{\text{prom}} = \frac{1}{\pi} \int_{\phi}^{\pi} U_{\text{max}} \text{sen } \alpha \, d\alpha + E \gamma$$

γ = posición del ángulo donde interviene la f.e.c.m.E.

$$\alpha = 2\pi ft = \omega t$$

La expresión de la corriente de armadura viene dada por:

$$i_1 = \frac{U_{\text{max}}}{Z} \text{Sen}(\omega t + \phi - \theta) - \frac{E}{r_a} + Ae^{\frac{-r_a}{L}t}$$

La expresión de la corriente que circula por el diodo de paso libre es la siguiente:

$$i_2 = \frac{-E}{r_a} + A' e^{-\frac{t}{\tau m}}$$

FIGURA N° 23

FORMA DE ONDA DEL VOLTAJE Y CORRIENTE DE SUMINISTRO CON RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.

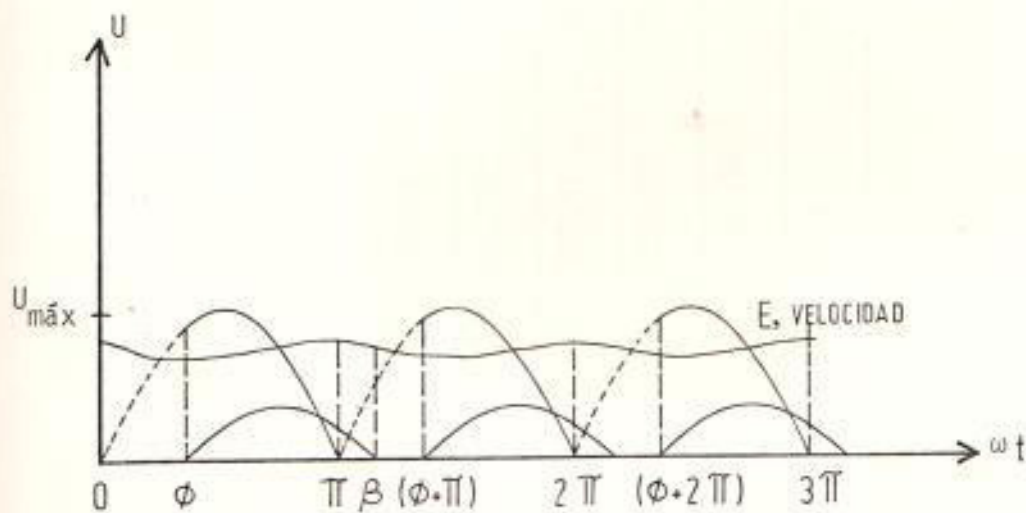


FIGURA N° 24

FORMA DE ONDA DE VOLTAJE DE SUMINISTRO Y f.c.e.m.E DEL MOTOR C.C. CUANDO SE TRABAJA CON RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA.

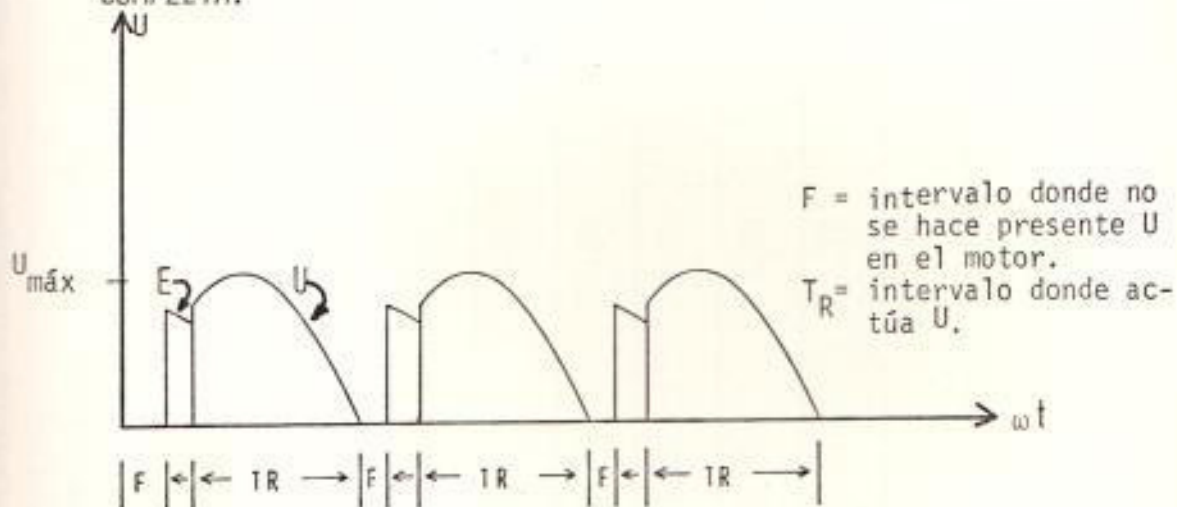


TABLA Nº 12

ALIMENTACION DEL MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA ϕ 0°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AM- PERIOS)	PAR MOTOR (Lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA DE ENTRADA (VA TIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VA- TIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
141.60	4.50	0.50	3020	316.25	637.20	211.89	0.33(*)
137.30	6.40	1.00	2950	308.92	878.72	413.95	0.47
136.00	7.00	1.25	2920	305.78	952.00	471.21	0.49
134.00	8.00	1.40	2880	301.59	1072.00	565.78	0.53
130.50	10.00	2.05	2810	294.26	1305.00	808.33	0.62(*)
127.50	12.00	2.65	2740	286.93	1530	1018.89	0.67
121.80	16.00	3.85	26.30	275.41	1948.80	1420.84	0.73
119.60	18.00	4.45	2580	270.17	2152.80	1611.02	0.75(*)
117.10	20.00	5.05	2540	265.99	2342.00	1799.95	0.77
115.00	22.00	5.55	2490	260.75	2530.00	1939.20	0.77
112.20	24.50	6.25	2430	254.47	2748.90	2131.19	0.78
110.40	26.20	6.70	2400	251.32	2892.48	2256.35	0.78
109.30	27.40	7.05	2380	249.23	2994.82	2354.47	0.79(*)

TABLA Nº 13

ALIMENTACION DEL MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA Ø 30°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (Lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguidos)	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
136.50	5.10	0.55	3.000	314.15	696.15	231.53	0.33 (*)
131.50	7.50	1.20	2870	300.54	986.25	483.27	0.49
129.50	8.80	1.60	2820	295.31	1139.60	633.14	0.56
125.10	11.10	2.40	2735	286.40	1401.12	921.06	0.66 (*)
123.40	12.75	2.70	2700	282.74	1573.35	1022.95	0.65
119.90	16.10	3.40	2620	274.36	1930.39	1249.98	0.65
118.20	16.50	3.75	2580	270.17	1950.30	1357.60	0.70
115.90	18.00	4.25	2530	264.94	2086.20	1508.83	0.72
112.00	21.00	5.10	2450	256.56	2352.00	1753.33	0.75 (*)
110.00	22.40	5.50	2410	252.37	2464.00	1859.97	0.75
108.40	23.80	5.90	2380	249.23	2579.92	1970.41	0.76
107.00	25.00	6.20	2350	246.09	2675.00	2044.52	0.76
106.00	26.00	6.45	2320	242.95	2756	2099.82	0.76 (*)

(*) Según Oscilograma Nº 24 a 27

ALIMENTACION DEL MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA Ø60°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (lb-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/(VATIOS) segundos)	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
135.90	4.80	0.50	2990	313.11	652.32	209.78	0.32 (*)
133.80	5.50	0.70	2930	306.82	735.90	287.79	0.39
131.30	6.60	1.00	2875	301.06	866.58	403.42	0.46
129.90	7.50	1.20	2840	297.40	974.25	478.21	0.49
127.50	8.50	1.50	2800	293.21	1083.75	589.35	0.54
124.00	10.00	2.10	2700	282.74	1240.00	795.63	0.54
122.00	11.70	2.45	2680	280.64	1427.40	921.37	0.64 (*)
118.50	15.00	3.05	2590	271.22	1777.50	1108.47	0.62
110.20	18.50	4.40	2430	254.46	2038.70	1500.29	0.73
107.80	20.00	4.80	2400	251.32	2156.00	1616.49	0.75 (*)
105.80	21.00	5.10	2360	247.13	2221.80	1688.89	0.76
102.90	23.00	5.60	2300	240.85	2366.70	1807.34	0.76
99.50	25.30	6.20	2230	233.52	2517.35	1940.08	0.77 (*)

(*) Según Oscilograma Nº 28 a 31

TABLA Nº 16

ALIMENTACION DEL MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA Ø90°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (Lb-pte)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
120.00	5.10	0.60	2715	284.31	612.00	228.59	0.37 (*)
111.80	7.00	1.10	2525	264.41	782.60	389.74	0.50
103.70	9.40	1.75	2355	246.61	974.78	578.30	0.59
101.60	10.00	2.00	2300	240.85	1016.00	645.48	0.64 (*)
95.80	12.00	2.60	2170	227.24	1149.60	791.70	0.69
91.00	14.00	3.15	2060	215.72	1274.00	910.55	0.71
87.50	15.60	3.60	1980	207.34	1365.00	1000.21	0.73
84.10	17.00	3.95	1900	198.96	1429.70	1053.10	0.74 (*)
75.40	20.00	4.80	1710	179.07	1508.00	1151.78	0.76
72.10	22.00	5.35	1630	170.69	1586.20	1223.68	0.77
67.00	24.10	5.90	1520	159.17	1614.70	1258.40	0.78
64.10	25.40	6.20	1450	151.84	1628.14	1261.49	0.77
62.50	26.20	6.45	1400	146.60	1637.50	1267.06	0.77 (*)

(*) Según Oscilograma Nº 32 a 35

ALIMENTACION DE MOTOR C.C. CON FUENTE ALTERNIA MONOFASICA CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA Ø120°

TENSION DE ALIMENTACION (VOLTIOS)	CORRIENTE DE ARMADURA (AMPERIOS)	PAR MOTOR (lb.-pie)	VELOCIDAD R.P.M.	VELOCIDAD ANGULAR (radianes/seguido)	POTENCIA DE ENTRADA (VATIOS)	POTENCIA DE SALIDA (VATIOS)	RENDIMIENTO (EN FRACCION)
69.30	4.00	0.40	1600	167.53	277.20	89.81	0.32 (*)
65.50	4.60	0.60	1525	159.69	301.30	128.39	0.43
63.30	5.10	0.70	1475	154.46	322.83	144.88	0.45
61.70	5.50	0.85	1430	149.74	339.35	170.55	0.50
59.10	6.00	0.95	1380	144.51	354.60	183.96	0.52
56.60	6.60	1.15	1320	138.23	373.56	213.01	0.57
55.30	6.90	1.25	1290	135.08	381.57	226.26	0.59
52.50	7.70	1.50	1235	129.32	404.25	259.93	0.64 (*)
51.00	8.00	1.60	1200	125.66	408.00	269.42	0.66
49.10	8.50	1.75	1150	120.42	417.35	282.38	0.68
46.90	9.00	1.95	1100	115.19	422.10	300.99	0.71
45.60	9.35	2.05	1060	111.00	426.36	304.92	0.72
44.50	9.50	2.10	1050	109.95	422.75	309.40	0.73 (*)

(*) Según Oscilograma N°36 a 38

Como en el caso de alimentación con rectificación de me dia onda el valor A' se lo tomará de la expresión de i_1 cuando el voltaje de alimentación se hace cero.

Los oscilogramas obtenidos, 20 a 38, muestran en la parte superior el voltaje de alimentación U con el respectivo efecto de la f.c.e.m. y en la parte inferior, la corriente de armadura fuera del lazo donde interviene el diodo de paso libre, luego la descarga no es observada en los oscilogramas a excepción de los siguientes: 27.

Los casos donde no hay corriente de descarga por el diodo de paso libre son aquellos en los cuales el motor funciona con una carga menor al 50 % del valor nominal. En los oscilogramas se aprecia el aumento de la amplitud y del período de conducción de la onda de corriente y la disminución del valor de la f.c.e.m. fenómenos producidos por el aumento de la carga del motor.

Otra característica es que a medida que aumenta el ángulo de disparo la tendencia a la continuidad de i_a es menor porque el período de conducción del tiristor se va

ALIMENTACION: CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA

ONDAS SUPERIORES: VOLTAJE DE ALIMENTACION (u)

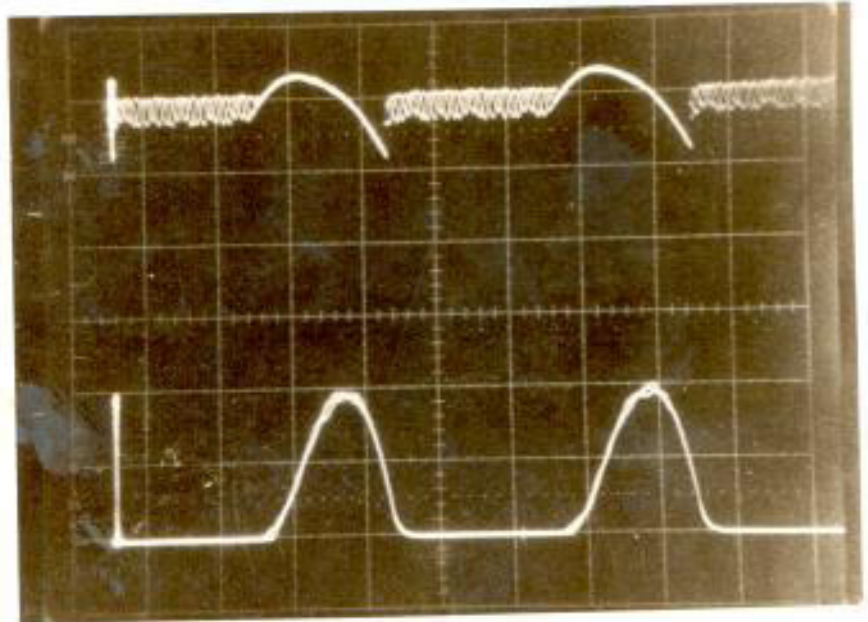
ONDAS INFERIORES: CORRIENTE DE ARMADURA (i)

OSCILOGRAMA N^o 20

$u : 50 \text{ V/div.}$

$\varphi : 0^\circ$

$i : 10 \text{ Amp/div.}$



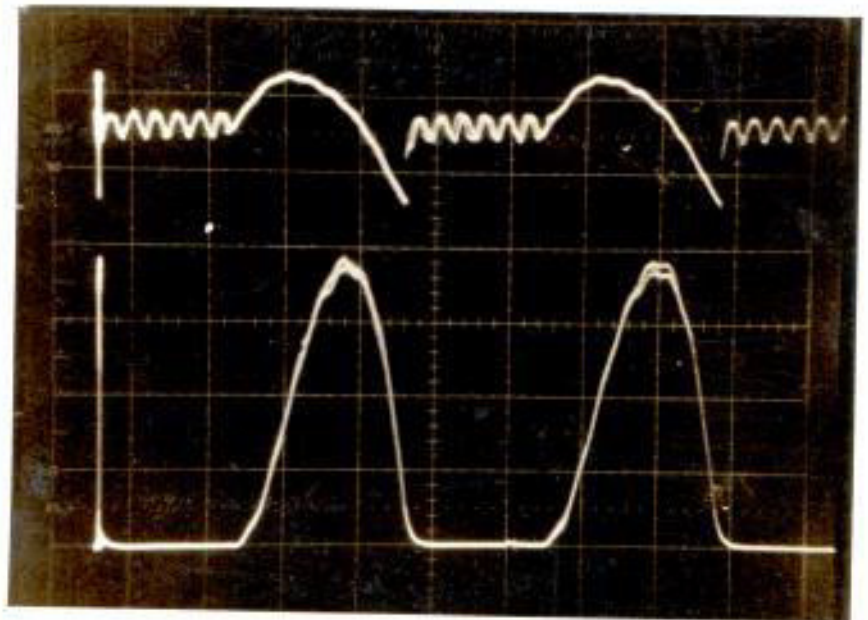
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N^o 21

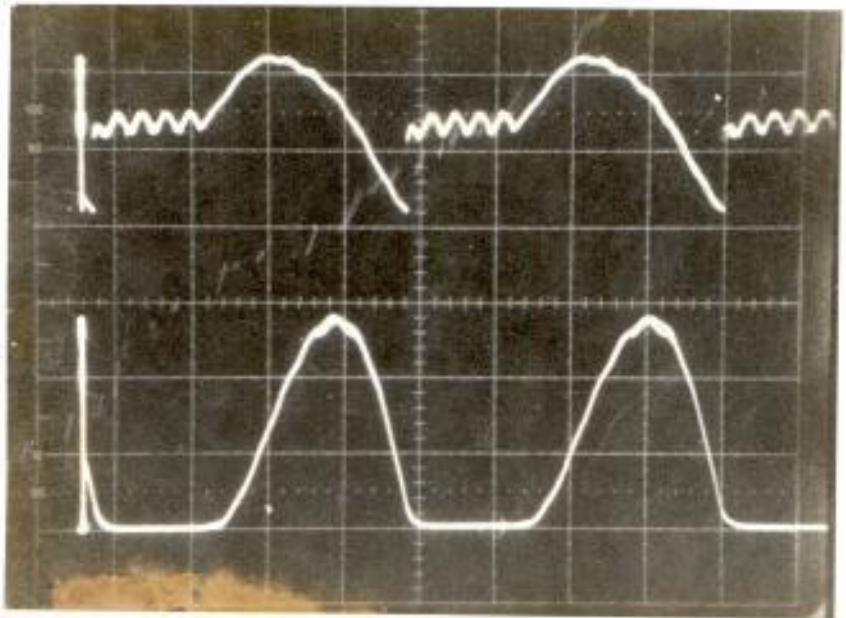
$u : 50 \text{ V/div.}$

$\varphi : 0^\circ$

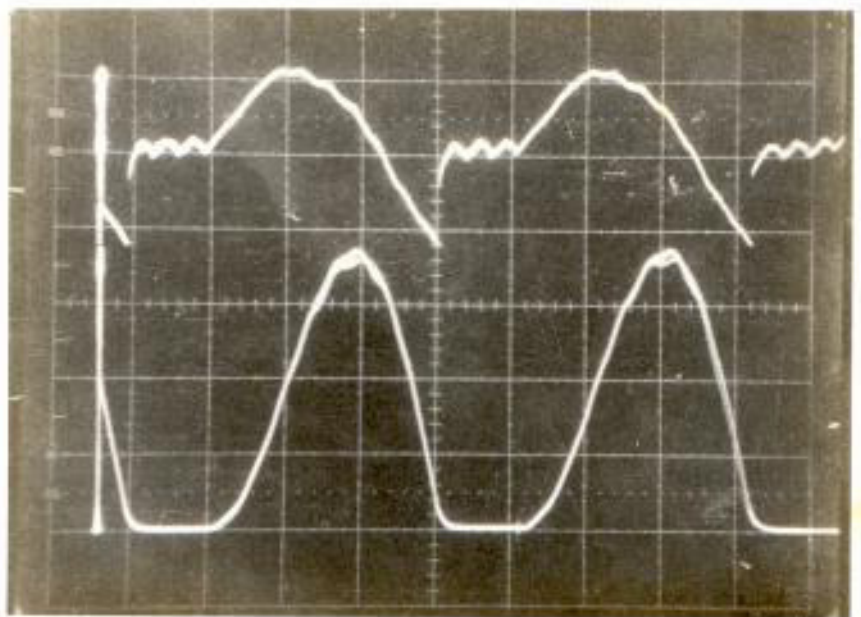
$i : 10 \text{ Amp/div.}$



Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N^o 22 $u : 50 \text{ V/div}$ $\phi : 0^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

Tiempo : 2 miliseg/div

OSCILOGRAMA N^o 23 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\phi : 0^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div}$ 

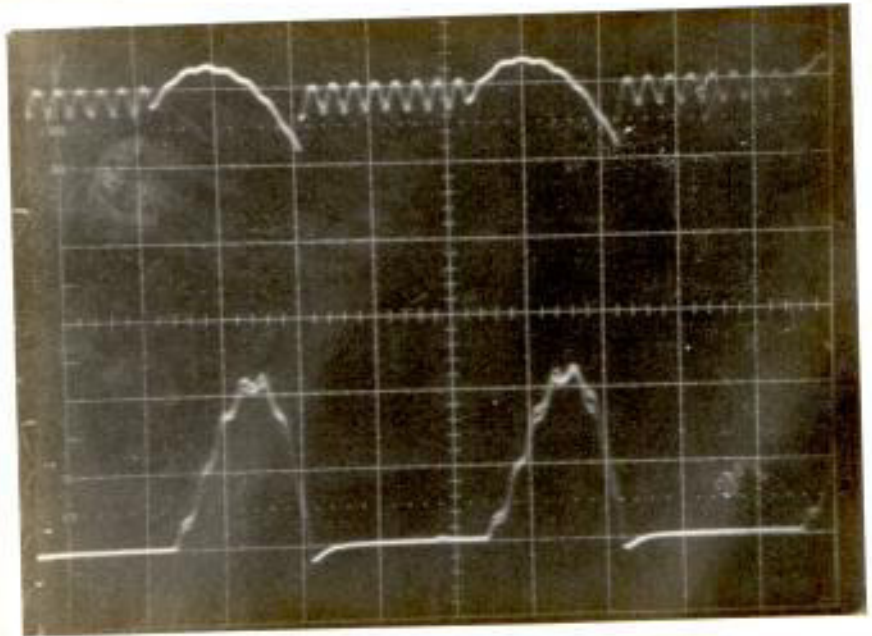
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 24

u : 50 V/div.

θ : 30°

i : 10 Amp/div



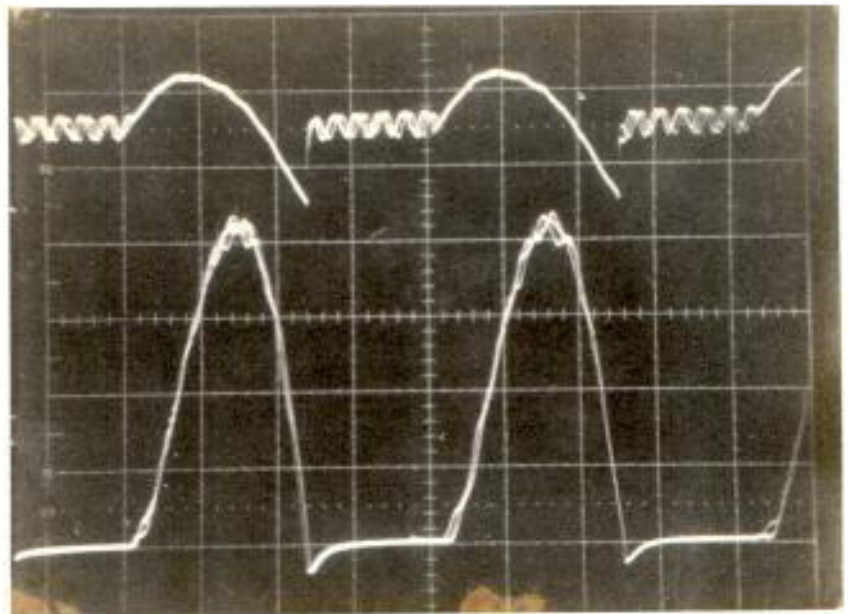
Tiempo : 2 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 25

u : 50 volt/div.

θ : 30°

i : 10 Amp/div.



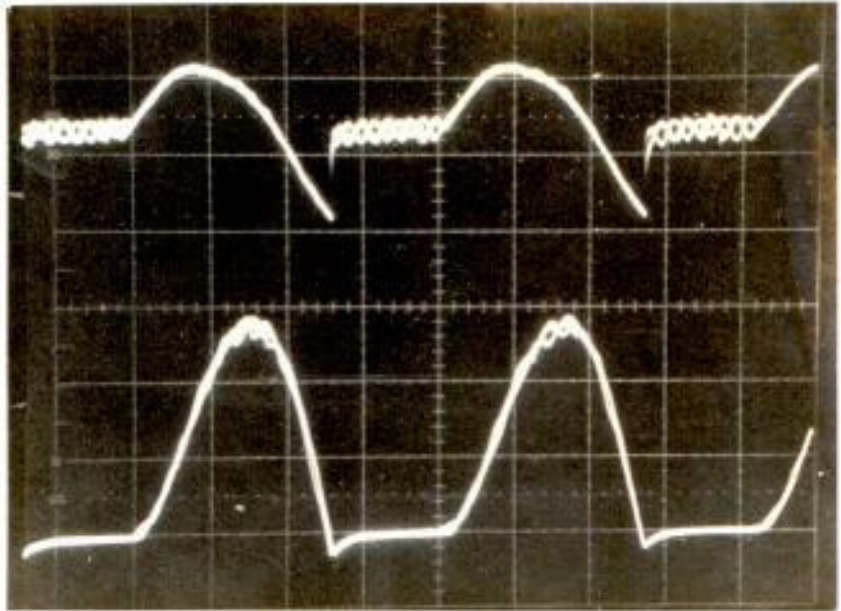
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 26

$u : 50 \text{ V/div.}$

$\theta : 30^\circ$

$i : 20 \text{ Amp/div}$



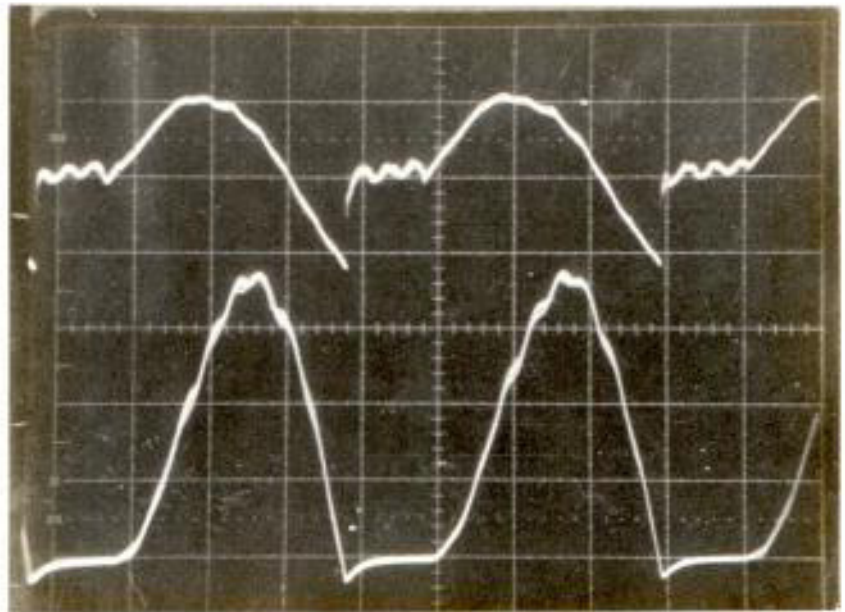
Tiempo : 2 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 27

$u : 50 \text{ V/div.}$

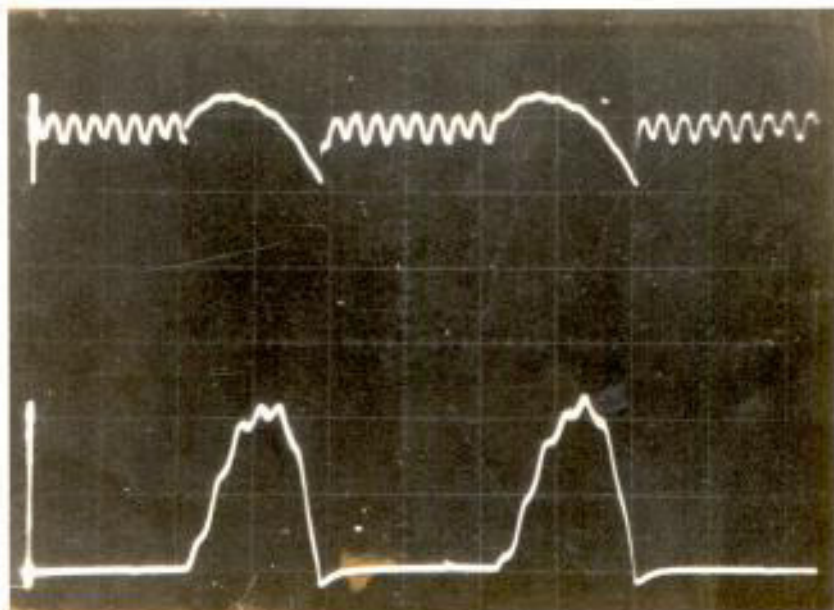
$\theta : 30^\circ$

$i : 20 \text{ Amp/div.}$



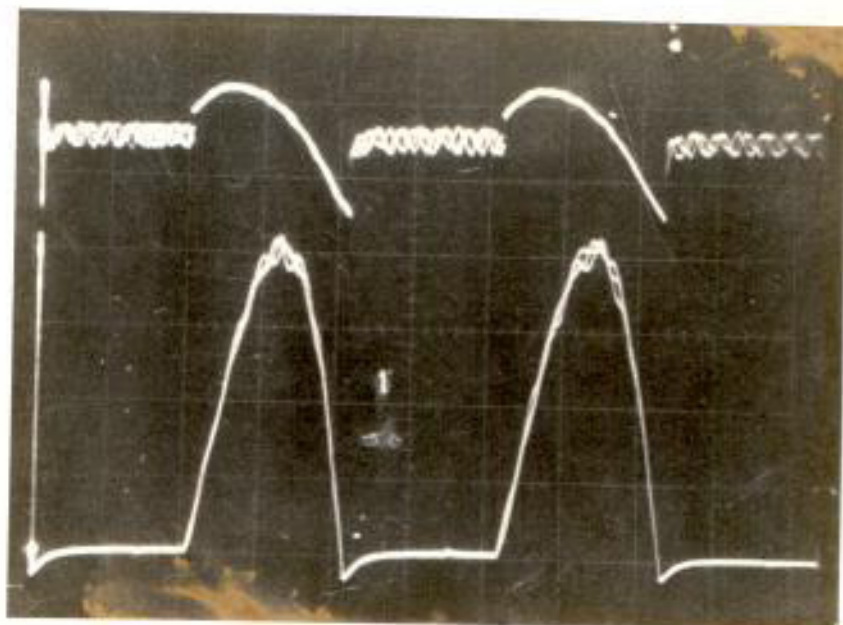
tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 28

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varnothing : 60^\circ$ $i : 10 \text{ Amp/div.}$ 

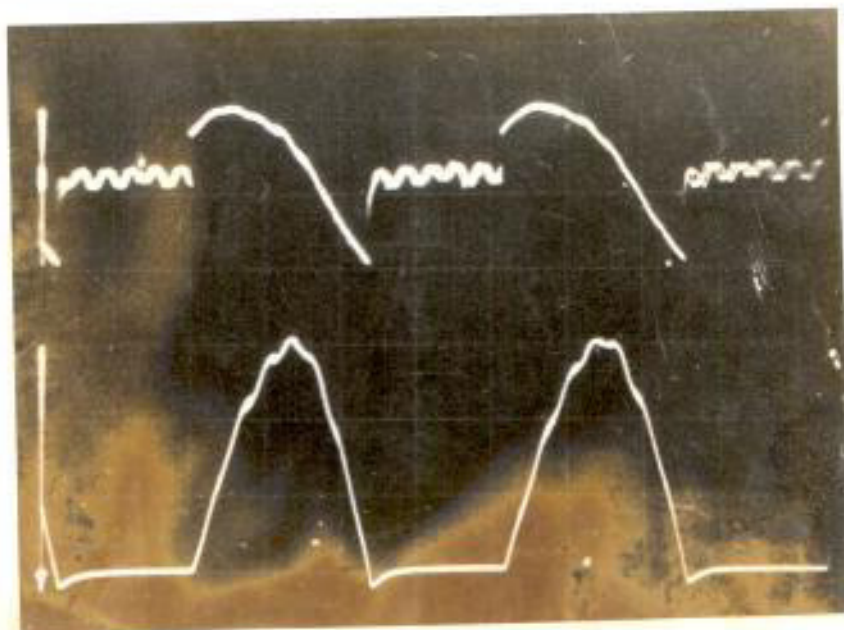
Tiempo : 2 miliseg/div

OSCILOGRAMA N° 29

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varnothing : 60^\circ$ $i : 10 \text{ Amp/div.}$ 

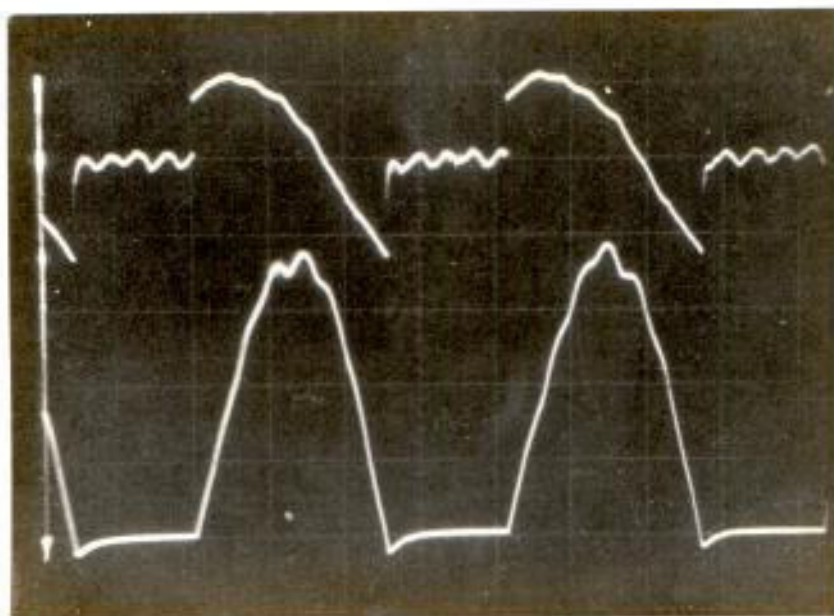
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 30

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 60^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

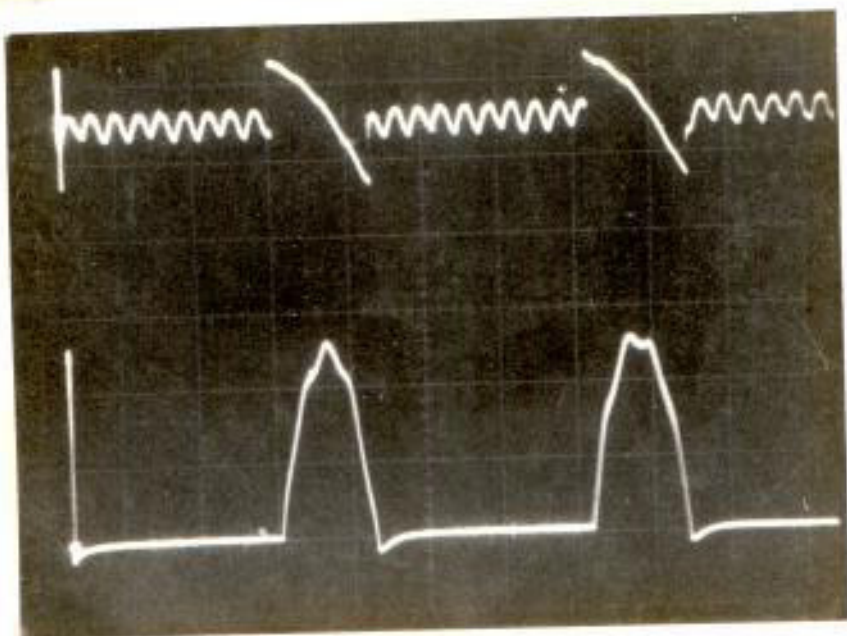
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 31

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 60^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

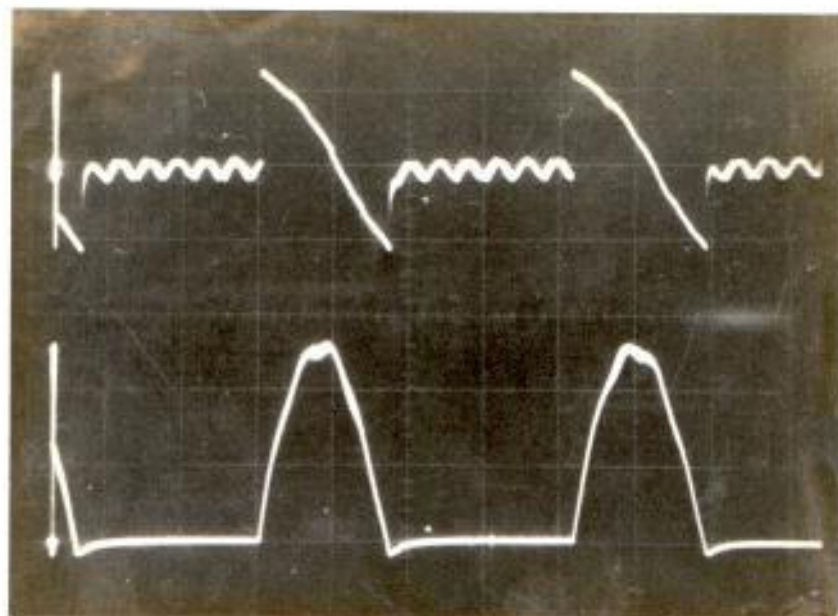
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 32

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\phi : 90^\circ$ $i : 10 \text{ Amp/div.}$ 

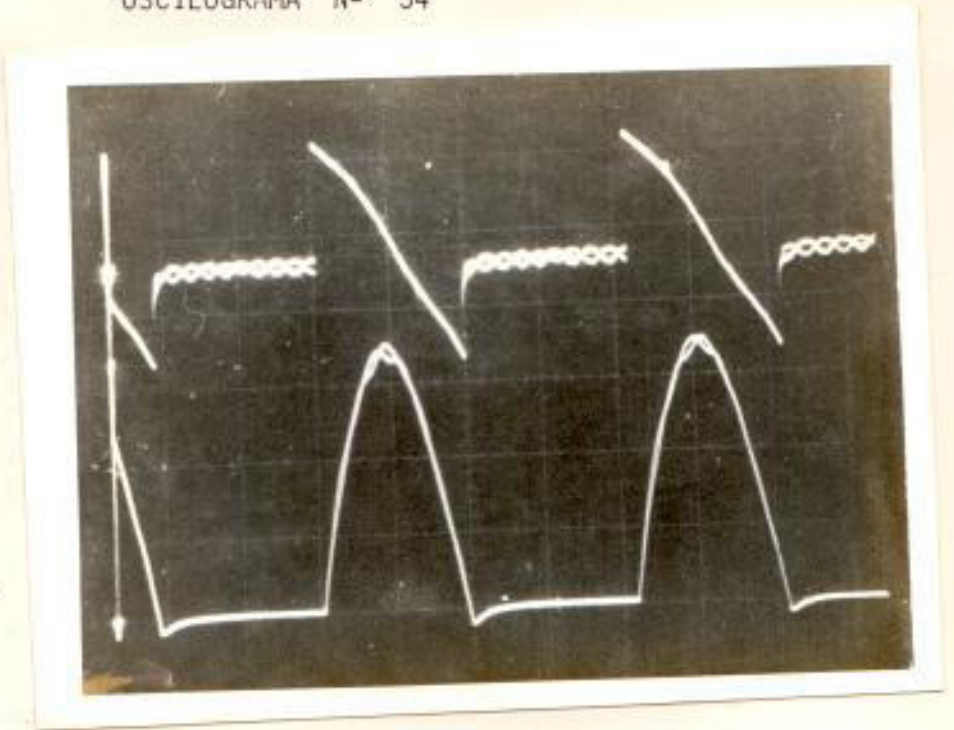
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 33

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\phi : 90^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

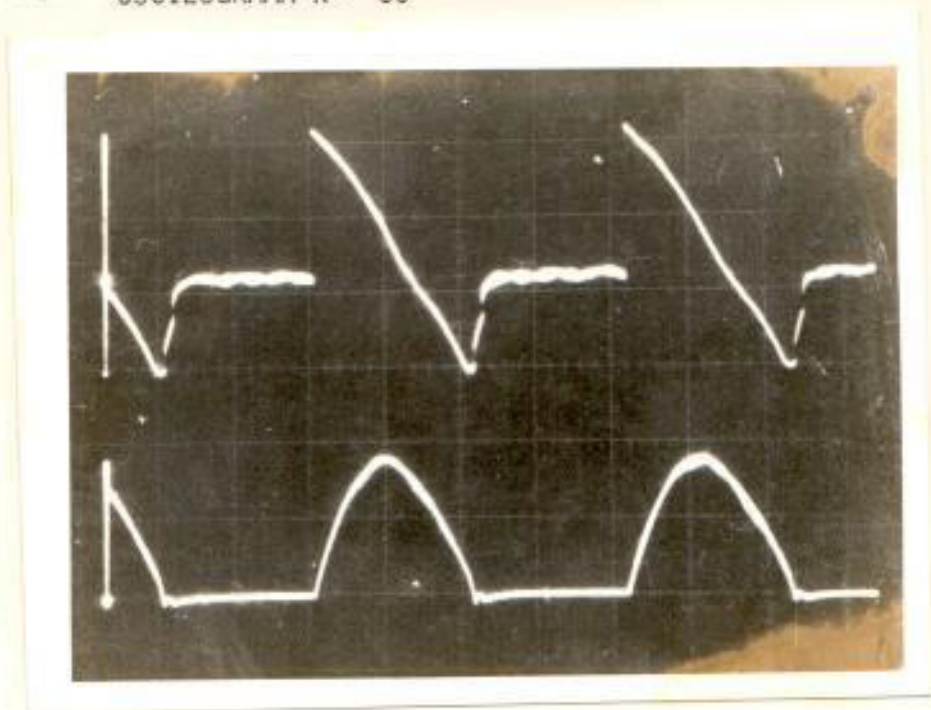
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 34

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 90^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 35

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\theta : 90^\circ$ $i : 50 \text{ Amp/div}$ 

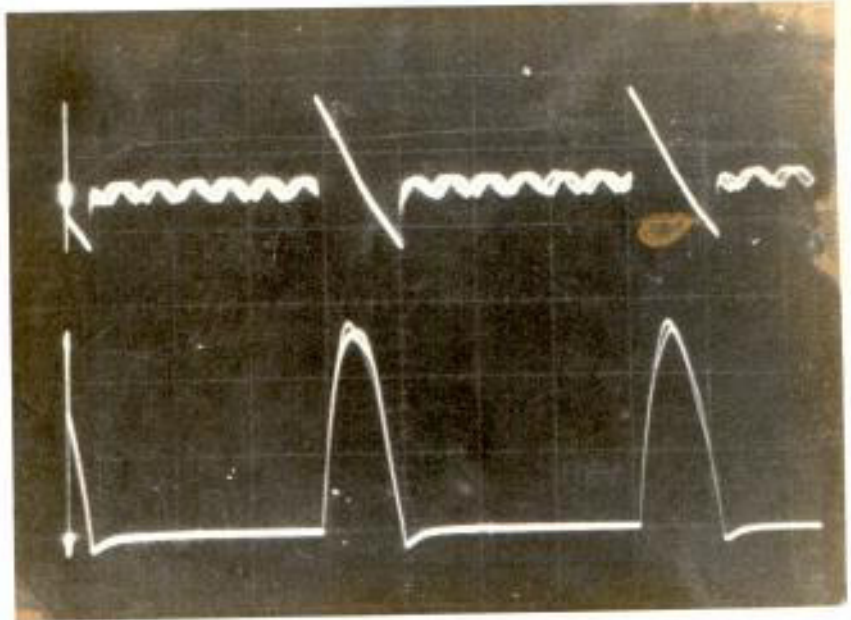
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 36

$u : 50 \text{ V/div.}$

$\vartheta : 120^\circ$

$i : 10 \text{ Amp/div.}$



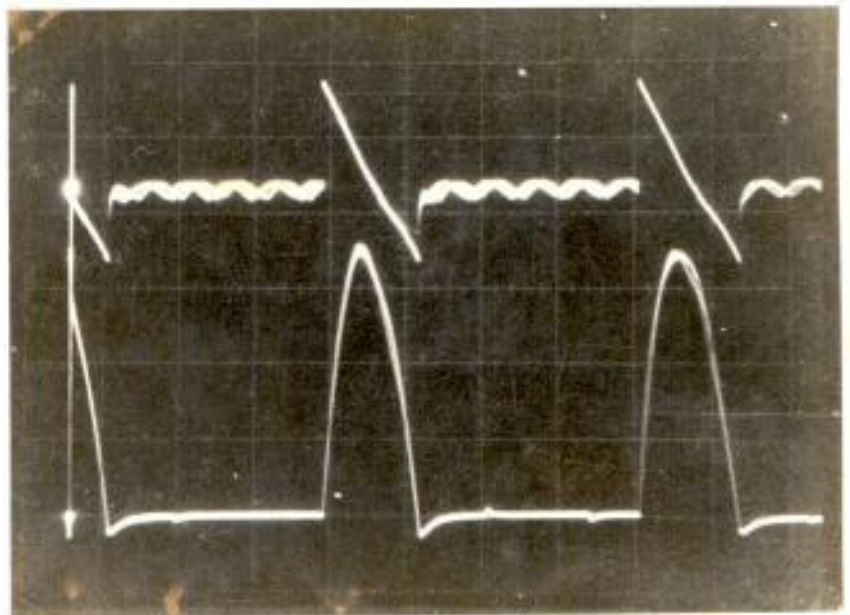
Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 37

$u : 50 \text{ V/div.}$

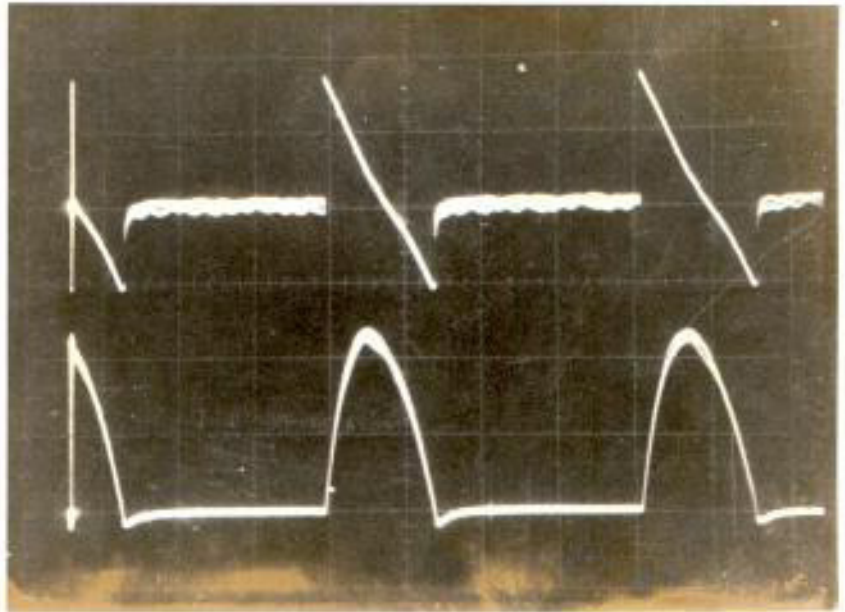
$\vartheta : 120^\circ$

$i : 10 \text{ Amp/div.}$



Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 38

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varnothing : 120^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$ 

Tiempo : 2 miliseg/div.

OSCILOGRAMA N° 39

 $u : 50 \text{ V/div.}$ $\varnothing : 120^\circ$ $i : 20 \text{ Amp/div.}$

Tiempo : 2 miliseg/div.

Inv. No. POT-025

observa que en un valor de par motor la velocidad disminuye con el incremento del ángulo θ y se disminuye el valor de la pendiente de las curvas.

El porcentaje (%) de regulación de velocidad - para todas las condiciones de disparo y para los 5 mismos puntos de carga de la tabla anterior se muestran en la Tabla 18.

De esta misma tabla se concluye que para diferentes condiciones de disparo y para un mismo par de carga, existe una diferencia en el porcentaje de regulación debido a una disminución del valor del voltaje medio de alimentación. Existe una pobre regulación de velocidad cuando se trabaja con ángulos de disparo mayores a 60° lo que hace notar que con este tipo de montaje los problemas de discontinuidad producen un par fluctuante y una gran caída de velocidad.

El factor de forma definido anteriormente, para este tipo de montaje es:

reduciendo. Además la f.c.e.m. disminuye su valor pero aumenta su presencia en período; disminuye su valor - porque el voltaje promedio se reduce al aumentar el valor del ángulo \emptyset y aumenta su presencia en el período porque se manifiesta cada vez más el efecto de discontinuidad. Figura N° 25. .

3.3.2.1. Curva Característica del par $C_m = f(I)$

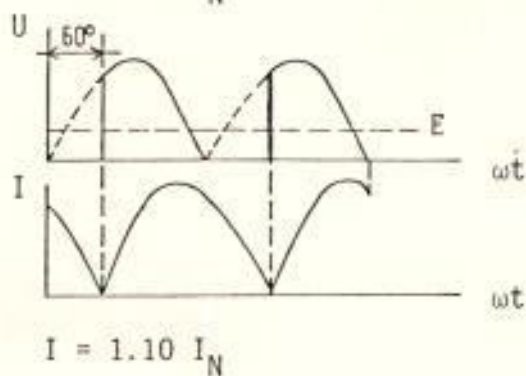
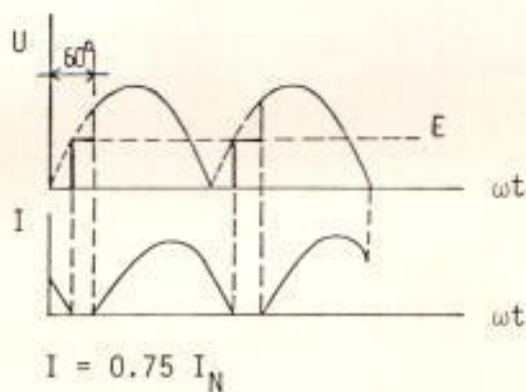
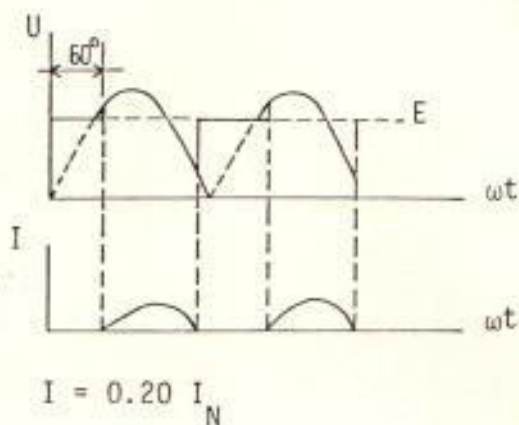
De igual forma que en el circuito de rectificación de media onda el flujo principal permanece constante, luego el par motor varía solo - con la corriente.

Pero en las curvas N° 35 al 39 existe una parte donde el par motor no crece en forma lineal; esto se debe igualmente a las mismas causas que en el caso de alimentación con rectificación de media onda.

Cuando el ángulo $\emptyset = 0^\circ, 30^\circ$, se puede hacer trabajar al motor hasta el valor de corriente no nominal. Sin embargo, cuando $\emptyset = 60^\circ, 90^\circ$ y 120° la potencia suministrada no es capaz de hacerlo - trabajar a su corriente nominal.

FIGURA N° 25

VOLTAJE Y DISCONTINUIDAD DE LA CORRIENTE DE ARMADURA CON RELACION AL PORCENTAJE DE CARGA DE UN MOTOR C.C.. ALIMENTACION MONOFASICA RECTIFICADA DE ONDA COMPLETA CON $\phi=60^\circ$



PAR (C) vs. CORRIENTE DE ARMADURA (I)

MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA

* DE DESFASE = $\phi = 0^\circ$

800

700

600

500

400

300

200

100

5,00

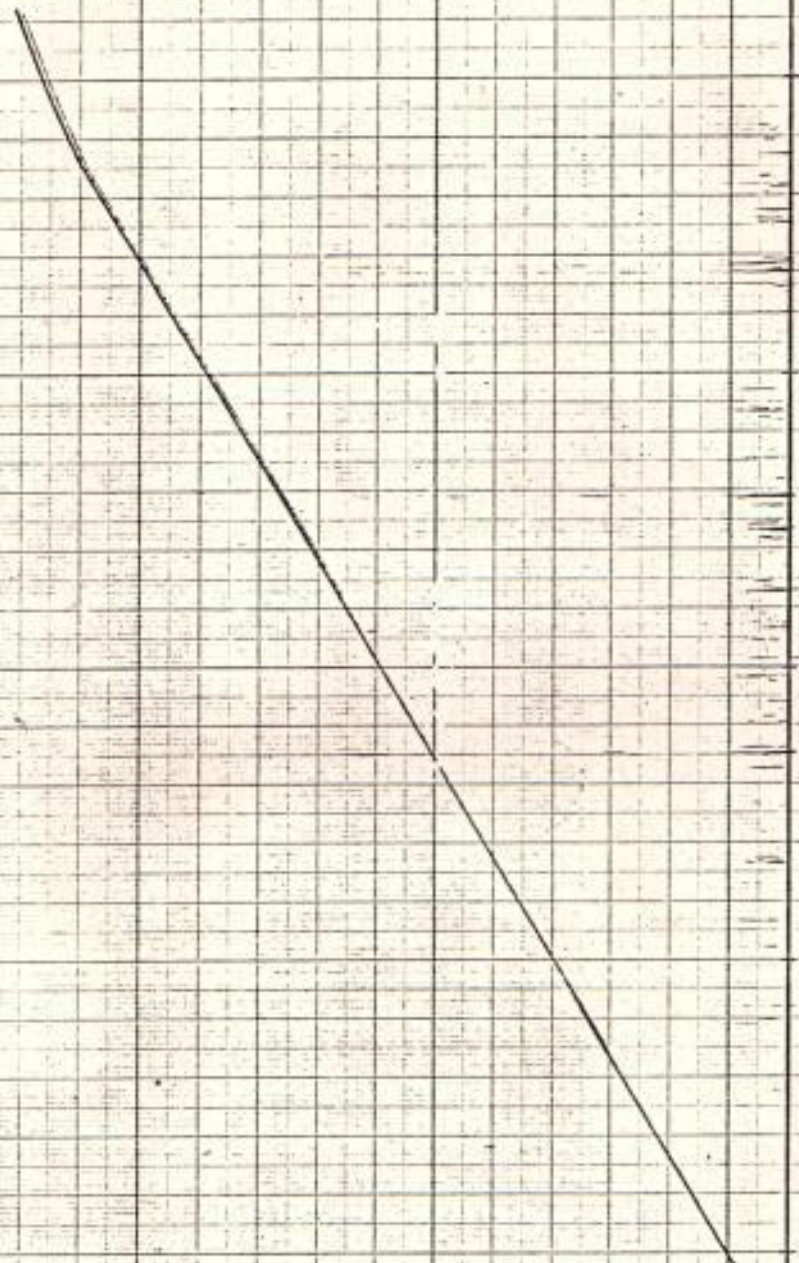
10,00

15,00

20,00

25,00

I (amp)



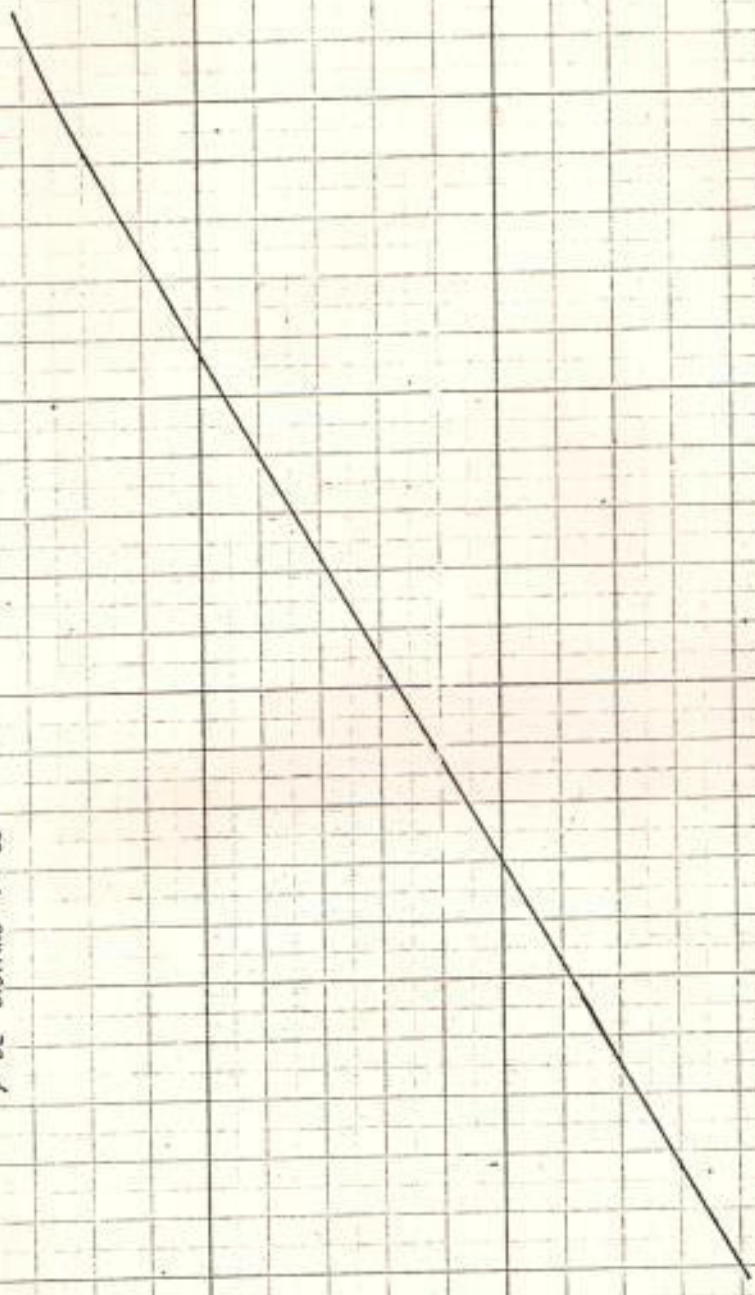
PAR (C.) Vrs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA

→ DE DISPARO: $\phi = 30^\circ$

ϕ (gr. pte)

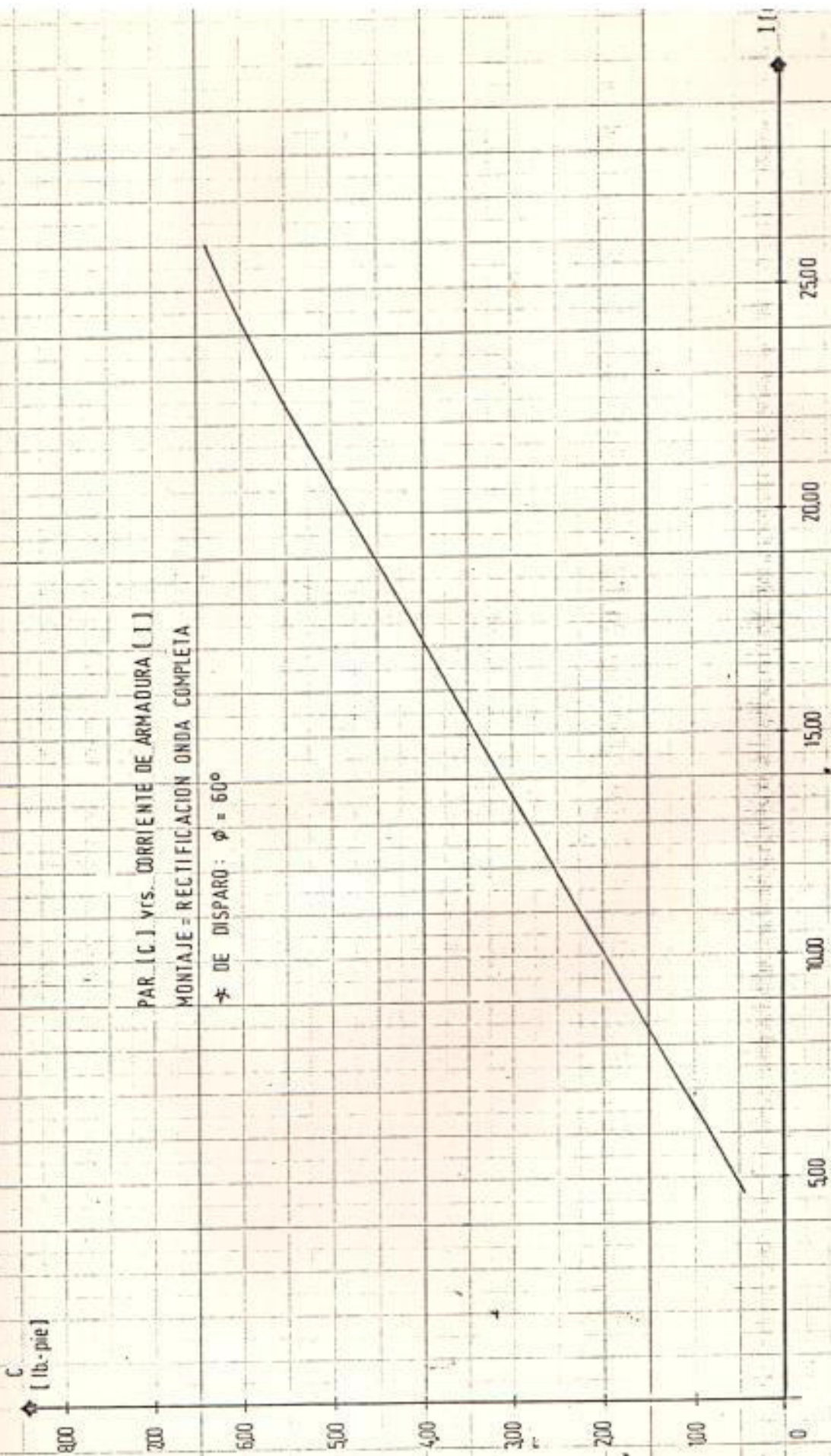
800
700
600
500
400
300
200
100
0

500 1000 1500 2000 2500



C
[lb.-pie]

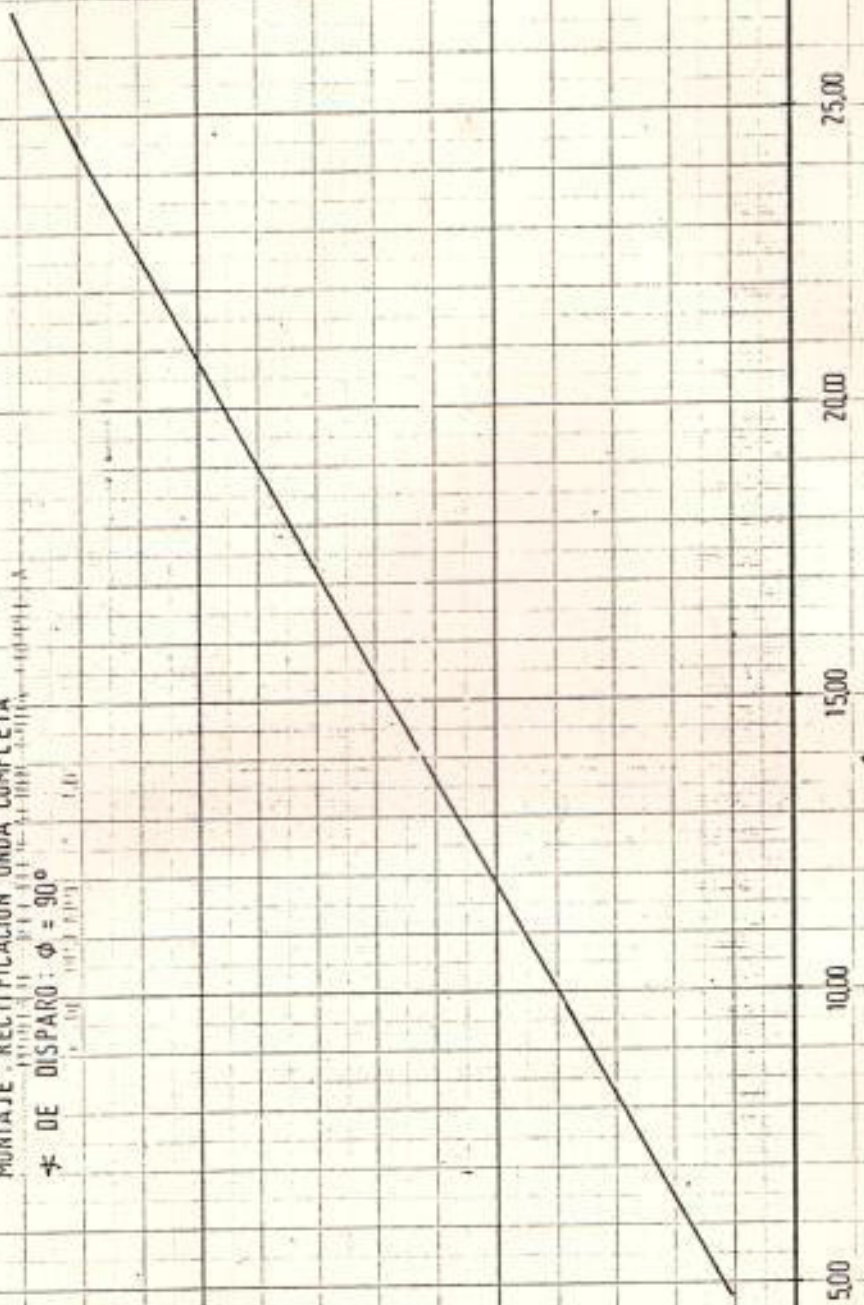
PAR. [C.] vs. CORRIENTE DE ARMADURA [I]
MONTAJE = RECTIFICACION ONDA COMPLETA
* DE DISPARO: $\phi = 60^\circ$



I

I_{eff}
(lb-pie)

PAR [C.] vs. CORRIENTE DE ARMADURA (I.)
MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA
* DE DISPARO: $\phi = 90^\circ$



11

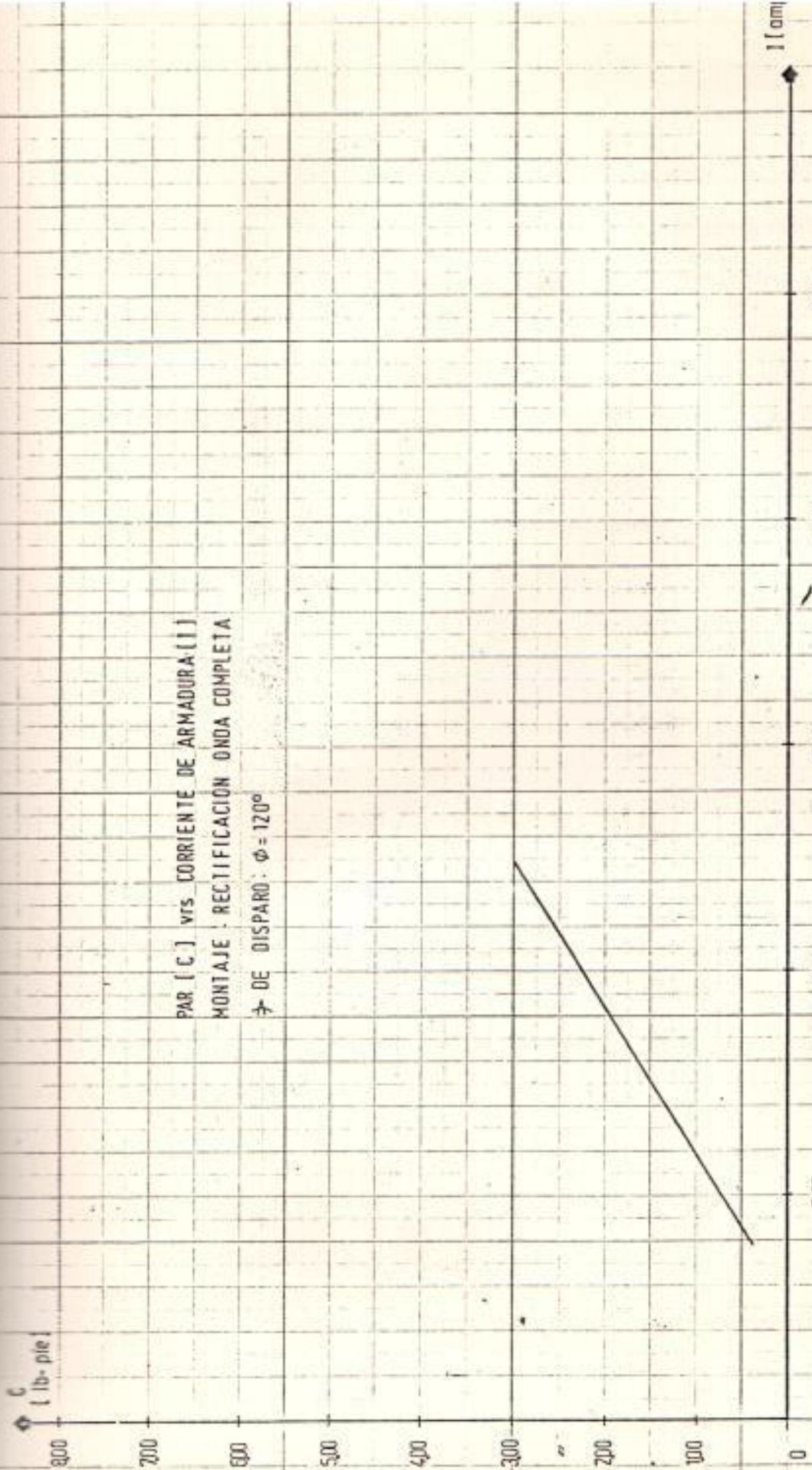
PAR [C] vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE : RECTIFICACION ONDA COMPLETA
φ DE DISPARO : φ = 120°

C
(lb- pie)

I (am)

800 200 600 500 400 300 200 100 0

5.00 10.00 15.00 20.00 25.00



De las curvas mencionadas en este acápite se escogen 5 valores de par motor y se obtienen los siguientes porcentajes de corriente nominal, Tabla N° 17.

Con este tipo de montajes se puede lograr que el motor trabaje hasta en un 96.66 % de su capacidad nominal como se puede apreciar en la tabla N° 17 .

3.3.2.2. Curva Característica Mecánica $C_m = f(n)$:

Las curvas N° 40 muestra la velocidad de funcionamiento del motor en estado estable para un cierto valor de par motor y se observa que las curvas cuyo ángulo $\theta = 0,30$ y 60° para valores reducidos de par motor, tienden a unirse, esto se debe a que la diferencia de voltaje medio de alimentación correspondientes es mínima.

Al igual que cuando se alimenta al motor con tensión alterna rectificadora de media onda, se

TABLA N° 17

% CORRIENTE NOMINAL EN BASE A VALORES FIJOS DE PAR MOTOR Y DIFERENTES ANGULOS DE DISPARO.

∇ PAR CARGA (Lb-pie)	0°	30°	60°	90°	120°
1.50	30.00	30.00	30.00	30.00	28.00
3.00	50.00	50.00	50.00	50.00	46.00
4.50	70.00	70.00	70.00	70.00	-
6.00	90.00	90.00	90.00	90.00	-
6.50	96.66	96.66	-	-	-

CURVA Nº 40

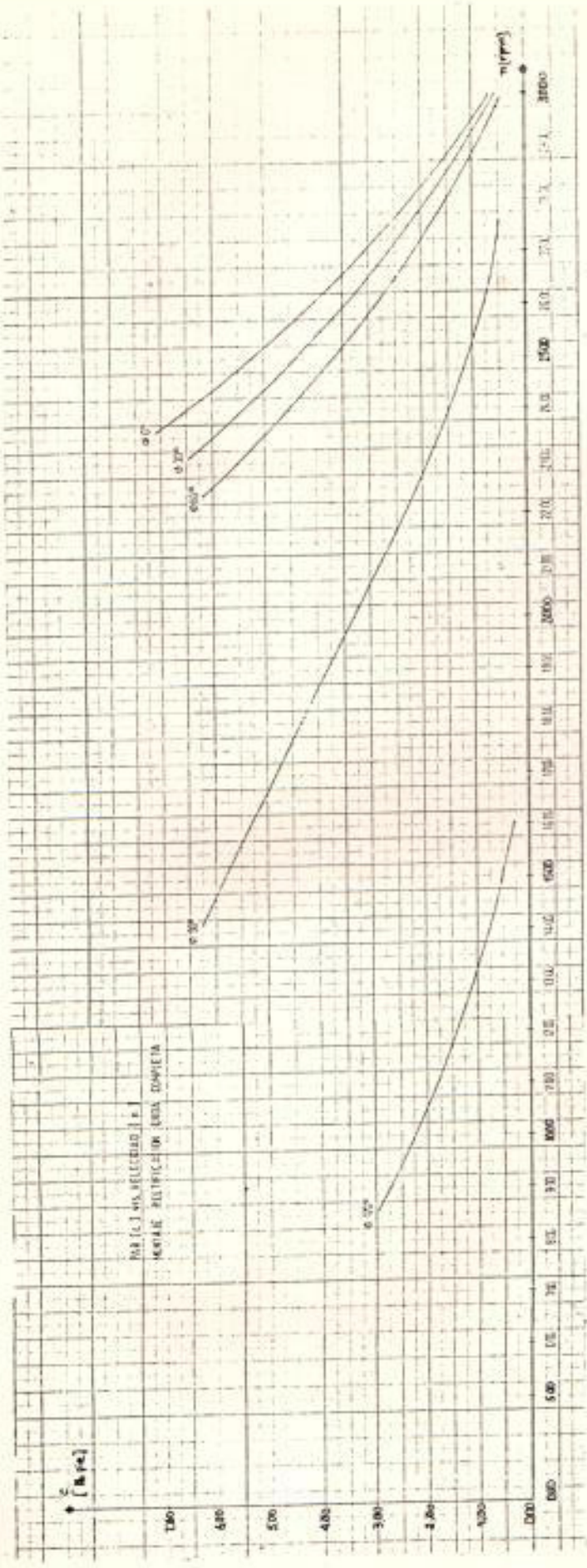


TABLA N° 18

% REG. VELOCIDAD EN BASE A LA VARIACION DE \emptyset

ANGULO PAR CARGA. (lb-pie) \emptyset	0°	30°	60°	90°	120°
1.50	4.67	5.26	6.59	12.19	31.68
3.00	11.23	12.99	15.44	29.90	80.79
4.50	17.28	19.76	23.55	50.83	-
6.00	23.26	26.84	31.71	81.60	-
6.50	25.05	29.31	-	-	-

$$F_f = \frac{U}{U_c} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.107$$

Valor muy cercano a la unidad, igual al valor del factor de forma de un puente rectificador de onda completa con $\theta = 0^\circ$. Además se tiene un rendimiento mejor que con rectificación de media onda y esta es una de las razones para que el motor sea más estable.

3.3.2.3. Curva Característica de Rendimiento $\eta = f(I)$:

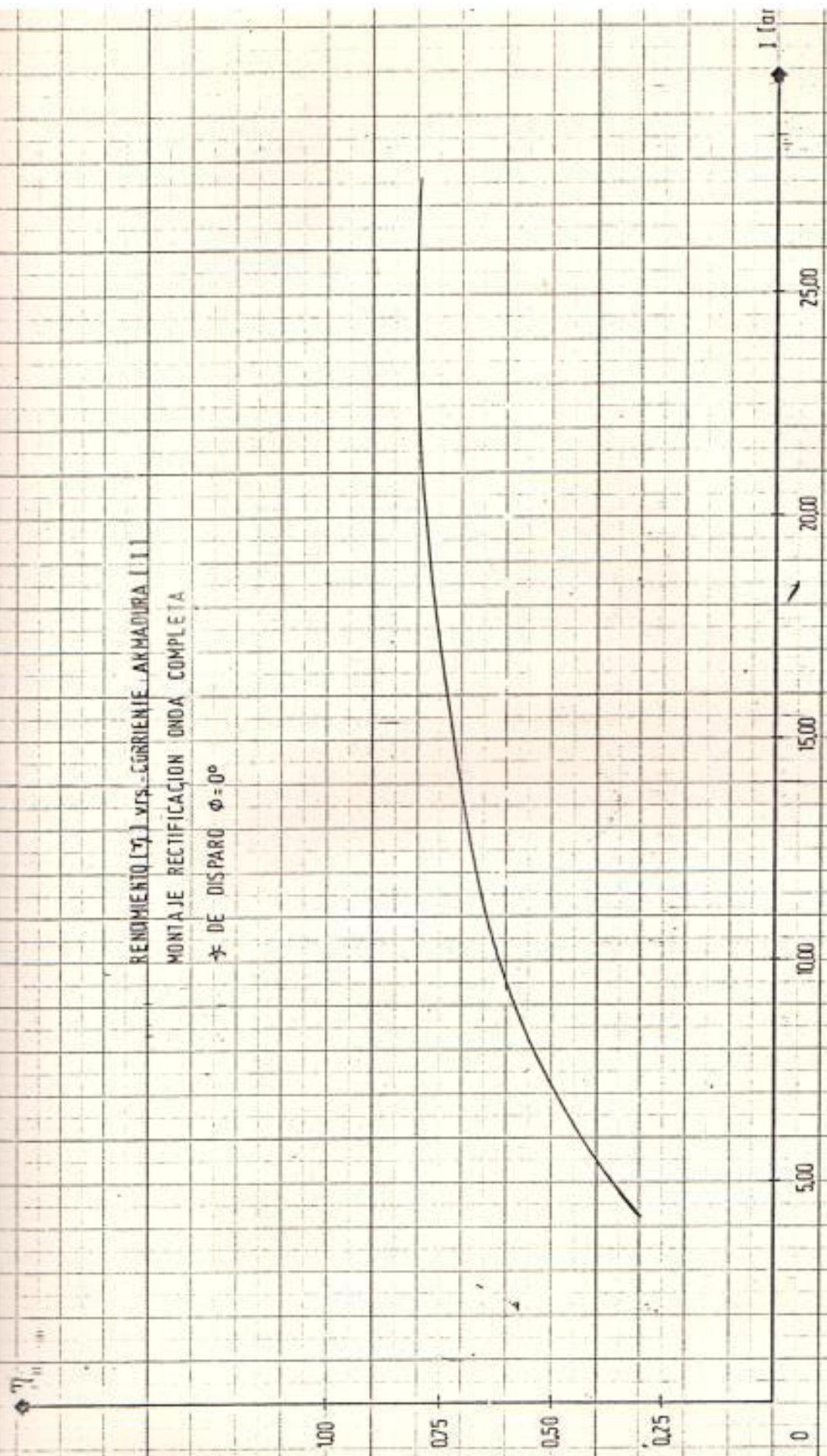
Estas características se muestran en las curvas 41 al 45 donde se observa que las curvas en los 5 casos tienen la misma configuración, - con una diferencia del valor máximo de rendimiento no muy notoria. Pero el rendimiento máximo está ubicado siempre para los valores de carga menores conforme aumenta el ángulo θ de la misma manera como ocurre en el caso anterior.

Como el ángulo θ aumenta, el rizado es cada vez de mayor valor, lo que hace que la reacción de

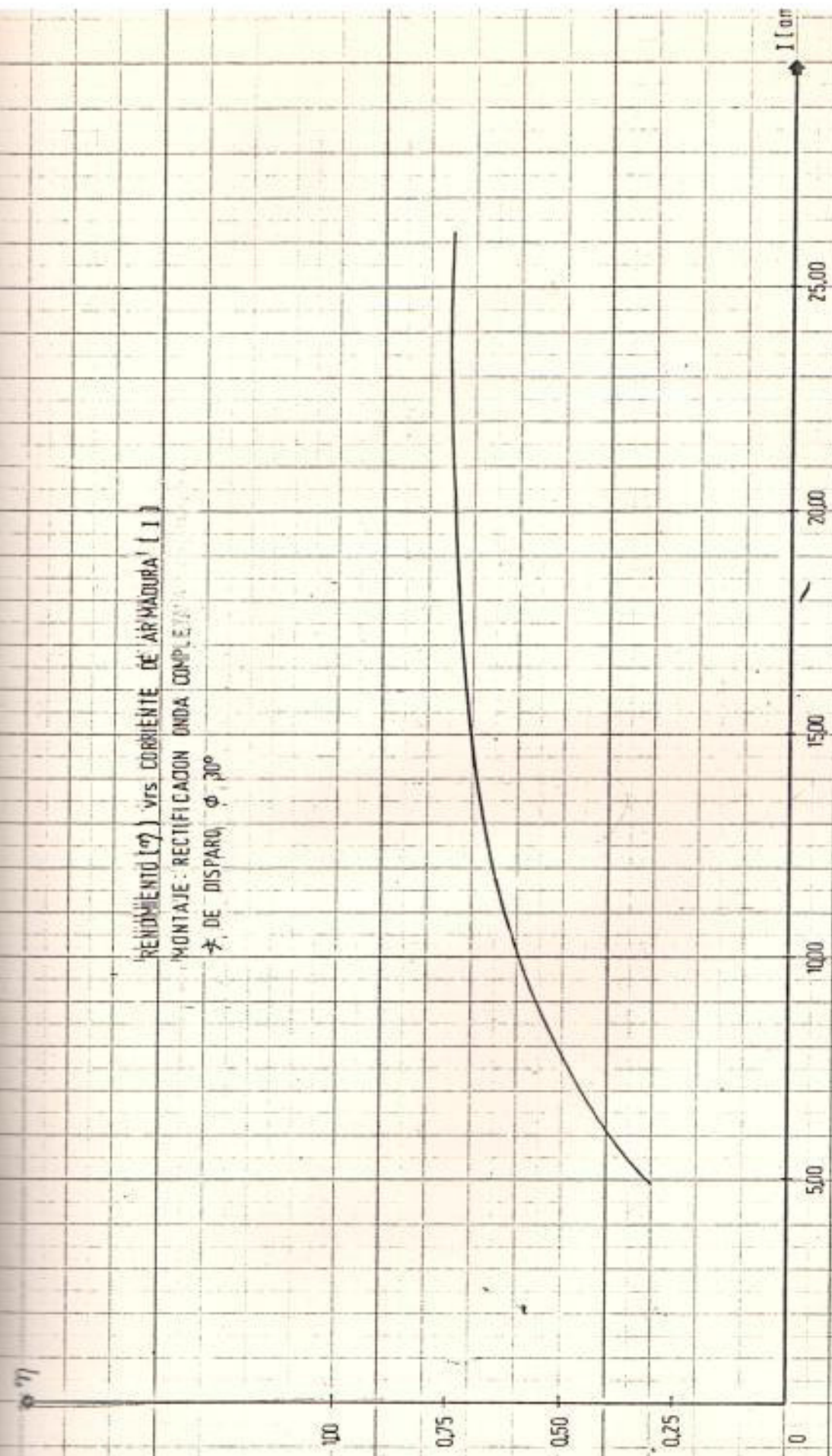
RENDIMIENTO (%) vs. CORRIENTE ARMADURA (A)

MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA

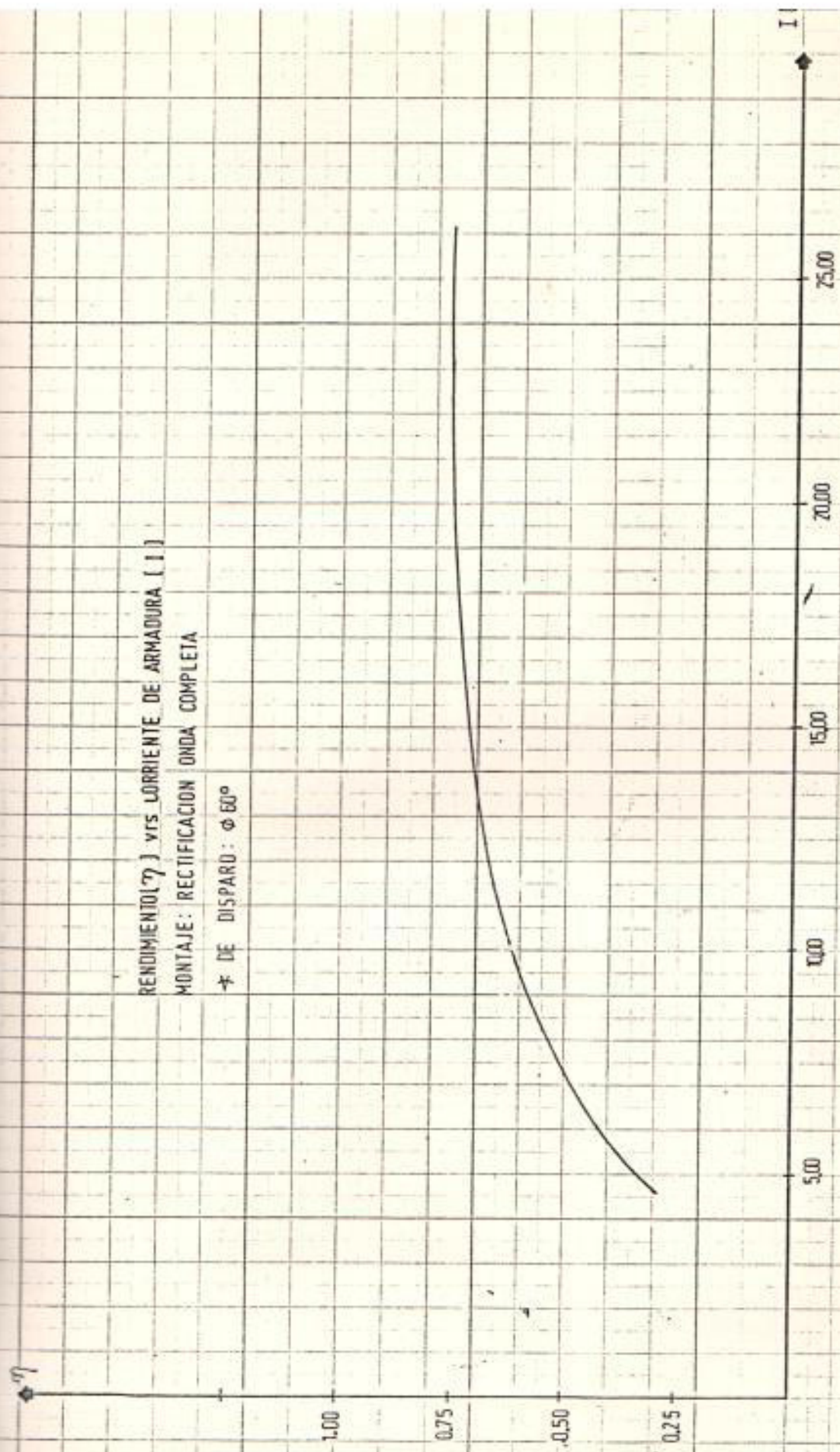
$\phi = 0^\circ$



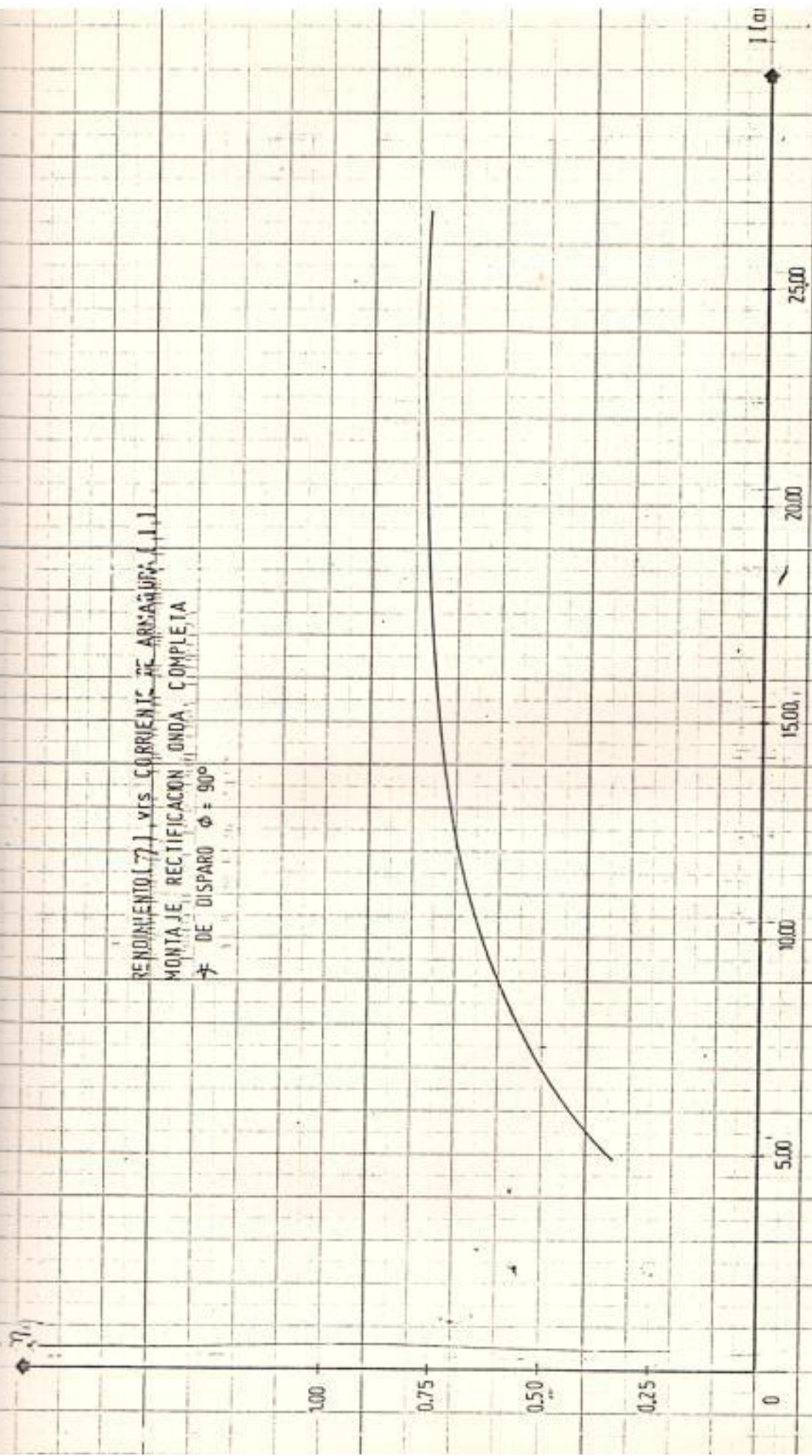
RENDIMIENTO (η) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA
 ϕ DE DISPARO ϕ 30°



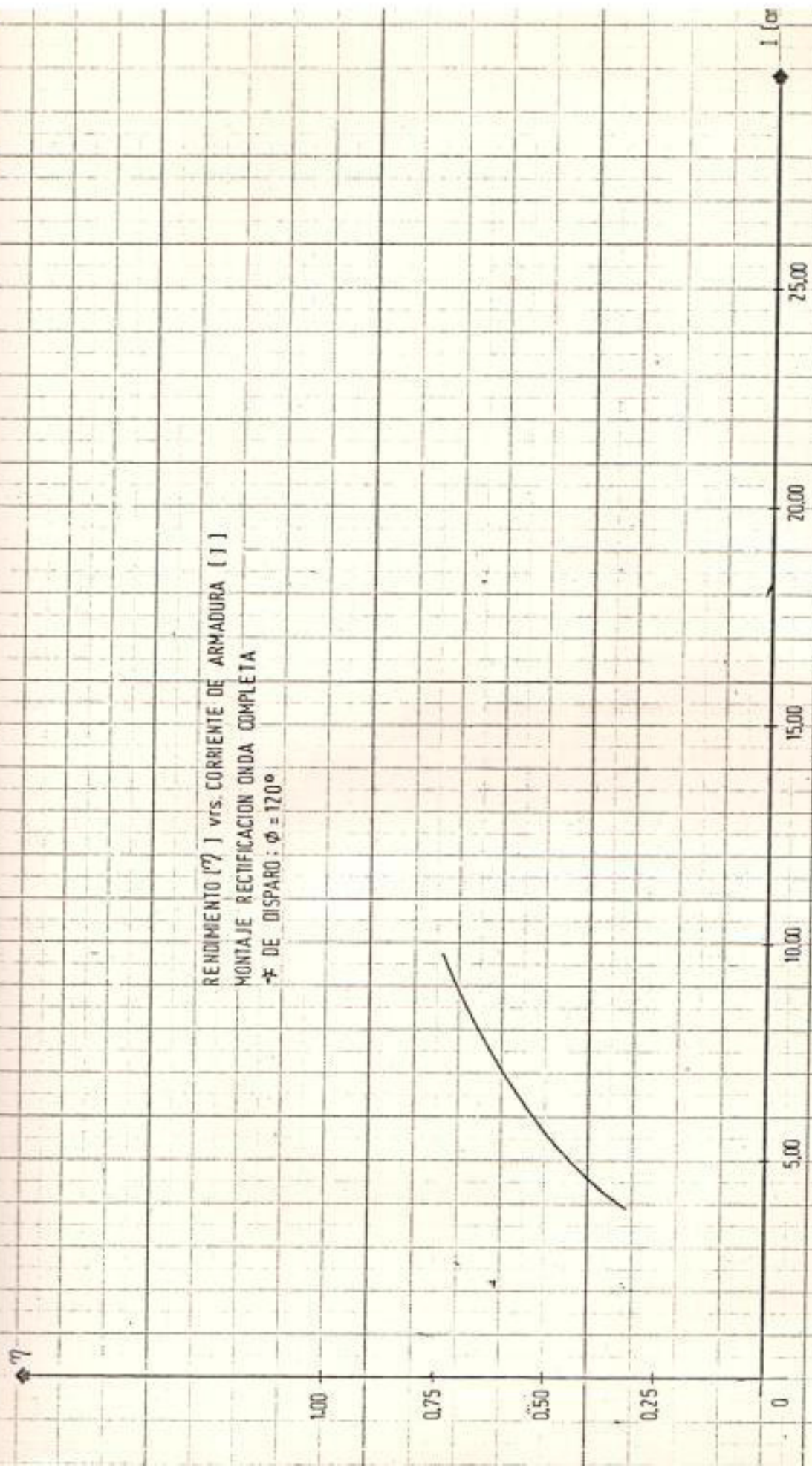
RENDIMIENTO(η) vs CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA
 α DE DISPARO: 60°



RENDIMIENTO [77] VTS CORRIENTE DE ARMADURA (L.L.)
MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA
φ DE DISPARO φ = 90°



RENDIMIENTO (%) vs. CORRIENTE DE ARMADURA (I)
MONTAJE RECTIFICACION ONDA COMPLETA
-φ DE DISPARO: φ = 120°

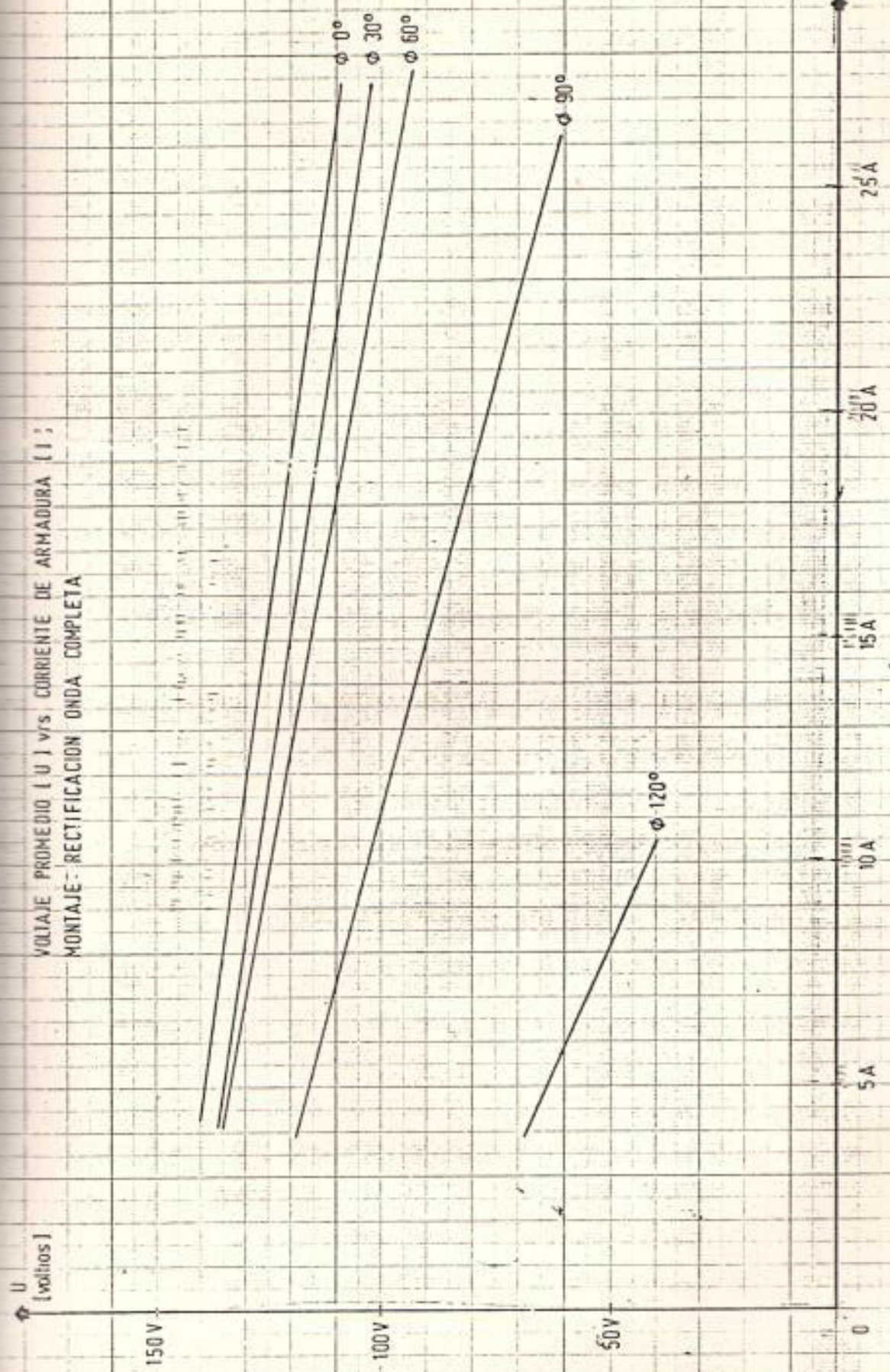


armadura produzca mayores pérdidas. Además, el voltaje de reactancia que aparece en las bobinas cortocircuitadas por las escobillas en la conmutación limita el porcentaje (%) de utilización de la potencia del motor.

3.3.2.4. Curva característica Voltaje de alimentación - corriente de armadura $U = f(I)$

En cada caso cuando el motor es cargado la caída de voltaje de alimentación es mayor. Por esta razón el porcentaje de regulación de velocidad es cada vez mayor. Aunque la caída de tensión es significativa el rendimiento máximo del montaje de rectificación es de aproximadamente 81,20%; ésta es una de las causas por la cual con este tipo de montajes se trabaja con motores de hasta 3 Kw. Curva N^o 46.

VOLTAJE PROMEDIO [U] vs. CORRIENTE DE ARMADURA [I];
MONTAJE: RECTIFICACION ONDA COMPLETA



(1)

CAPITULO IV

4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DOS METODOS EXPUESTOS

4.1. ARRANQUE DEL MOTOR

Para montajes con rectificación de media onda el motor puede ser arrancado cuando el valor del ángulo ϕ varía entre 90° y 60° y la corriente promedio estaría ubicada entre 219% y 415% de su valor nominal, respectivamente. Con montajes de rectificación de onda completa el valor del ángulo ϕ podría ser tomado entre 120° y 90° ; donde la corriente promedio estaría entre 200% y 353% de su valor nominal, respectivamente.

La conveniencia de usar el segundo método radica en que el tiempo de aceleración para que el motor alcance su estado estable es menor; en efecto, el motor necesita de 1.50 a 2.00 segundos contra 6.00 a 9.00 segundos aproximadamente requeridos en el primer método.

4.2. FUNCIONAMIENTO EN ESTADO ESTABLE

4.2.1. Curva característica del par $C_m = f(I)$

Todas las curvas, tanto la que representa la característica del par cuando se alimenta al motor con corriente continua como las obtenidas con rectificación de media onda y onda completa, tienen una forma similar, pero - con las observaciones siguientes:

- El motor alimentado con corriente continua presenta una buena capacidad de sobrecarga.
- Con alimentación monofásica y rectificación de media onda el motor puede trabajar hasta un 70 % de su capacidad, debido a los efectos de saturación magnética y deterioro de la conmutación que se agrava con el incremento de las corrientes de eddy. Por otra parte, estos efectos se hacen más fuertes cuanto mayor es el valor del ángulo θ , curvas 13 a 17 .
- Con alimentación monofásica y rectificación de onda completa el motor se comporta con más eficiencia que en el caso anterior, gracias al mayor suministro de energía; los efectos expuestos anteriormente disminuyen considerablemente y el motor alcanza un rendimiento máximo de 97 % aproximadamente para $\theta = 0$.

4.2.2. Curva Característica Mecánica $C_m = f(n)$

Con estas curvas se pueden obtener los porcentajes de regulación de velocidad:

- Con alimentación de corriente continua el porcentaje es de 6.50 % aproximadamente con carga nominal.
- Con alimentación monofásica y rectificación de media onda el porcentaje es aproximadamente 29.50 % para el 70 % de la carga nominal, cuando $\phi = 0^\circ$.
- Con alimentación monofásica y rectificación de onda completa el porcentaje es 17.28 % para el 70 % de la carga nominal y 25.05 % para el 97 % de plena carga, con un $\phi = 0^\circ$.

Según los análisis, cuando ϕ aumenta en los dos montajes tratados, el porcentaje de regulación de velocidad aumenta considerablemente.

- La característica par velocidad presenta dos regiones distintas:

- La región donde la corriente de armadura es continua o está muy cerca de la continuidad. En esta región la variación de velocidad por efectos del par de carga es semejante a la que corresponde a los motores alimentados convencionalmente: La característica tiende a ser una recta.
- La región donde la corriente de armadura es discontinua. En esta región los motores trabajan con pares de carga de valores reducidos. La característica en esta región es una curva y en cada punto se encuentran pendientes diferentes e inferiores a las encontradas en la zona de continuidad.

Revisando las curvas 2, 18 y 39 se concluye - que existe un mejor comportamiento del motor cuando se trabaja con montajes de rectificación de onda completa que con los de media onda, puesto que la capacidad de trabajo y el grado de estabilidad del motor es mayor.

4.2.3. Curva Característica de rendimiento $\eta = f(I)$

Cuando se alimenta a un motor con corriente continua -

su máximo rendimiento ocurre a carga nominal, curva 3 . Lo mismo sucede cuando al motor de corriente continua - se lo alimenta con una fuente de corriente alterna rectificada.

Con el montaje rectificador de media onda, la máxima capacidad de trabajo del motor es del 70 % de su capacidad nominal cuando $\vartheta = 0^\circ$; entonces, el rendimiento máximo se obtendrá para el porcentaje arriba expuesto. Si - se revisan las curvas 19 a 23 se notará que los máximos rendimientos ocurren cuando el motor trabaja a su máxima capacidad sin sobrepasar límites de sobrecarga. Además, de las curvas 40 a 44 concluimos que mejores rendimientos se obtienen con montajes rectificadores de onda completa, como era de esperarse.

4.2.4. Curva Característica del voltaje promedio de alimentación Corriente de Armadura $U = f(I)$

Luego de analizar las curvas 4,24 y 45 se puede indicar que la caída del voltaje de alimentación no se debe a los parámetros del motor sino al tipo de circuito de alimentación y al valor del ángulo de disparo; por lo

tanto mejores comportamientos de los motores se ob tendrán cuando la alimentación provenga de montajes con una gran capacidad de rectificación de tensiones alternas; de donde, un mejor rendimiento se obtendrá con el montaje de rectificación de onda completa.

4.3. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS OSCILOGRAMAS

Se puede notar en los oscilogramas N^o 1 a 4 , donde el mo tor es alimentado con corriente alterna trifásica rectifica da de onda completa y que en este trabajo es asumida como corriente contínua, que la corriente tiene un cierto porcen taje de rizado y que al aumentar la carga aumenta su valor pico, y siempre existe continuidad en el período de conduc ción.

En el caso de rectificación de media onda como en el de on da completa, oscilogramas 5 a 19 , se observa que la f.c.e.m.E interviene aún en los casos de gran discontinui dad; este fenómeno resulta más notorio en el caso de media onda donde en cada ciclo existe un solo pulso, mientras que para onda completa existen 2: lo que es normal.

Cuando el motor es alimentado con corriente alterna monofá-

sica rectificada a media onda la discontinuidad en la conducción de corriente es muy importante; con rectificación de onda completa existe discontinuidad pero en menor grado, como se aprecia en los oscilogramas. Además, estos oscilogramas - indican que el período de conducción de corriente de armadura se incrementa con el aumento de la carga del motor. Osc.20 1 30.

El diodo de paso libre D en estos casos cumple una función: actuar en los intervalos de no conducción del tiristor. A pesar de que en este trabajo seguramente no se tomaron ciertas mediciones en el lazo donde intervino el diodo D, sin embargo las ondas de voltaje de alimentación y las de corriente de armadura, se puede distinguir su período de trabajo.

4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DOS METODOS

4.4.1. Ventajas del uso de rectificación de media onda para - alimentación de un motor c.c.

La primera es de orden económico, puesto que solo se emplea un tiristor con su circuito de disparo. Y luego, lo segundo es la simplicidad del circuito.

4.4.2. Desventajas

- El transformador de alimentación se saturará muy rápidamente por efecto de la componente de corriente continua.
- Cuando el motor es sometido a pares de carga elevados tenderá a moverse ruidosamente porque la potencia le es suministrada en pulsos de uno por ciclo.
- Con un ángulo de conducción pequeño el factor de forma se incrementa, de modo que la capacidad normal de trabajo del motor es limitada al 70 %. Un ligero mejoramiento se obtiene introduciendo el diodo de paso libre.
- El alto valor del rizado de la corriente tiene una frecuencia suficientemente grande que incrementa el voltaje de reactancia de las bobinas que se encuentran bajo la acción de la conmutación, lo cual aumenta considerablemente el deterioro de la conmutación.
- El contenido de armónicos producen pares armónicos

ro ninguno de ellos emerge como potencia mecánica, sino que contribuyen a pérdidas adicionales en los conductores y en el hierro del motor (corrientes de Eddy).

- Las grandes corriente de Eddy en el circuito magnético del eje en cuadratura originan un flujo en el interpolo, atrasado en el tiempo con respecto a la corriente, que produce trastornos en la conmutación.
- Porcentajes de regulación de velocidad muy elevados.

Por estas razones, los dispositivos de mando de rectificación de media onda quedan limitados a motores de máximo 0.75 Kw de potencia.

4.4.3. Ventajas del uso de rectificación de onda completa para alimentación de un motor c.c., con respecto al suministro con rectificación de media onda.

- El efecto de saturación magnética en el transformador de alimentación es menos perceptible.
- Se producen menos ruidos en el motor porque los pulsos

de potencia suministrada por ciclo son dos .

- El factor de forma, próximo a la unidad, es de menor valor, de modo que puede utilizarse prácticamente la potencia nominal del motor (97%).
- El rizado de la corriente es menor y ejerce menos efecto en la conmutación y en las pérdidas por corrientes de Eddy.
- El puente rectificador puede servir para alimentar al devanado de campo.
- El porcentaje de regulación de velocidad es menor en casi un 50 %.

4.4.4. Desventajas:

- Este tipo de circuito es más costoso, pero técnicamente permite aprovechar mejor la capacidad del motor.

Por lo tanto, los dispositivos de mando de rectificación monofásica de onda completa pueden ser utilizados

en motores c.c. de 3.00 Kw de potencia, con relativa facilidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Después de analizar el comportamiento del motor c.c. alimentado con tensión alterna monofásica de media onda y onda completa, con las limitaciones respectivas para cada uno de los casos, se puede concluir lo siguiente:

- El comportamiento característico de las fuentes de corriente alterna rectificadas difiere de las fuentes de poder rotativas en varios aspectos.

En las fuentes estáticas aparece un rizado en el voltaje de salida que depende del número de fases de la fuente alterna a rectificarse, del tipo de montaje (media - onda u onda completa), del ángulo de retardo y en menor grado de la carga del motor.

- La magnitud del rizado de la corriente produce efectos adversos en el comportamiento del motor, tales como: gran generación de corrientes de Eddy, disminución de la capacidad de conmutación y aumento del calentamiento.

Luego para mejorar el comportamiento del motor se debería:

- Usar un mayor número de fases y/o escoger la distribución de diodos y tiristores más convenientes para producir menos rizado.
- Introducir una inductancia adecuada en el circuito de armadura para minimizar el contenido de rizado, aunque esto represente la necesidad de un espacio físico adicional, un aumento de pérdidas, de calentamiento y de la constante de tiempo de la armadura (τ_m).
- Mejorar la capacidad de conmutación, para lo cual se construye la estructura y los interpolos del motor con chapas de acero laminado de manera similar a la de los motores c. a., a fin de disminuir notablemente las corrientes de Eddy. Con el uso del núcleo laminado se puede obviar el

reactor y el motor puede funcionar con cualquier tipo de montaje de rectificación.

- El montaje rectificador de onda completa desde fuente alterna monofásica puede ser empleado con motores c.c. de hasta 3 Kw máximo.
- El montaje rectificador de media onda desde fuente alterna monofásica puede ser utilizado para motores c.c. de máximo 0.75 Kw.
- El comportamiento de motores de tipo convencional es diferente cuando funcionan con fuentes alternas rectificadas, que cuando lo hacen con alimentación de corriente continúa.

RECOMENDACIONES

- Hacer el estudio de los motores c.c., alimentado por - fuentes de poder estáticas con máquinas apropiadas para ello, ya que este estudio se realizó con motores convencionales, donde los resultados obtenidos no corresponden

a una utilización industrial exacta.

- Desarrollar un modelo matemático para analizar el comportamiento del motor c.c. alimentado con fuentes de poder estáticas.

- Realizar un estudio comparativo con otros circuitos de rectificación de onda completa que utilicen fuentes de corriente alterna monofásicas, con el fin de lograr una optimización del comportamiento de las máquinas c.c. en tales condiciones.

- Hacer un análisis comparativo de los comportamientos de los motores c.c., cuando trabajan con fuentes c.a., monofásicas y trifásicas rectificadas.

- Trabajar con montajes monofásicos y trifásicos realimentados.

NOMENCLATURA

$E =$	fuerza contra electromotriz del motor c.c. f.c.e.m.
$N =$	Número de conductores uniformemente distribuidos sobre la periferia del inducido.
$\phi =$	Flujo de cada polo
$p =$	número de pares de polos
$a =$	número de pares de ramales en paralelo de los conductores del inducido.
$n =$	Velocidad a la cual gira el inducido r.p.m.
$I =$	Corriente de armadura del motor
$r_a =$	Resistencia del inducido
$U =$	Voltaje de suministro
$C_m =$	Par motor
$C_r =$	Par resistente
$\eta =$	Rendimiento del motor
$P_e =$	Potencia de entrada
$P_s =$	Potencia de Salida

P_p	=	Pérdidas
ω	=	Velocidad angular
γ	=	Angulo durante el cual el tiristor es conductor (ángulo de conducción).
U_{BO}	=	Tensión de ruptura del tiristor en sentido directo.
U_T	=	Tensión de conducción del tiristor
I_h	=	Corriente de mantenimiento del tiristor
U_{BB}	=	Tensión interbase en el UJT.
U_e	=	Voltaje en el cátodo del diodo emisor del UJT
η	=	Relación intrínseca del UJT
U_E	=	Voltaje de emisor
U_p	=	Voltaje de disparo de pico
U_D	=	Caída de voltaje en el diodo emisor del UJT
U_v	=	Voltaje de Valle
I_v	=	Corriente de Valle

$I_p =$	Corriente de pico al momento de aplicar U_p
$t_e =$	Constante de tiempo de carga del condensador en el circuito de puerta.
$I_d =$	Corriente de tiempo de descarga del condensador en el circuito de puerta.
$U_z =$	Voltaje de Zenner
$I_z =$	Corriente de Zenner
$P_z =$	Potencia de Zenner
$U_{prom} =$	Voltaje promedio de la fuente de suministro al motor.
$U_{m\acute{a}x} =$	Voltaje pico de la fuente de suministro al motor.
$i =$	Corriente instantánea de armadura del motor.
$z =$	Impedancia c.a. de armadura
$\theta =$	Angulo de la impedancia c.a. de armadura
$f =$	Frecuencia del voltaje de alimentación
$\emptyset =$	Angulo de disparo del tiristor
$A =$	Coefficiente de la corriente exponencial de armadura y que depende de las condiciones iniciales.

$\tau_m =$ Constante de tiempo de armadura

$L =$ Inductancia de Armadura

$I_R =$ Corriente de armadura rectificadora

$I_{m\acute{a}x} =$ Corriente pico de armadura

BIBLIOGRAFIA

1. MICHAEL LIWSCHITZ - GARIK, Máquinas de Corriente Contínua, CEGSA BARCELONA, 1972.
2. CHARLES SISKIND, Máquinas de Corriente Contínua , HASA, Buenos - Aires, 1967.
3. FITZGERALD, KINSLEY, KUSKO, Electric Machinery Mac Graw - Hill Ja pón, 1971.
4. GUILLERMO HERRANZ ACERO, Máquinas Eléctricas Departamento de Pu- blicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación, Madrid, 1978.
5. A. LANGSDORF, Principio de Máquinas de Corriente Contínua, Mc Graw- Hill, México, 1971.
6. PETER C. BELL, Electromechanical Prime Movers: Electric Motors. Mac Millan, Londres, 1972.
7. E. LISTER, Máquinas y Circuitos Eléctricos, Mc.Graw-Hill, México, 1976.

8. M.G. SAY, E.O. TAYLOR, Direct Current Machines, Pitman Londres, 1980.
9. I.L. KOSOW, Control de Máquinas Eléctricas, Reverté, Barcelona, 1979.
10. R. RAMSHAW, Electrónica de Potencia, Marcombo, Barcelona, 1977.
11. H. LILEN, Tiristores y Triacs, Marcombo, Barcelona, 1974.
12. K. HEUMANN, Fundamentos de la Electrónica de Potencia, Paraninfo Madrid, 1978.
13. R.M. DUNAISKI, The effect of Rectifier Power Supply on Large D.C. Motors. Trans. AIER, Pt III, Vol 79, pp 253-259, Junio, 1970.
14. N. KAUFMAN, "An Application guide for the use of motors of rectified power". AIEE Trans, Power APP. Systems, pp 1006 - 1009, Octubre, 1964.
15. C.E. ROBINSON, Redesign of D.C. Motors for Applications with Thyristor Power Supplies" IEEE Trans. Ind. and Gen. Appl., Vol. Iga-4 , N° 5, pp. 508-514, septiembre/ octubre, 1968.

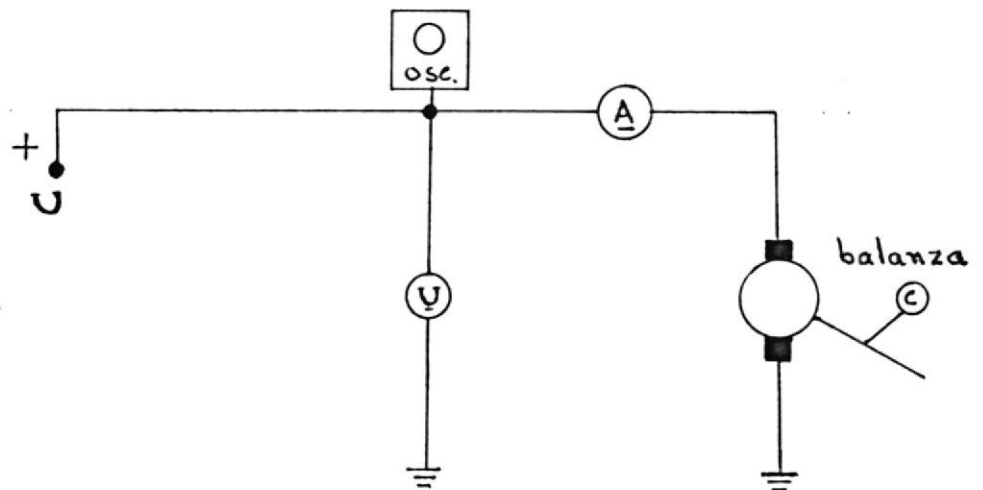
16. C.W. LANDER, Power Electronics, Mc Graw Hill, Michigan, 1981.

17. POWER SEMICONDUCTOR CIRCUITS S.B. Dewan, John Willey and Sons.
USA.

ANEXOS

ANEXO N° 1

RELACION DE UNIDADES



Potencia de entrada (P_e) = Voltaje de suministro (U).Corriente (A)

Vatios = Voltios . amperios.

Potencia de salida (P_s) = Par motor (C_m) Velocidad angular (ω)

Vatios = K (lb.pie. $\frac{\text{radianes}}{\text{segundo}}$)

K = constante de proporcionalidad

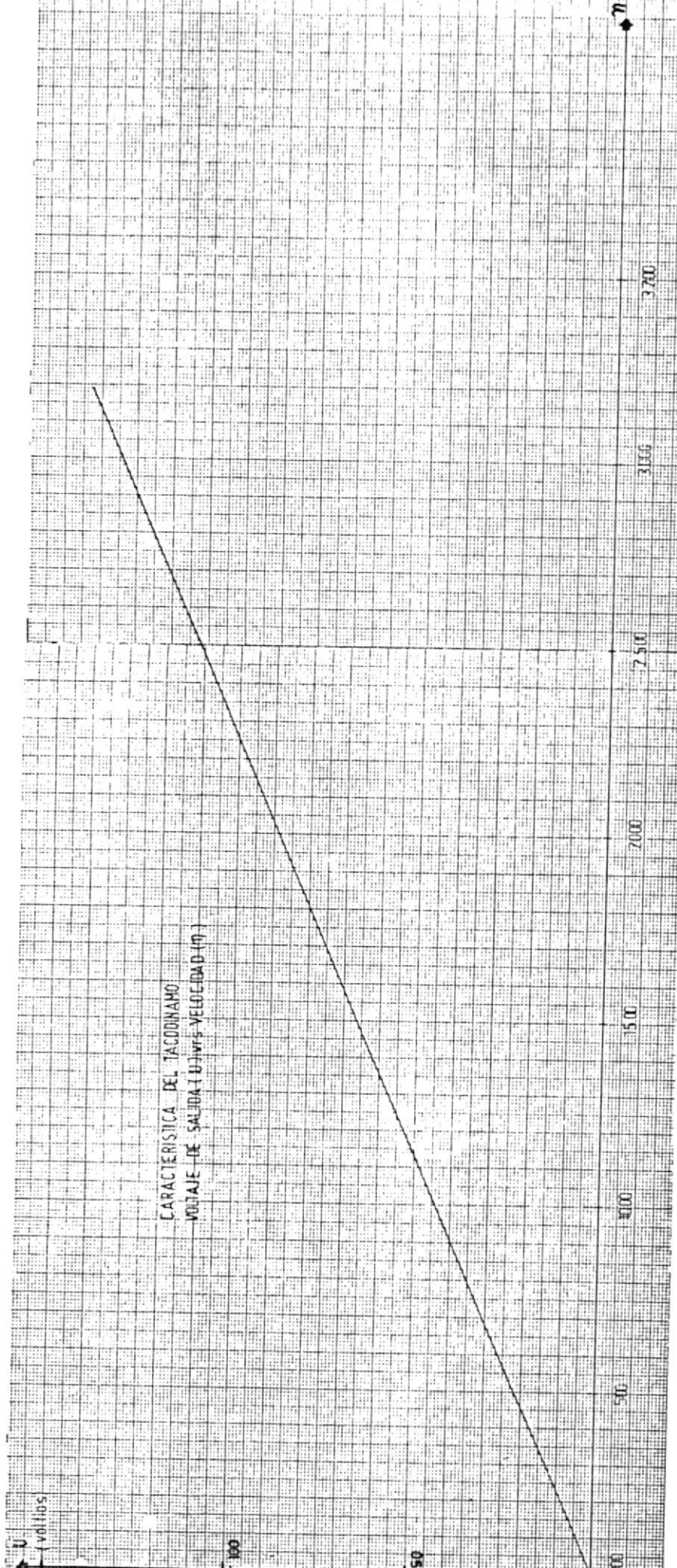
$$P_s = \frac{\text{kilogramo} \cdot \text{metro}}{\text{segundo}} = \text{vatio}$$

$$P_s = \left\{ \frac{9.81}{(2.20)(3.30)} \right\} \left\{ \frac{\text{lb. pie}}{\text{seg.}} \right\} =$$

$$P_s = 1.34 \left\{ \frac{\text{lb-pie}}{\text{seg}} \right\} = \text{vatios}$$

$$\text{Velocidad Angular } \{\omega\} = \frac{2 \pi}{60} n \left\{ \frac{\text{radianes}}{\text{segundo}} \right\}$$

n = velocidad en r.p.m.

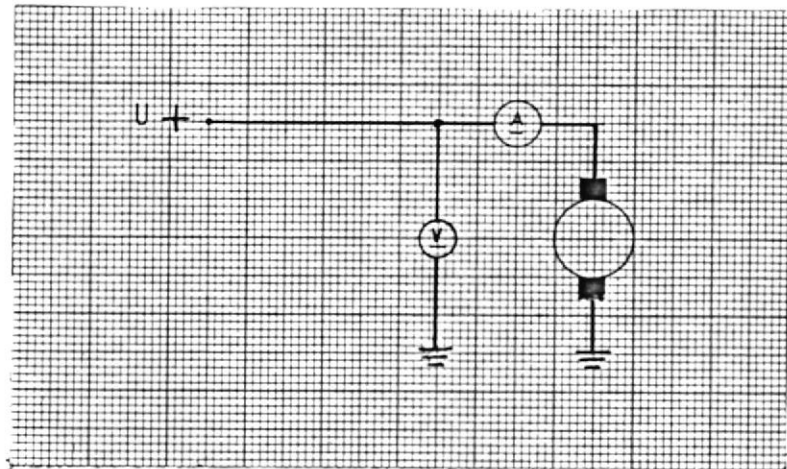


CARACTERÍSTICA DEL TACÓDINAMO
 VOLTAJE DE SALIDA (U) vs VELOCIDAD (n)

ANEXO N°3

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE ARMADURA

Para obtener el valor de la resistencia de armadura (r_a), se procedió a hacerlo por el método de alimentación por corriente con t́nua como lo indica la figura.



VOLTIOS	CORRIENTE	RESISTENCIA (r_a)
2.30	4.13	0.56
2.51	3.74	0.67
2.46	3.86	0.64
2.54	3.78	0.67
2.42	3.99	0.61
2.44	3.95	0.62
2.40	4.05	0.59
2.36	4.08	0.58

$$r_a \text{ promedio} = 0.62 \, \Omega$$

$$r_{75^\circ} = r_a (1 + \alpha \Delta t)$$

$$\alpha = \frac{1}{T_0 + t_1}$$

$$t_1 = 30^\circ$$

$$T_0 = 234.5$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 75 - 30 = 45^\circ$$

$$\alpha = 0.0038$$

$$r_{a75^\circ} = 0.725 \Omega$$

ANEXO N° 4

OBTENCION DEL VALOR DE LA INDUCTANCIA DE ARMADURA

Para la obtención de la inductancia (L_a) de armadura, se procedió de la siguiente forma:

1. Se hizo conexiones para hacer trabajar la máquina universal como motor d.c. excitación independiente.
2. Se conectó a la armadura del dinamómetro el medidor de inductanancias.
3. Se hizo girar el dinamómetro a una velocidad entre 100 y 150 r. p.m.
4. El valor de la inductancia salió 19 milíhenrios, en el RLC Digibridge GR 1657.

ANEXO N°5

METODO EMPLEADO PARA ENCONTRAR EL VALOR DE LA CORRIENTE EN EL MOTOR C.C. EN EL INSTANTE DE ARRANQUE, CUANDO SE UTILIZA EL MONTAJE DE RECTIFICACION DE MEDIA ONDA.

Como en el momento del arranque del motor no existe la f.c.e.m., entonces, el circuito equivalente del mismo es el que corresponde a la figura N° 20.

$$u_L + u_r = u(t)$$

$$L \frac{di}{dt} + r_a i = \sqrt{2} U \text{ Sen } \omega t = U_{\text{máx}} \text{ Sen } \omega t$$

cuya solución es la siguiente:

$$i(t) = \frac{U_{\text{máx}}}{Z} \text{ Sen } (\omega t - \theta) + A e^{-\left(\frac{r_a}{L}\right)t} \quad (1)$$

donde:

θ : ángulo de la impedancia en c.a.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{r_a} = 84.22^\circ \text{ y}$$

A depende de las condiciones iniciales, sustituyendo las condiciones iniciales en la ecuación (1) , para $i = 0$ se tiene:

$\omega t = \emptyset$ y:

$$i = \frac{U_{\text{máx}}}{Z} \left\{ \text{Sen}(\omega t - \theta) - \text{Sen}(\emptyset - \theta) e^{\left(\frac{r_a}{L}\right) \left(\frac{\emptyset - \omega t}{\omega}\right)} \right\} \quad (2)$$

Cuando $\omega t = \beta$, $i(t)$ es otra vez = 0 y de (2):

$$\text{Sen}(\beta - \theta) = \text{Sen}(\emptyset - \theta) e^{\left(\frac{r_a}{L}\right) \left(\frac{\emptyset - \beta}{\omega}\right)} \quad (3)$$

β puede ser determinada por la solución de esta ecuación trascendental.

Como:

$$\gamma = \beta - \emptyset \quad \text{radianes} \quad (4)$$

Una familia de curvas de γ Vrs. \emptyset para varios valores de θ se la obtiene de las ecuaciones (3) y (4). Figura N° 26.

La solución de la ecuación (3) se la realiza por medio del método -

Newton's, método numérico para $f(x) = 0$. Figura N° 27. Este método emplea la siguiente fórmula para generar la solución por aproximación.

$$X_{i+1} = X_i - \frac{f(X_i)}{f'(X_i)}$$

Por medio de una calculadora Hewlett Packard (HP29C) se elabora un programa el cual hace una aproximación numérica de la derivada $f'(X)$ dada por la siguiente ecuación :

$$X_{i+1} = X_i - \delta_i \left\{ \frac{f(X_i + \delta_i)}{f(X_i)} - 1 \right\}^{-1}$$

Donde:

$$\delta_i = 10^{-5} X_i$$

Para introducir el programa colocamos el selector en {PRM }

FIGURA N° 26
 RELACION γ Vs. ϕ

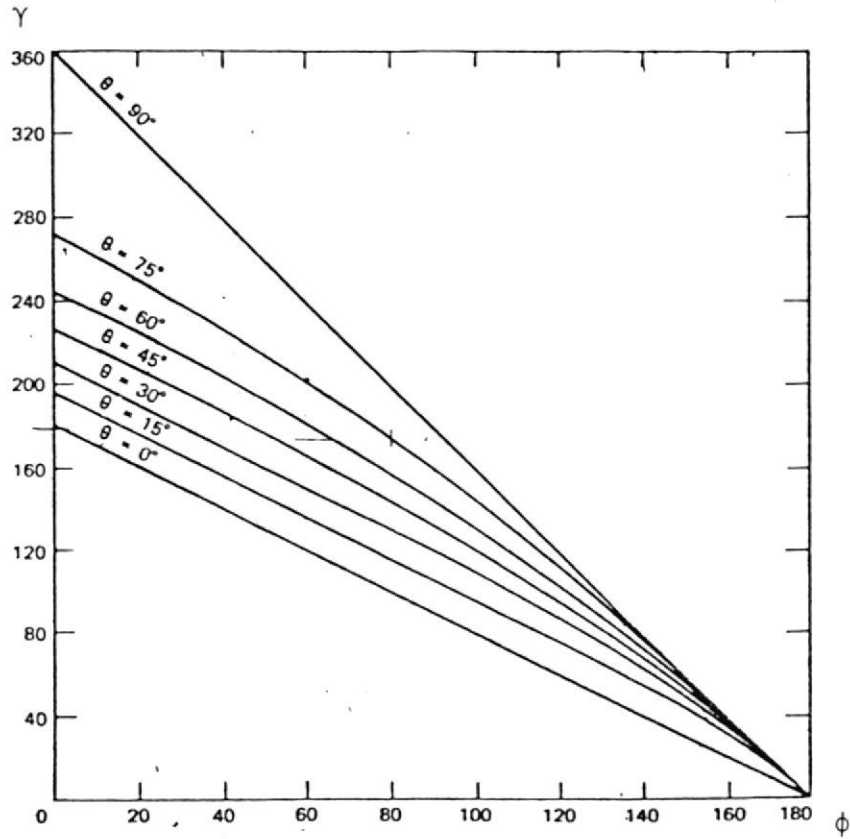
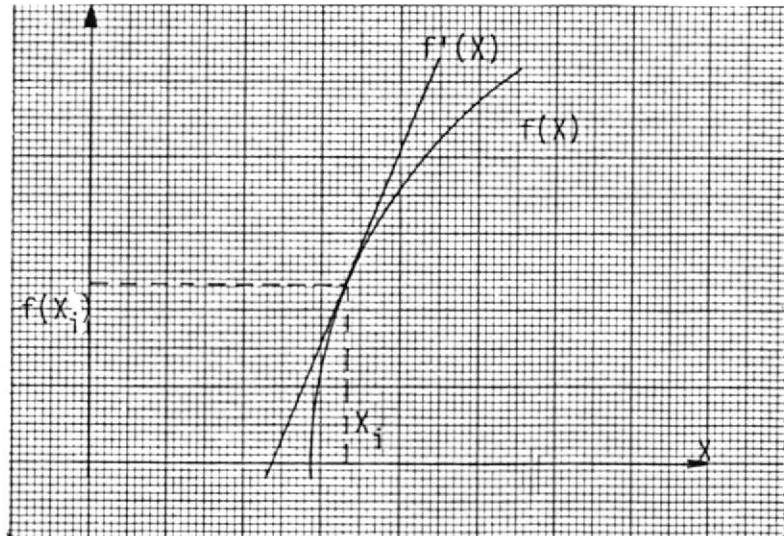


FIGURA N° 27
 FUNCION $f(x) = 0$



01	LBL 1	-----	
02	STO 2		
03	X \leftrightarrow Y		
04	STO 1	-----	ALMACENA X, ϵ
05	LBL 8		
06	CLX		
07	STO 0		
08	RCL 1		PONE BANDERA A CERRO PARA f(X).
09	GTO 0	-----	
10	LBL 6		
11	R \downarrow		
12	STO 4		
13	1		
14	STO 0		
15	RCL 1		
16	RCL 1		
17	EEX		
18	5		ALMACENA f(X) Y CALCULA δ .
19	\div		
20	STO 3	-----	
21	+		
22	LBL 0	\rightarrow	f(X)
23	LBL 7		
24	X = 0		
25	GTO 9		
26	RCL 0		

```

27      X = 0
28      GTO 6
29      R↓
30      RCL 4
31      ÷
32      1
33      -
34      1/X
35      RCL 3
36      X
37      STO - 1
38      ABS
39      RCL 2
40      X ↔ Y
41      X > Y
42      GTO 8 -----
43      LBL 9
44      RCL 1
45      RTN -----

```

CALCULAR X_{i+1} , X_i

$(X_{i+1} - X_i) > \epsilon?$

SALIDA

Introducir la función que se desea resolver (encontrar su raíz), se coloca el selector en (RUN) entonces se digita GTO 0.

Luego se cambia el selector a (PRM) y se introduce la función.

$$\text{Sen } (\beta - \theta) - \text{Sen } (\theta - \beta) e^{\left(\frac{\theta - \beta}{\text{Tan}\theta}\right)} = 0$$

STO 6

RCL 5

-

f Sen

RCL 9

RCL 6

-

180

÷

π

X

RCL 5

f tan

÷

e^x

RCL 9

RCL 5

-

f Sen

X

-

Nuevamente se coloca el selector en (RUN) y se introduce:

STO 5	θ	(grados)
STO 9	\emptyset	(grados)
β	β	valor estimado
ENTER		
10^{-2}		error
GSB 1		

Con esto se obtiene valores de β para distintos valores de \emptyset , tabla N° 19 y la curva γ Vrs. \emptyset para su valor $\theta = 84,22$. Curva N° 47.

Con los valores de γ para cada ángulo de disparo \emptyset se obtienen los límites de la integración que permiten encontrar los valores de la corriente promedio rectificadora.

Cuya expresión viene dada por:

$$I_R = \frac{I_{\text{máx}}}{2\pi} \int_{\emptyset}^{\emptyset+\gamma} \left\{ \text{Sen}(\omega t - 0) - \text{Sen}(\emptyset - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right) \left(\frac{\emptyset - \omega t}{\omega}\right)} \right\} d\{\omega t\}$$

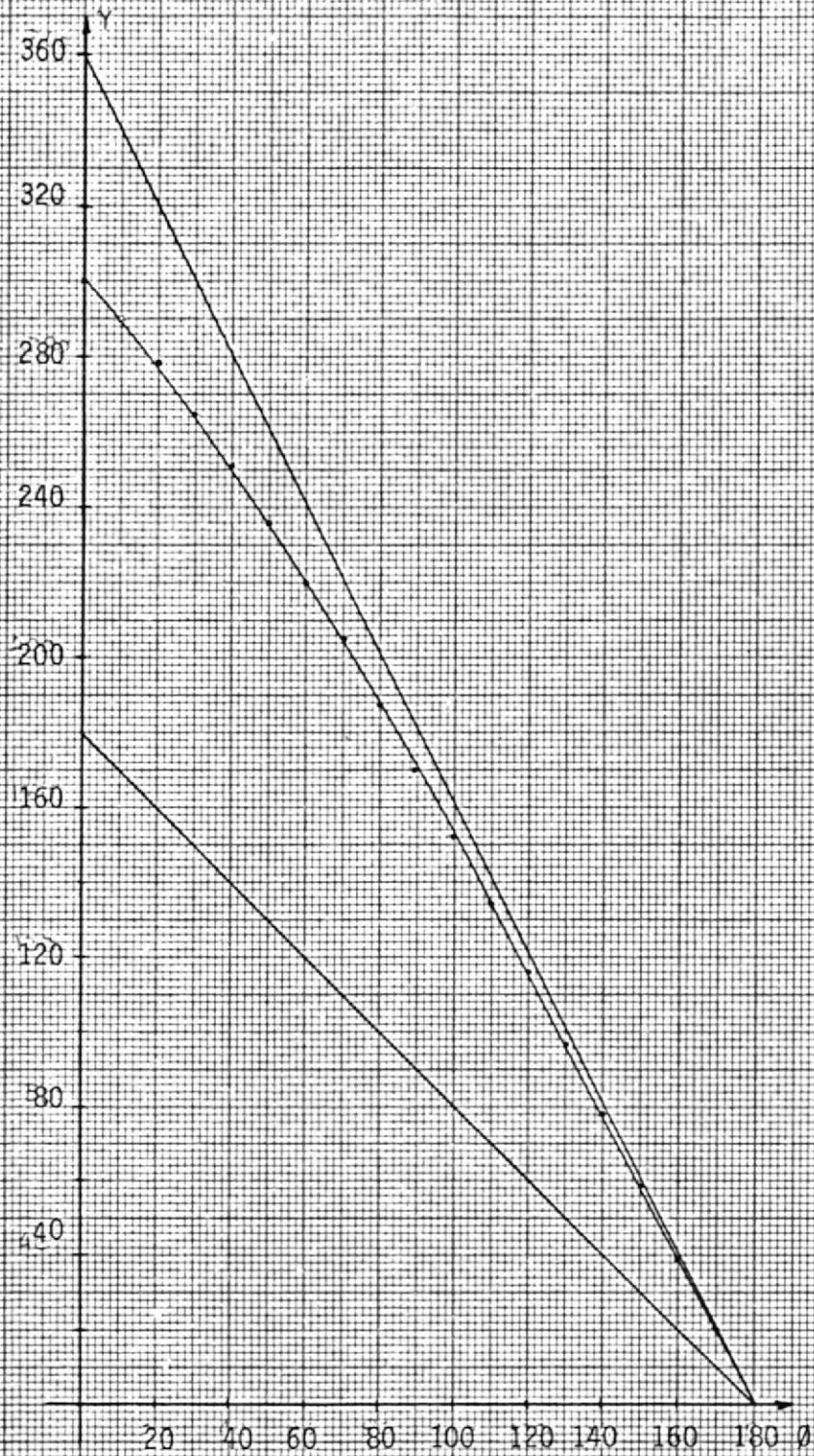
TABLA N° 19
VALORES DE γ EN FUNCION DE ϕ Y β

ϕ	β	γ
0	300.06	300.06
10	299.47	289.47
20	297.47	277.68
30	294.76	264.76
40	290.82	250.82
50	285.98	235.98
60	280.36	220.36
70	274.08	204.08
80	267.25	187.25
90	259.94	169.94
100	252.23	152.23
110	244.15	134.15
120	235.76	115.76
130	227.08	97.08
140	218.14	78.14
150	208.96	58.96
160	199.54	39.54
170	189.88	19.88
180	180.01	0.01

...

CURVA N° 47

ANGULO DE CONDUCCION (γ) Vs. ANGULO DE DISPARO (ϕ)



haciendo $\omega t = \alpha$

$$I_R = \frac{I_{\text{máx}}}{2\pi} \int_{\phi}^{\phi + \gamma} \text{Sen}(\alpha - \theta) - \text{Sen}(\phi - \theta) e^{\left(\frac{\phi - \alpha}{\tan\theta}\right)} d\alpha \quad (5)$$

Resolviendo la ecuación (5) y haciendo:

$$\frac{I_{\text{máx}}}{2\pi} = I_{\text{base}}$$

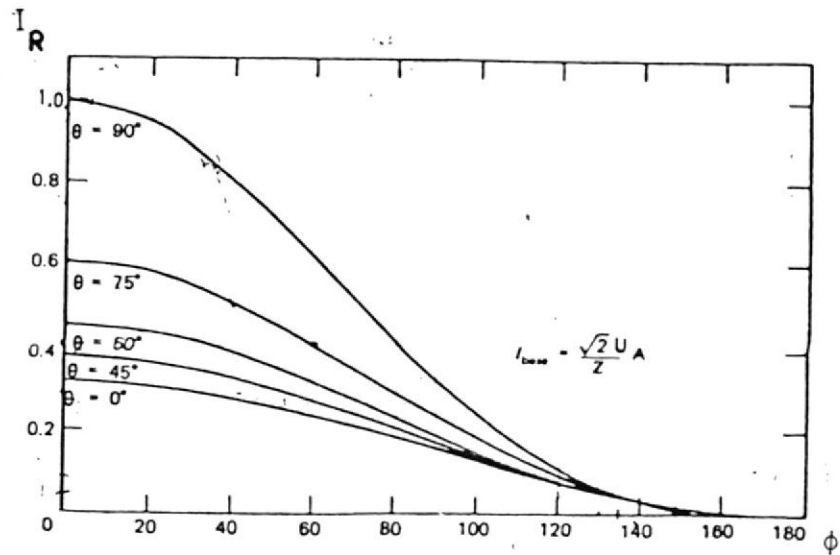
Se obtiene una familia de curvas I_R Vrs. ϕ para varios valores de θ . Figura N° 28.

Para resolver la ecuación (5) se usa el método de integración numérica de Simpson's.

Si se conoce una función explícita para $f(X)$, la función puede ser introducida en la memoria del programa e integrada numericamente.

FIGURA N° 28

FAMILIA DE CURVAS I_R Vrs. ϕ



PROGRAMA

01	LBL 7
02	RCL 4
03	X
04	X \leftrightarrow Y
05	RTN
06	LBL 6
07	ENTER \uparrow
08	+
09	STO + 0
10	RTN
11	LBL 3
12	STO 3
13	R \downarrow
14	STO 2
15	R \downarrow
16	STO 1
17	GSB 0
18	STO 0
19	RCL 2
20	GSB 0
21	STO + 0
22	RCL 2
23	RCL 1
24	STO 5
25	-
26	RCL 3
27	\div
28	STO 4

29	0
30	STO 9
31	LBL 8
32	GSB 4
33	STO + 0
34	2
35	STO + 9
36	RCL 3
37	RCL 9
38	X \leftrightarrow Y
39	GTO 5
40	GSB 4
41	GTO 8
42	LBL 4
43	RCL 4
44	STO + 5
45	RCL 5
46	GSB 0
47	GSB 6
48	RTN
49	LBL 5
50	3
51	RCL 0
52	GTO 7
53	LBL 0
54	RTN
55	
56	
57	

la funcion $f(x)$ que se va a integrar:

```
g RAD
STO 7
RCL 6
-
f SEN
RCL 1
RCL 7
-
RCL 6
f TAN
÷
e*
RCL 1
RCL 6
-
f SEN
X
-
2
÷
π
÷
g DEG
LBL 1
RCL .5
X
X → Y
RCL .5
X
```

X → Y
16
GT0 3

ST0.5 → $\pi/180$
ST0 6 → θ entra en radianes
 ϕ → en grados
ENTER
 β → en grados
GSB 1

El resultado de I_R está dado en fracción de $I_{m\acute{a}x}$. Tabla N° 20 y el resultado de la relación entre el ángulo ϕ y I_R en la curva N° 48.

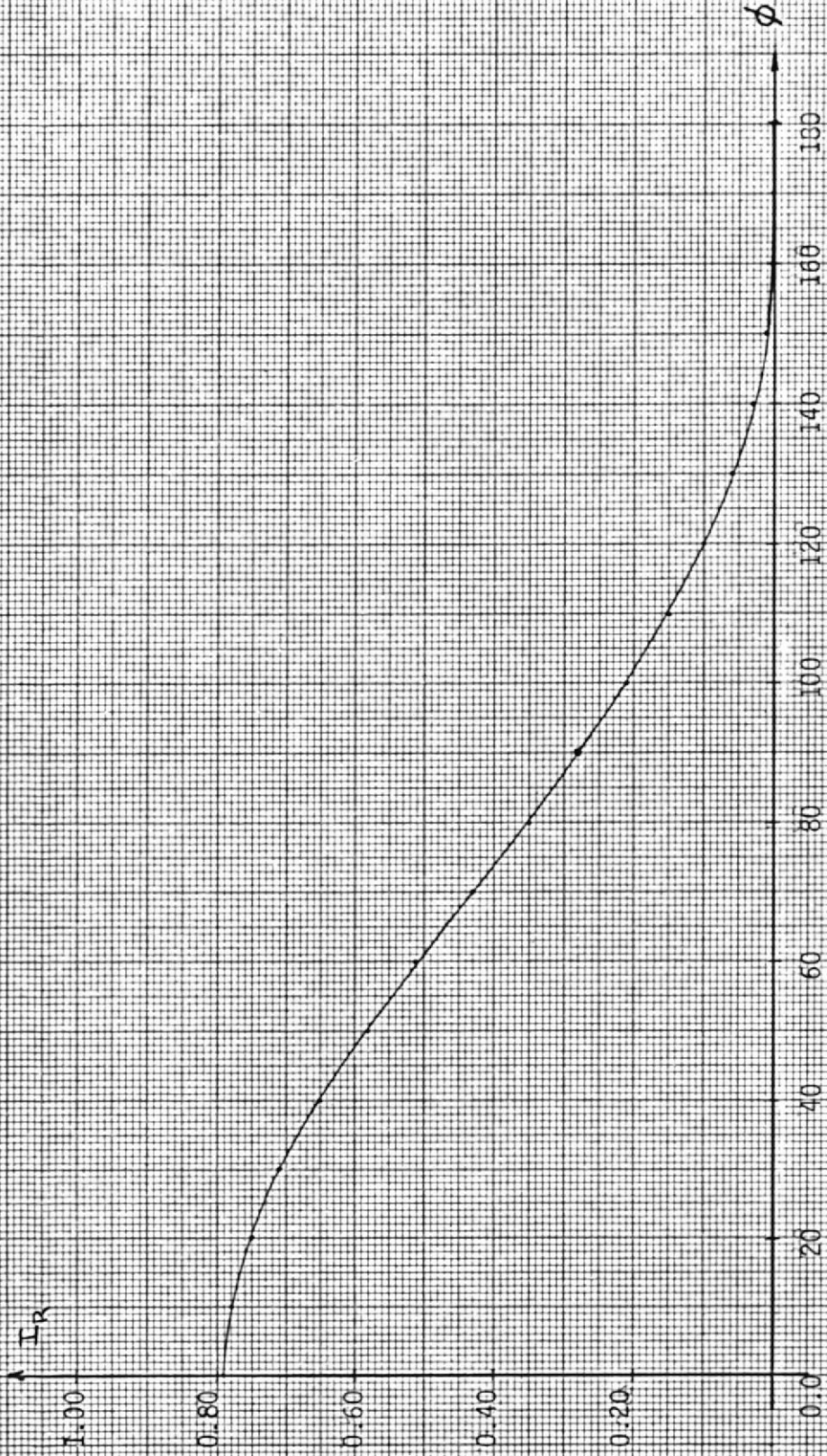
TABLA N° 20

ϕ	I_R
0	0.79
10	0.78
20	0.75
30	0.71
40	0.65
50	0.58

60	0.51
70	0.43
80	0.35
90	0.28
100	0.21
110	0.15
120	0.10
130	0.06
140	0.03
150	0.01
160	4.33×10^{-3}
170	5.55×10^{-4}
180	0

CURVA N° 48

ANGULO DE DISPARO (ϕ) Vrs. CORRIENTE PROMEDIO RECTIFICADA (I_R)



ANEXO N° 6

METODO EMPLEADO PARA ENCONTRAR EL VALOR DE LA CORRIENTE DEL MOTOR EN EL INSTANTE DEL ARRANQUE, CUANDO SE UTILIZA EL MONTAJE DE RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA.

Tenemos que:

$$m = \frac{E}{\sqrt{2} U}$$

Según la figura N° 28, cuando $\theta = 84.22^\circ$ y $m = 0$ se asume - que en el instante del arranque del motor cuando $\phi = 90^\circ$ y 120° la corriente es discontinua y cuando $\phi = 0^\circ, 30^\circ$ y 60° es continua.

La expresión del voltaje de suministro promedio cuando la corriente es continua es:

$$U_R = \frac{1}{\pi} \int_{\phi}^{\pi} U_{\text{máx}} \text{Sen } \omega t \, d(\omega t) =$$
$$U_R = U_{\text{máx}} \left(\frac{1 + \text{Cos } \phi}{\pi} \right)$$

y la corriente promedio rectificadora es:

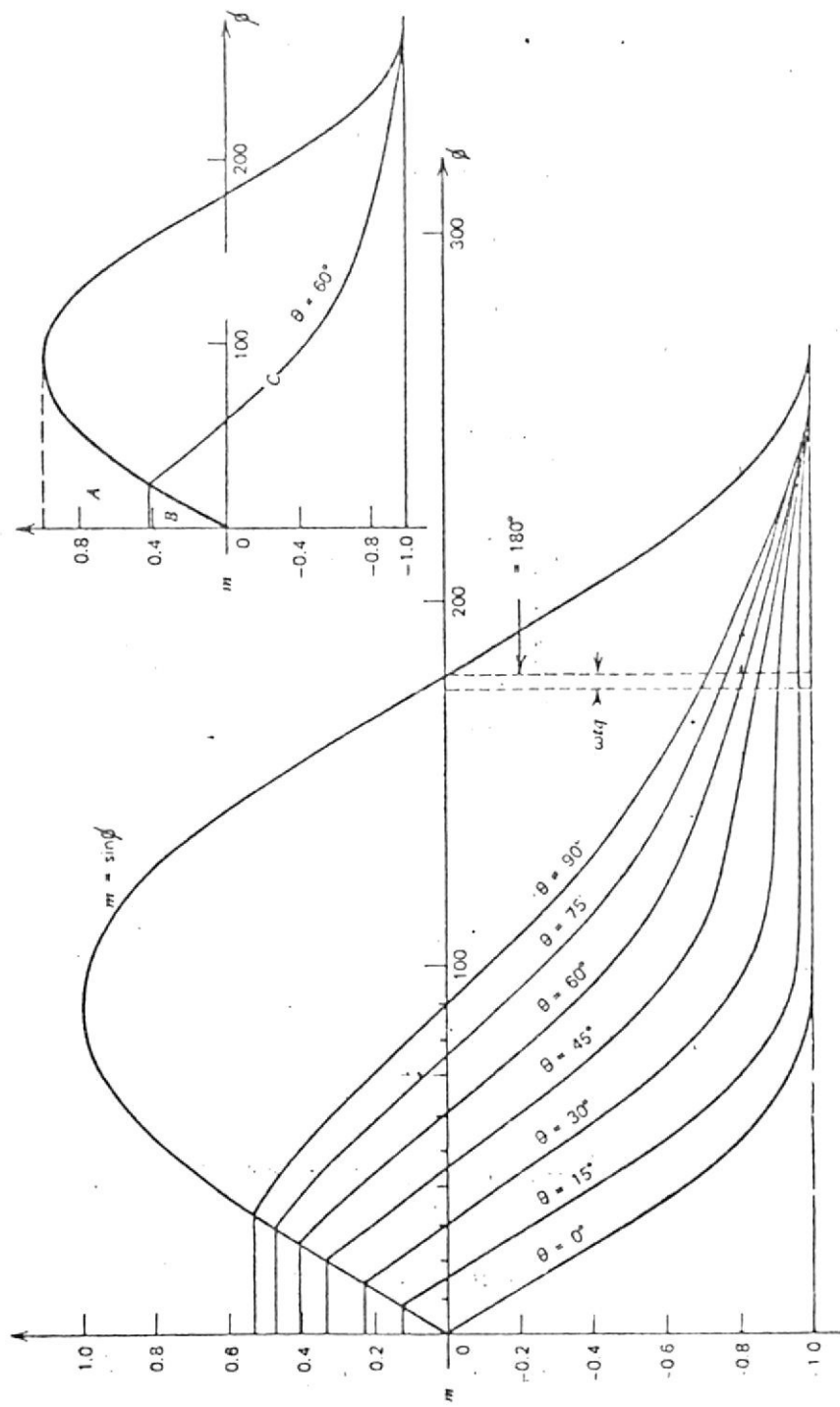
$$I_R = \frac{U_R - E}{r_a} = I_{\text{máx}} \left(\frac{1 + \text{Cos } \emptyset}{\pi} \right)$$

Cuando la corriente es discontinua toma una forma muy similar al de rectificación de media onda y su valor es - dos veces. Valores que se los obtiene de la curva N° 48.

Nota: Por estar muy cerca el valor de θ a los 90° y - cuando se trabaja con $\emptyset = 90^\circ$ se puede llegar a conside- rar como estado de continuidad.

FIGURA N° 29

DIAGRAMA DE OPERACION DE UN CIRCUITO RL CON f.c.e.m. CON RECTIFICACION DE ONDA COMPLETA DE UNA FUENTE ALTERNA MONOFASICA.



ANEXO N° 7

MAQUINA HAMPDEN SERIE N° 52128/6

DINAMOMETRO

PRUEBA DE VACIO

U_o (V)	I_f (A)
7.00	0.00
24.00	0.08
26.00	0.09
44.00	0.15
50.00	0.18
62.00	0.22
69.00	0.26
72.00	0.27
82.00	0.33
87.00	0.36
92.00	0.40
100.00	0.47
101.00	0.48
106.00	0.55
108.00	0.57
112.00	0.64
114.00	0.68
117.00	0.73
120.00	0.79
122.00	0.86
123.00	0.89
124.00	0.90
125.00	0.92

FIGURA DEL ANEXO N° 7

