

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**"SIMULACION DIGITAL DE CONTROL DE MAQUINA D.C.
EN CUATRO CUADRANTES"**

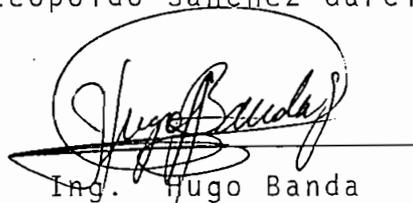
**TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN
ELECTRONICA Y CONTROL**

LEOPOLDO SANCHEZ GARCIA



QUITO, ABRIL DE 1985

Certifico que el presente
trabajo ha sido elaborado
en su totalidad por el Sr.
Leopoldo Sánchez García.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Hugo Banda", is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Ing. Hugo Banda

DIRECTOR

D E D I C A T O R I A

A mis padres, por sus
esfuerzos y ejemplos.

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

A todas y cada una de las personas que con su ayuda y colaboración permitieron la culminación de este trabajo y, en forma muy especial a los ingenieros Hugo Banda y Nicolás Martínez por su valiosa orientación, mi más sincero agradecimiento.

I N D I C E

Pág.

INTRODUCCION

CAPITULO I : CONTROL DE GIRO Y FRENADO DE LA MAQUINA D.C.

1.1.	Cambio de Giro de la Máquina D.C.	1
1.2.	Frenado de la Máquina D.C.	3
1.2.1.	Frenado Externo	4
1.2.2.	Frenado Interno	4
1.3.	Método y Sistemas para la Inversión de Giro ...	5
1.3.1.	Sistema Mecánico	6
1.3.2.	Sistemas Electrónicos	7
1.4.	Método y Sistemas para el Frenado de la Máquina D.C.	8
1.4.1.	Frenado Dinámico	8
1.4.2.	Frenado Regenerativo	11
1.4.3.	Frenado por Contra Corriente	14

CAPITULO II : CONTROL EN UNO, DOS Y CUATRO CUADRANTES

2.1.	Definición de Cuadrantes	17
2.2.	Diagramas Torque-Velocidad para un Motor Controlado en Cuatro Cuadrantes	22
2.3.	Modos de Operación en una Máquina D.C. Controlada en Cuatro Cuadrantes	26
2.4.	Métodos y Sistemas para el Control de Cuatro Cuadrantes	32

2.4.1.	Inversión de Inducido	33
2.4.2.	Inversión de Campo	34
2.4.3.	Control con Doble Puente en el Inducido	36

CAPITULO III : PROGRAMA DE LA SIMULACION DIGITAL

40

3.1.	Generalidades	40
3.2.	Programa Principal	41
3.3.	Selección de Trabajo	44
3.4.	Fuentes de Alimentación	52
3.4.1.	COND2TP	52
3.4.2.	COND3MO	58
3.4.3.	COND3TP	59
3.5.	Motor D.C.	59
3.5.1.	Motor1	59
3.5.2.	Motor2	63
3.5.3.	Motor3	64
3.5.4.	Motor4	66

CAPITULO IV : PRUEBAS EXPERIMENTALES Y COM-
PROBACION DE RESULTADOS

68

4.1.	Arranque	69
4.1.1.	Arranque con cualquier ángulo fijo	69
4.1.2.	Arranque con cambio de ángulo durante el proce- so	76
4.2.	Estado Estable	81
4.3.	Perturbaciones	87

4.3.1.	Perturbación con un Cambio en el Angulo de Activado	87
4.3.2.	Perturbación en el Torque de Carga	92
4.4.	Paradas	96
4.5.	Inversión de Giro	104
4.6.	Comentarios y Conclusiones	108
	 BIBLIOGRAFIA	 111
	 APENDICE A : LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA, SUS CARACTERISTICAS Y PARAMETROS.	 A1
A.1.	Modelo Matemático de la Máquina D.C.	A1
A.2.	Características de la Máquina D.C.	A4
A.2.1.	Curva de Magnetización e Inclusión de la Saturación Magnética	A4
A.2.2.	Característica Torque de Carga-Velocidad	A8
A.3.	Parámetros de la Máquina D.C.	A11
A.3.1.	Método para Calcular R_a	A12
A.3.2.	Método para Calcular L_a	A12
	 APENDICE B : CIRCUITO EXPERIMENTAL	 B1
B.1.	Circuito de Disparo	B1
B.2.	Circuito de Fuerza	B8
	 APENDICE C : MANUAL DE USO DEL PROGRAMA	 C1
	 APENDICE D : LISTADO DEL PROGRAMA.....	 D1

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

Como es conocido, el gran desarrollo que tienen los circuitos conversores estáticos, para el control de máquinas eléctricas, ha hecho que se dedique gran esfuerzo humano para la investigación y perfeccionamiento de los mismos. Por éste motivo, se tiene que el presente trabajo, ha sido realizado para profundizar y continuar estudios anteriores, específicamente el realizado por el Ing. Nicolás Martínez, en su tesis "Modelación Digital de una Máquina de Corriente Continua Alimentada por Circuitos a Tiristores", para de ésta forma poder analizar por medio de un programa digital, el comportamiento dinámico de una máquina D.C. excitada independientemente y alimentada por circuitos conversores AC-DC duales, los mismos que le permiten a la máquina un trabajo en cuatro cuadrantes.

El Capítulo I presenta en su contenido, la teoría sobre el control de giro y frenado de la máquina D.C., así como los métodos utilizados para realizarlos.

Para un mejor entendimiento teórico de lo que ocurre en una máquina D.C., cuando ésta es controlada en cuatro cuadrantes, el Capítulo II presenta la definición de cuadrantes, así como los diagramas torque-velocidad y modos de operación de una máquina D.C. controlada en cuatro cuadrantes, presentando además circuitos prácticos que permiten el trabajo de la máquina en los diferentes cuadrantes.

C A P I T U L O I

CONTROL DE GIRO Y FRENADO DE LA MAQUINA D.C.

1.1 CAMBIO DE GIRO DE LA MAQUINA D.C.-

Para poder describir y entender claramente la dinámica de una máquina de corriente continua en su inversión de giro, es necesario la descripción detallada de los distintos componentes que conforman la máquina.

Por lo tanto presentamos un esquema de un motor de corriente continua en su conexión de excitación independiente, y cuyo modelo matemático se analiza en su plenitud en el Apéndice A presentado al final de éste mismo trabajo.

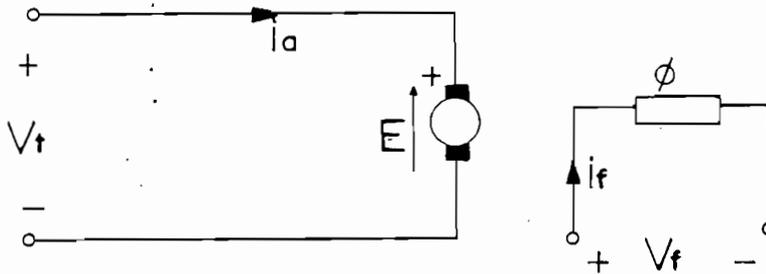


Figura 1.1. MODELO ELEMENTAL DE LA MAQUINA D.C.

donde:

V_t = Voltaje de los terminales de la armadura.

i_a = Corriente a través de la armadura.

E = Voltaje inducido.

V_f = Voltaje de los terminales del campo de excitación.

i_f = Corriente a través del campo.

ϕ = Flujo por polo.

A fin de poder invertir el sentido de giro de cualquier motor D.C., es necesario invertir el sentido de la corriente que circula a través de la armadura (i_a), con respecto al sentido del campo magnético (\emptyset), el mismo que está dado por el sentido de la corriente que circula a través del campo de excitación (i_f).

Por lo tanto, tomando como referencia el esquema presentado en la figura 1.1., el sentido de giro de la máquina puede darse ya sea invirtiendo el voltaje terminal que alimenta a la armadura (V_t) o el voltaje en los terminales del campo de excitación.

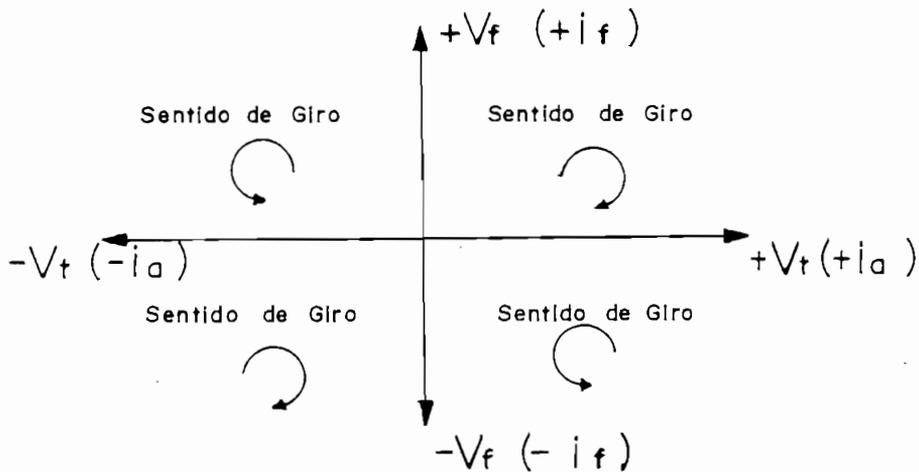


Figura 1.2. DIRECCION DEL GIRO DEL MOTOR DEPENDIENDO DE LA POLARIDAD DEL VOLTAJE (DIRECCION DE CORRIENTE)

La figura 1.2. representa en forma esquemática la dirección de giro que tendría el motor, dependiendo de la polaridad de las fuentes que alimentan a la armadura y al campo de excitación, o lo que es lo mismo dependiendo del sentido de las corrientes que circulan a través de los mismos.

A pesar de que los dos métodos descritos anteriormente para la inversión de giro de una máquina eléctrica son válidos, se elige siempre invertir el circuito de la armadura con referencia al circuito del campo debido a las razones que se presentan a continuación:

- a.- La excitación es un circuito altamente inductivo, por lo tanto, en la inversión se producen transitorios de corrientes muy altos, lo que implica el uso de tiristores de mayor potencia (para controles electrónicos), o el deterioro de los contactos del interruptor (para controles manuales).
- b.- Si el controlador falla ya sea electrónico o manual y el circuito de excitación no se cierra, el motor puede embalsarse, produciendo la destrucción del mismo.

1.2. FRENADO DE LA MAQUINA D.C.-

La función fundamental de cualquier sistema de frenado usado para parar o desacelerar un motor eléctrico, es convertir la energía cinética del rotor y de su carga, en energía calórica, durante el proceso de frenado. Este calor generado que aparece en los bobinados del motor o en los equipos externos de frenado debe ser disipado con ayuda de elementos adicionales que los enfríen, para que aumenten así su vida útil de trabajo.

Los tipos de frenado que se pueden implementar para parar una máquina eléctrica en movimiento se pueden clasificar en dos tipos:

1.2.1. Frenado Externo.-

Son aquellos que usan equipos eléctricos o mecánicos montados en el exterior del motor. Son de éste tipo de frenado los siguientes:

- Freno de fricción con resorte.
- Freno magnético con principio eléctrico.
- Freno de corriente de Eddy.

1.2.2. Frenado Interno.-

Para éste tipo de frenado se usa el bobinado del inducido (en motores D.C.). Son de éste tipo de frenado los siguientes:

- Freno dinámico.
- Freno regenerativo.
- Freno en contra corriente o por inversión.

En el presente trabajo se presta un mayor interés al frenado interno, razón por la cual, haremos una pequeña explicación de cada uno de sus tipos:

a.- Freno Dinámico.-

Se basa en hacer trabajar al motor de corriente continua como generador, de tal forma que la energía mecánica almacenada se disipe através de una carga resistiva. Este tipo de frenado es más efectivo cuando el motor está girando a gran velocidad. Se lo utiliza debido a que los transitorios que se producen en la máquina no son de mucha consideración.

b.- Freno Regenerativo.-

Al igual que para el caso del freno dinámico, es una forma de extraer la energía mecánica en el motor, pero en forma eléctrica, desde los terminales de armadura, en éste caso la energía es devuelta hacia la fuente. Este tipo de frenado es usado en el caso de que el motor esté siendo alimentado por baterías; por otro lado, se tiene que el frenado regenerativo es más rápido que el anterior pero con la desventaja de que producen más transitorios en el sistema.

c.- Freno de Contra Corriente o por Inversión.-

Consiste en introducir en forma transitoria una corriente en sentido contrario a la que estaba circulando por el circuito del inducido, de tal forma que se produzca un torque resistente, de valor lo suficientemente grande que haga parar a la máquina. Este tipo de freno es el más rápido en comparación a los dos explicados anteriormente, pero se debe tener en cuenta de que el torque resistente que se introduce puede resultar lo suficientemente grande como para causar la deformación del eje del rotor.

1.3. METODO Y SISTEMAS PARA LA INVERSION DE GIRO.-

Como se mencionó anteriormente (numeral 1), el método más práctico y usado para la inversión de giro del motor de corriente continua excitado independientemente es el que se basa en el cambio de la tensión que alimenta al circuito del inducido.

Dentro de los sistemas que permiten la inversión de giro se enumera:

1.3.1. Sistema Mecánico.-

En la figura 1.3., se presenta un sencillo esquema, de como poder invertir la polaridad de la fuente de a limentación del circuito del inducido, con la utilizaci ón de un switch.

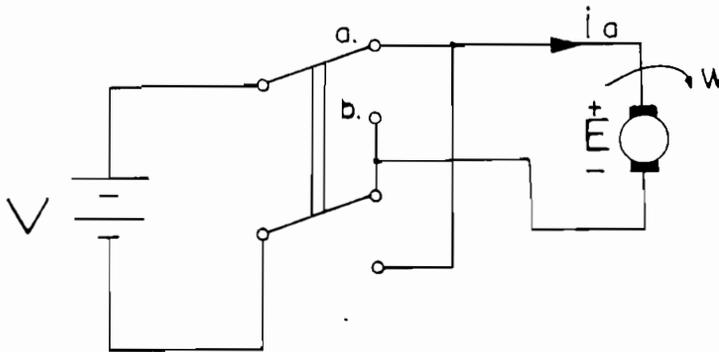


Figura 1.3. INVERSION DE GIRO MECANICO

Con el switch en la posición "a" se tiene un sentido de circulación de la corriente del inducido (i_a) indicado por la flecha y un voltaje inducido con la polaridad indicada en la figura, y por lo tanto un sentido de giro del rotor del motor en forma horaria; al cambiar el switch a la posición "b" el sentido de la corriente através del inducido se invierte, así como la polaridad de la tensión inducida y por consiguiente se tendrá un sentido de giro en forma antihoraria. Ahora, el accionamiento del switch puede ser manual,

con la utilización de un switch manual bipolar, o puede ser en forma eléctrica con la utilización de un contactor de tal forma que al circular corriente por su bobina se da la orden de cambio de giro.

1.3.2. Sistemas Electrónicos.-

Debido al gran desarrollo que tiene en la actualidad la electrónica de potencia, para el control y manejo de máquinas eléctricas y por ser motivo primordial del presente trabajo, se presta una mayor atención a éste tipo de sistemas, específicamente a los convertidores estáticos.

Por otro lado, ya que el estudio de la inversión de giro y de los diferentes tipos de frenado lleva a controles electrónicos similares, se presentará en el siguiente numeral de éste capítulo las configuraciones de los mismos así como una pequeña descripción de su funcionamiento.

Por lo general, los circuitos electrónicos más utilizados para la inversión de giro, son los convertidores estáticos AC-DC controlados, debido a que pueden trabajar como rectificadores y como inversores sincrónicos. Las razones del por qué se hacen necesarias estas características en los convertidores controlados, para la inversión de giro, serán claramente analizadas en el siguiente capítulo.

1.4. METODO Y SISTEMAS PARA EL FRENADO DE LA MAQUINA D.C.-

Como ya se mencionó en el numeral 2 de éste mismo capítulo, se presta un mayor interés a los tipos de frenado interno, por lo cual se presentan sus tres tipos, con los circuitos electrónicos que permiten obtenerlos.

1.4.1. Frenado Dinámico.-

La figura 1.4., presenta un ejemplo práctico, de un circuito electrónico que permite el frenado dinámico de una máquina de corriente continua excitada independientemente.

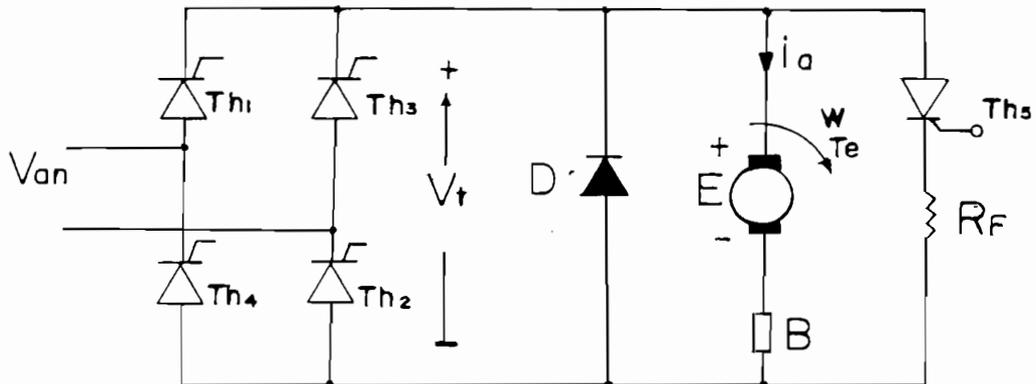


Figura 1.4. EJEMPLO DE FRENO DINAMICO

donde:

V_{an} = Voltaje de línea.

V_t = Voltaje terminal.

i_a = Corriente através del inducido.

E = Voltaje inducido.

W = Velocidad del motor.

T_e = Torque electromagnético producido por el motor.

D = Diodo de recuperación

B = Sensor de corriente.

R_F = Resistencia por donde se disipa la energía cinética.

Th₁

Th₂ = Constituyen el conversor controlado.

Th₃

Th₄

Th₅ = Tiristor auxiliar para el frenado.

El funcionamiento del circuito presentado y la dinámica del motor durante el frenado dinámico se la puede esquematizar en los pasos siguientes:

- El conversor estático (constituido por Th₁, Th₂, Th₃ y Th₄), actuando como rectificador controlado, nos da un voltaje terminal positivo (V_t) aplicado a los terminales del inducido del motor, haciendo circular corriente en la armadura, la misma que produce una tensión inducida (E), un torque electromagnético (T_e) y una velocidad (W), con la polaridad y sentido indicado en la figura.
- Al ordenarse el parado de la máquina, se desconecta primero la fuente de alimentación de tal forma que el voltaje aplicado a los terminales del inducido se haga cero. Pero debido a la energía almacenada en la inductancia del inducido, se mantendrá circulando una corriente decreciente entre el diodo de recuperación (D) y la armadura, con el mismo senti-

do anterior, haciendo que se mantenga la polaridad del voltaje inducido y el sentido del torque electromagnético; ésta corriente se hará cero el momento en que se disipe totalmente la energía de la inductancia.

- El hecho de que la corriente através del inducido se haga cero, no implica que el motor se detenga, ya que se tiene una energía cinética dada en la carga que mantendrá el motor en movimiento. Por lo tanto se tendrá que activar al tiristor T_{hs} (el sensor de corriente B, una vez que detecte el cruce por cero de la corriente decreciente dará la señal de control que activará el tiristor), para que circule una corriente entre la armadura y la resistencia R_f , de tal forma que se produce un torque de frenado opuesto al torque electromagnético, el mismo que hace detener por completo al rotor de la máquina D.C.

Se debe incluir en el ejemplo anterior, el hecho de que para obtener el funcionamiento descrito, se deberá tener acoplado al eje del motor una carga rotacional, es decir una carga que sea arrastrada por el motor.

Por último, para éste mismo tipo de frenado, se puede utilizar como fuente de alimentación a la armadura, rectificadores semicontrolados (SCR-diodos) el mismo que presenta inherentemente el mismo efecto que el diodo de recuperación.

1.4.2. Frenado Regenerativo.-

Para entender claramente el funcionamiento del frenado regenerativo, se hará la explicación en base a dos circuitos electrónicos, cuyo uso dependerá del tipo de carga que se tenga acoplado al eje del motor.

La figura 1.5.a. es un ejemplo de un circuito electrónico que permite el frenado regenerativo en una máquina D.C. cuando en su eje se tiene una carga gravitacional.

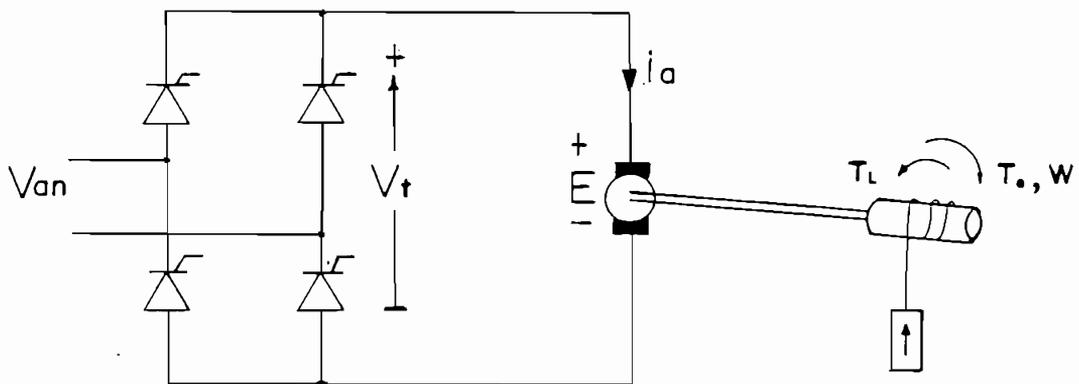


Figura 1.5.a. FRENO REGENERATIVO CON CARGA GRAVITACIONAL

donde:

V_{an}

V_t

= Misma definición utilizada en la figura 1.4.

i_a

E

T_L = Torque resistente dado por la carga gravitacional.

El funcionamiento de éste circuito se basa en la facilidad que presentan los convertidores controlados de

trabajar como rectificadores o como inversores sincrónicos con solo la variación del ángulo del activado de los tiristores. Para hacer el análisis, asumimos que la máquina se encuentra trabajando como rectificador controlado (ángulo de activado $< 90^\circ$) de tal forma que se tenga un voltaje terminal (V_t) en la armadura, habiendo una corriente de armadura y una tensión inducida con el sentido y polaridad que se indica en la figura, para éste caso el motor nos dará un torque electromagnético (T_e) mayor al torque resistente dado por la carga (T_L), de tal forma que la carga será arrastrada por el motor (la carga ascenderá).

Ahora, al variar el ángulo de activado de los tiristores o valores mayores a 90° el conversor actúa como inversor sincrónico haciendo que se tenga un voltaje terminal negativo en la armadura, lo cual traerá como consecuencia una disminución de la i_a y por consiguiente de T_e , de tal forma que se llegará a un punto en que el torque de la carga sea mayor al torque electromagnético, haciendo que la carga descienda, es decir la máquina comienza a girar en sentido contrario invirtiendo así la polaridad de la tensión inducida (E). Con estas nuevas condiciones se tendrá trabajando a la máquina como generador eléctrico de tal forma que la energía fluirá de la carga a la fuente.

Se debe notar que con el control del ángulo se podrá tener también un control de la velocidad de subida o

bajada de la carga.

Analícemos ahora, el caso en que se tenga acoplado al eje de la máquina una carga rotacional. La figura 1.5.b., presenta un ejemplo de un circuito con el que se puede lograr el frenado regenerativo para el caso de tener acoplado una carga rotacional.

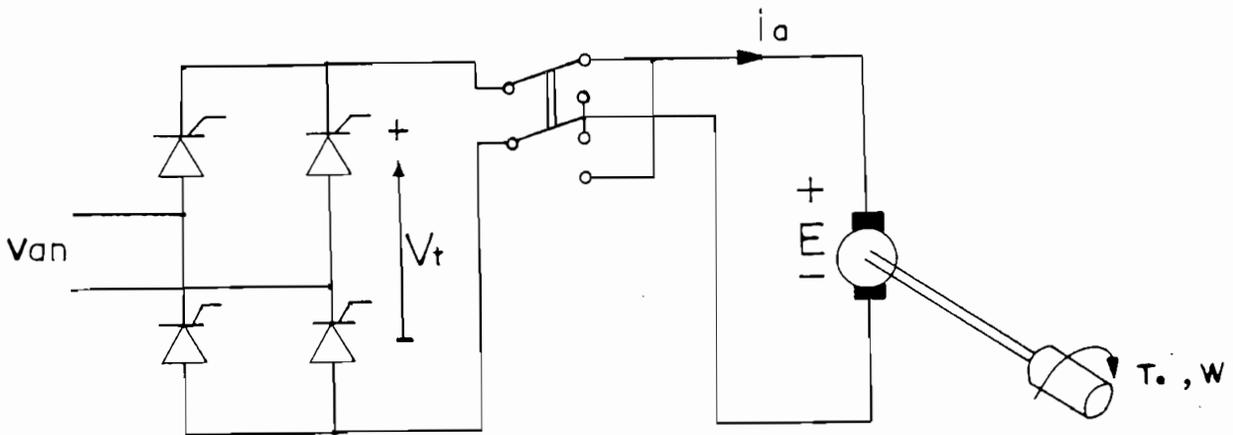


Figura 1.5.b. FRENO REGENERATIVO CON CARGA ROTACIONAL

Para éste caso asumiremos las mismas condiciones de trabajo en estado estable, tomadas en el ejemplo con carga gravitacional. En éste caso al variar el ángulo de activado a valores mayores a 90° no se tendrá el torque resistente que haga girar a la máquina en sentido contrario para que invierta la polaridad de la tensión inducida haciendo así trabajar a la máquina como generador; razón por la cual será necesario un circuito adicional que invierta los terminales de la armadura logrando así el mismo efecto anterior y

consiguiendo el frenado regenerativo.

Por último, se debe notar el hecho de que las fuentes que se utilizan como alimentación de la armadura, deben ser circuitos eléctricos o electrónicos tal que permitan una conducción continua de la corriente, ya que el motor debe presentar siempre un torque electromagnético, en caso contrario se tendrá, por ejemplo, que al estar trabajando con carga gravitacional y hacerse el torque electromagnético cero, la carga caería por efecto de la gravedad y sin tener ningún control sobre ella.

1.4.3. Frenado por Contra Corriente.-

Para lograr éste tipo de frenado, es necesario inyectar un transitorio de corriente en dirección contraria a la que se encontraba circulando en estado estable.

Un circuito práctico que nos permita éste tipo de frenado se logra conectando dos rectificadores controlados en forma antiparalela, como se muestra en la figura 1.6. A ésta forma de conexión de los rectificadores se denomina CONVERSION-DUAL.

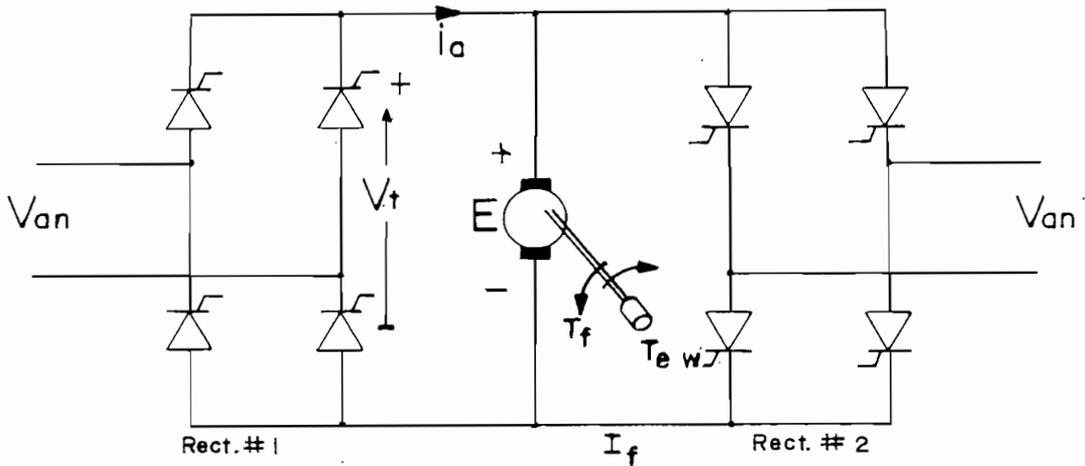


Figura 1.6. FRENADO DE CONTRA CORRIENTE CON CONVERTOR DUAL

Se asume que la máquina se encuentra trabajando en es tado estable y siendo controlado por el rectificador # 1 de tal forma que sobre la máquina se tenga un vol taje de alimentación V_t y una corriente unidireccio nal de armadura i_a , con la polaridad y sentido de circulación como se indica en la figura, con éstas condiciones la máquina girará a una velocidad W y pro duciendo un torque electromagnético en el mismo senti do de rotación. Luego, para poder parar el motor, se tendrá primero que reducir la corriente i_a a cero por medio del control del rectificador # 1, pero asuminos además que la máquina se encuentra manejando una car ga rotacional, no será condición suficiente para que el motor se detenga debido a su inercia; rarón por el cual será necesario que entre a trabajar el rectifica

C A P I T U L O I I

CONTROL EN UNO, DOS Y CUATRO CUADRANTES

2.1. DEFINICION DE CUADRANTES.-

Partiendo del modelo matemático de la máquina de corriente continua con excitación independiente, presentado en el Apéndice A de éste mismo trabajo, se toma las dos siguientes relaciones de estado estable:

$$W = \frac{V_t - i_a \cdot R_a}{G_q \cdot i_f} \quad \text{esc. 2.1.}$$

$$T_e = G_q \cdot i_a \cdot i_f \quad \text{esc. 2.2.}$$

Donde la definición de cada elemento se encuentra en el apéndice ya mencionado.

Asumiendo que la máquina D.C. es con excitación independiente constante, se observa en las ecuaciones 2.1. y 2.2. que la velocidad es proporcional al voltaje de armadura y que el torque electromagnético lo es a la corriente del inducido. Esto implica que, un cambio en la polaridad del voltaje de armadura traerá como consecuencia una inversión en el sentido de giro del rotor, y un cambio en la dirección de la corriente de inducido producirá una inversión en el torque electromagnético entregado por la máquina.

Tomando como introducción lo anterior, y debido a que el funcionamiento de la máquina de corriente continua tiene una gran aceptación en la industria, se hace una subdivisión

de cuadrante para describir el funcionamiento de la máquina D.C. Esta subdivisión es hecha precisamente en base al sentido de giro y de la dirección del torque que entrega la máquina, ya que por ejemplo, se tienen máquinas D.C. utilizadas en bombas o ventiladores en que nada más se requiere dirección de rotación y de torque en un solo sentido, mientras que motores en gruas o elevadores necesitan poder rotar en ambos sentidos pero manteniendo la dirección del torque.

La figura 2.1. describe a la máquina D.C. con excitación independiente trabajando en un cuadrante (1er. cuadrante).

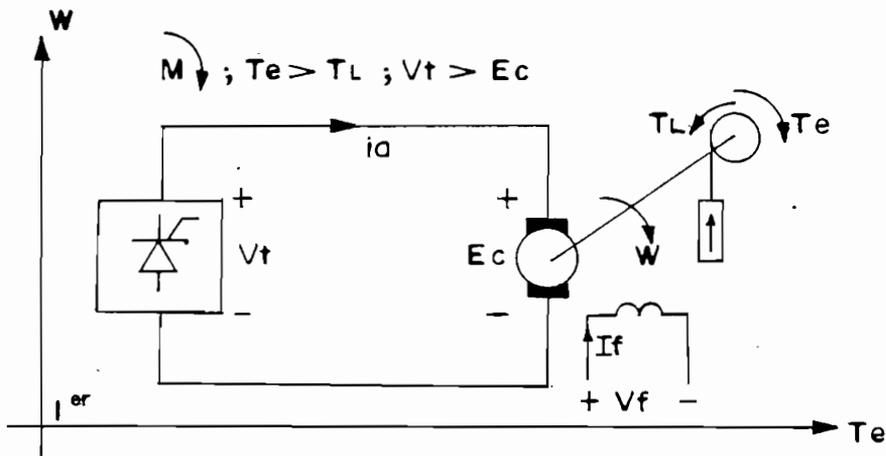


Figura 2.1. MAQUINA D.C. TRABAJANDO EN EL PRIMER CUADRANTE

Para el trabajo en un solo cuadrante, se tiene que el sentido de giro y el torque es en una sola dirección. Para éste caso, el circuito alimentador utilizado será un convertidor actuando únicamente como rectificador de tal forma que se tenga una dirección de torque y un sentido de giro determinado; además, se tiene que la energía fluye desde la fuen-

te hacia la máquina; haciendo actuar a ésta como motor.

Por otro lado, se debe notar que el torque entregado por la máquina es mayor que el torque resistente de la carga, haciendo que ésta sea arrastrada por el motor, y la máquina inducirá una fuerza contra-electromotriz inferior al voltaje de alimentación.

El funcionamiento de la máquina D.C. trabajando en dos cuadrantes (1ero. y 4to. cuadrante), se esquematiza en la figura 2.2.

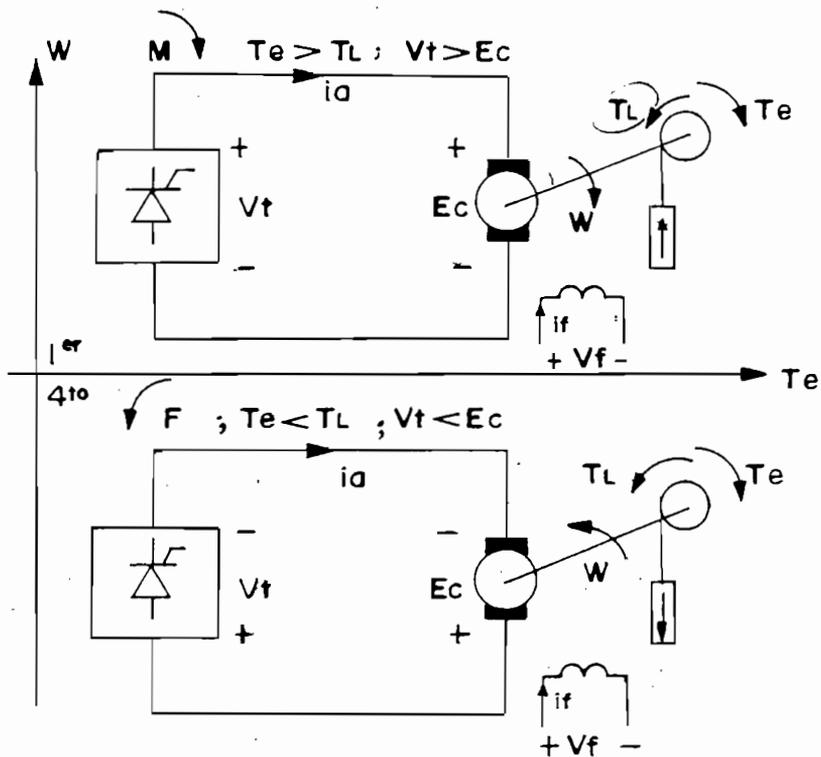


Figura 2.2. MAQUINA D.C. TRABAJANDO EN PRIMER Y CUARTO CUADRANTE

Para que una máquina D.C. trabaje en dos cuadrantes, se deberá cumplir, que la fuente de alimentación trabaje no solo como rectificador, sino también como inversor sincrónico.

co, es decir que pueda invertir la polaridad del voltaje terminal aplicado a la armadura pero sin invertir la dirección de la corriente de armadura, de tal forma que se tenga control de la velocidad en ambos sentidos de giro, pero con una sola dirección del torque. La máquina al trabajar en el cuarto cuadrante, inducirá una fuerza contra-electromotriz mayor al voltaje terminal dado por la fuente, es decir que la máquina estará funcionando como generador de tal forma que la energía fluirá desde la carga hacia la fuente; para éste caso el torque resistente dado por la carga será mayor al torque electromagnético, produciendo así, que la carga arrastre al eje de la máquina. Debe notarse, que el funcionamiento de la máquina al pasar del primer al cuarto cuadrante, tiene una gran semejanza al funcionamiento de una máquina de corriente continua independiente, cuando sobre ella se produce un frenado regenerativo y se tenga acoplado al eje de la máquina una carga gravitacional.

Ahora, para el funcionamiento de una máquina D.C. trabajando en cuatro cuadrantes, se deberá tener la posibilidad, de poder invertir el sentido de giro y/o el torque electromagnético de la máquina, en otras palabras se deberá tener la posibilidad de poder invertir la polaridad del voltaje aplicado a la armadura y/o la dirección del flujo de la corriente a través del inducido.

La figura 2.3. esquematiza el funcionamiento de una máquina de corriente continua con excitación independiente constante, trabajando en los cuatro cuadrantes.

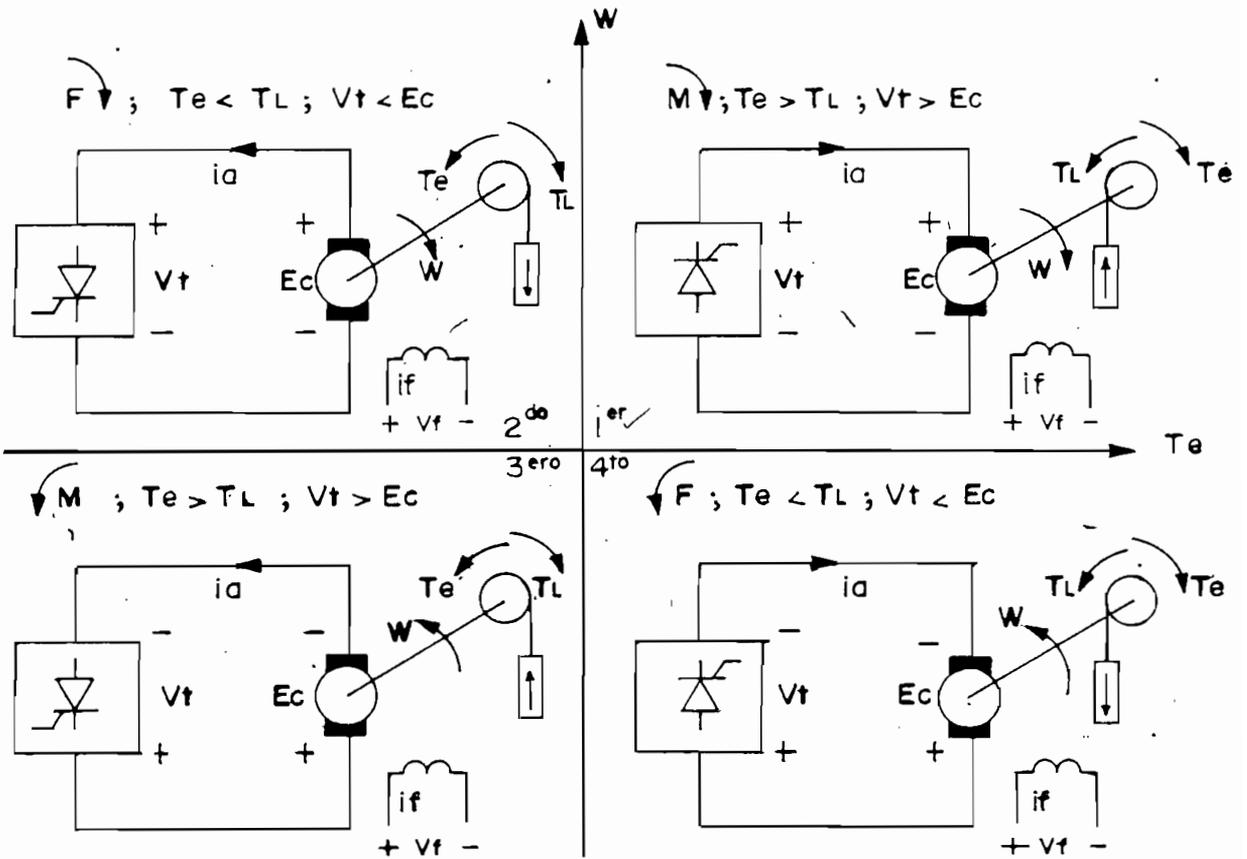


Figura 2.3. MAQUINA D.C. TRABAJANDO EN CUATRO CUADRANTES

La figura 2.3. indica que el trabajo en el tercer y segundo cuadrante es similar al trabajo en el primero y cuarto, respectivamente, con la diferencia que para los dos nuevos cuadrantes se tiene una inversión del torque electromagnético es decir se ha invertido el sentido de la corriente de armadura con respecto a la dirección que se tenía en el primero y cuarto. La inversión del torque se ha logrado, para el caso de la figura, invirtiendo los terminales de la fuente (convertidor controlado) y manteniendo fijo los terminales del

campo de excitación, pero esto no quiere decir, que con el caso contrario no se obtenga el mismo efecto, esto quedará mejor entendido más adelante, al hacerse la descripción de los controladores de cuatro cuadrantes para la máquina D.C.

Resumiendo todo lo dicho anteriormente referente a la definición de cuadrantes se presenta la tabla 2.1., en la que se sintetiza el modo de funcionamiento de una máquina D.C. con excitación independiente constante, presentando además, las direcciones que tienen el torque y la velocidad cuando la máquina está controlada en cuatro cuadrantes.

CUADRANTE	FUNCIONAMIENTO	DIRECCION	
		T_e	W
PRIMER	MOTOR		
SEGUNDO	GENERADOR		
TERCER	MOTOR		
CUARTO	GENERADOR		

TABLA 2.1.

2.2. DIAGRAMAS TORQUE-VELOCIDAD PARA UN MOTOR CONTROLADO EN CUATRO CUADRANTES.-

Para un mayor entendimiento de la dinámica que tiene un motor eléctrico, cuando ésta se encuentra controlada en cuatro cuadrantes se representa en forma gráfica el trabajo de la máquina cuando sobre ella se realiza una perturbación.

Dicha representación se hace en base a los parámetros torque-velocidad entregados por el motor.

Llamando al eje horizontal torque aplicado a la carga, positivo hacia la derecha y negativo a la izquierda y al eje vertical como velocidad, positiva hacia arriba y negativo hacia abajo, se tendrá:

Asumiendo una relación lineal entre el torque y la velocidad, la figura 2.4. representa el arranque de un motor D.C. hasta que alcanza su estado estable.

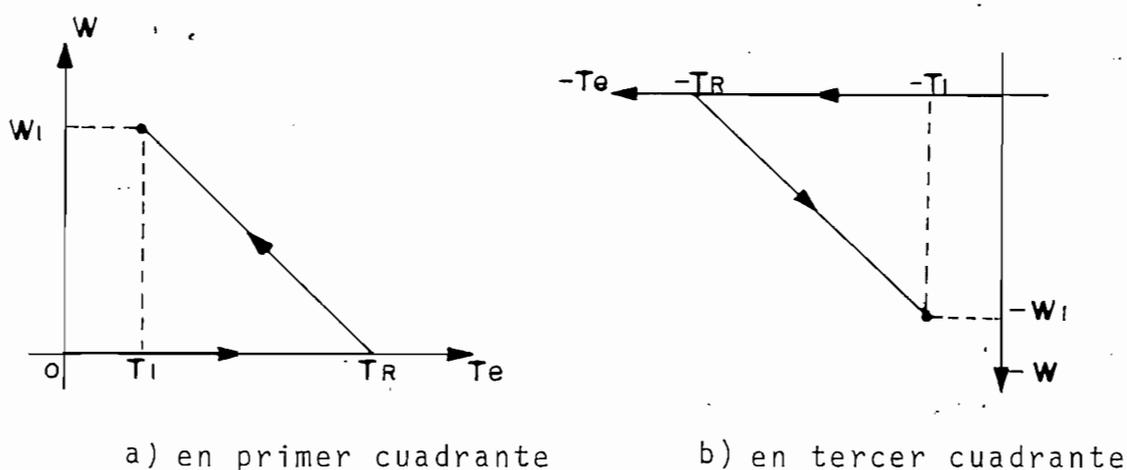
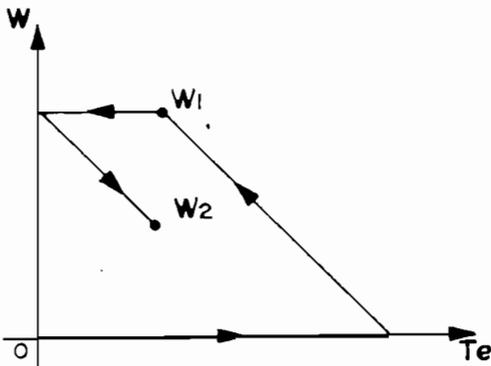


Figura 2.4. ARRANQUE Y ESTADO ESTABLE EN LOS DOS SENTIDOS

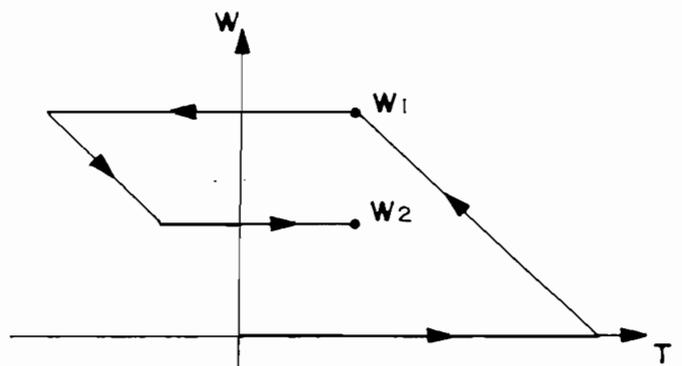
En 2.4.a., el arranque ($W = T_e = 0$) se realiza en el primer cuadrante, es decir con velocidad y torque positivos, la máquina permanecerá con velocidad cero hasta el punto en que se vence el torque resistente (T_R) dado por la carga y por el peso mismo de la masa del rotor, una vez vencido este punto comienza a aumentar la velocidad y el torque sufre un decrecimiento debido a que la corriente de armadura empieza

a estabilizarse hasta que la máquina alcance su estado estable en donde el torque toma un valor T_1 y la velocidad un valor W_1 . De igual forma 2.4.b. representa el arranque pero en el tercer cuadrante (W y T_e en sentido contrario al caso anterior), alcanzando su estado estable en los valores $-T_1$ y $-W_1$.

Una reducción simple de velocidad es mostrada en la figura 2.5. El motor está inicialmente manejando la carga a velocidad W_1 (en 1er. cuadrante), luego se da la orden, por medio del controlador a que la maneje a una velocidad menor W_2 . En 2.5.a., el controlador disminuye el voltaje de armadura haciendo lo girar más lento, si la fuente es un puente de tiristores unidireccional la corriente de armadura y el torque se hacen cero haciendo que el motor reduzca su velocidad por virtud de la carga. Por el contrario, en 2.5.b. el controlador está previsto de freno dinámico o regenerativo en donde una corriente de armadura inversa produce un torque negativo de freno, haciendo que el motor llegue más rápido a la velocidad W_1 .



a) SIN FRENO



b) CON FRENO

Figura 2.5. REDUCCION DE VELOCIDAD DEL MOTOR

Finalmente la figura 2.6. muestra una inversión de giro de W_1 a $-W_1$, el controlador debe producir una corriente de armadura negativa la cual se consigue invirtiendo la fuente de voltaje que alimenta la armadura, la corriente negativa producirá un torque límite (dado por las limitaciones de corrientes), el cual llevará al motor a pararse en el segundo cuadrante y luego se acelerará con una velocidad invertida hasta $-W_2$ en el tercer cuadrante.

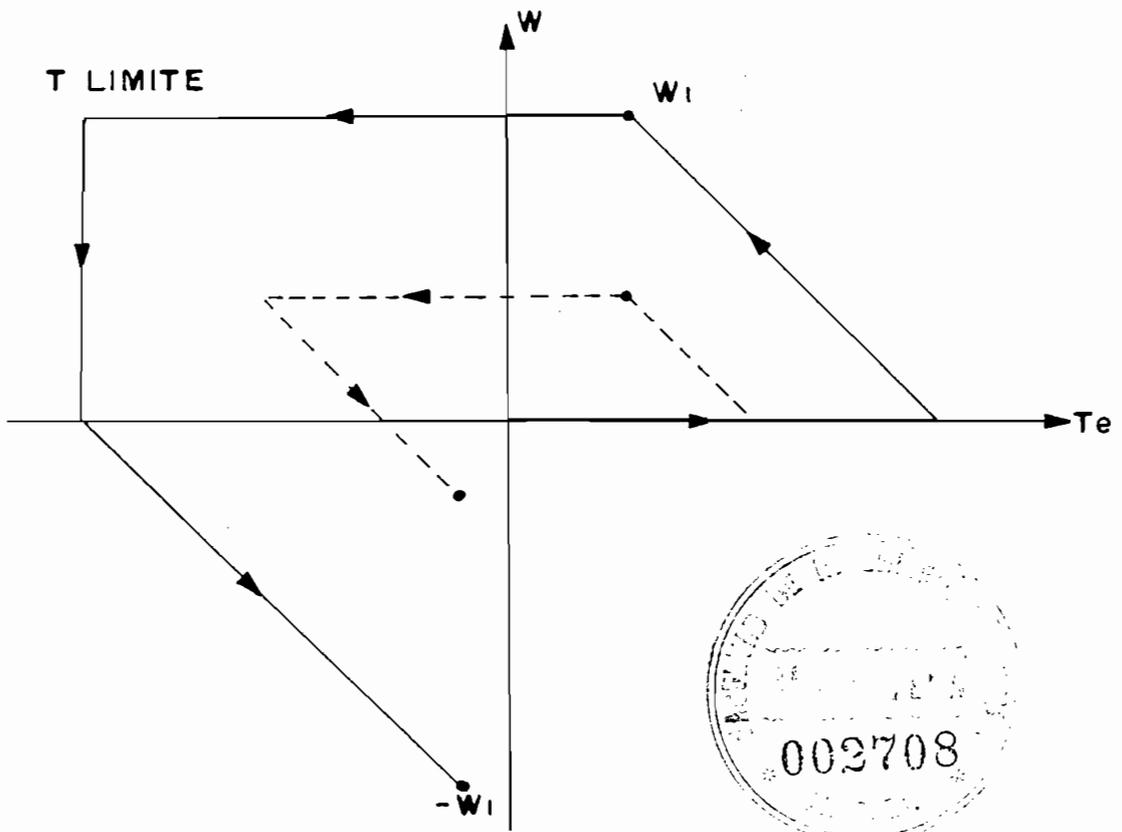


Figura 2.6. INVERSION DE GIRO

En línea punteada se presenta una inversión de giro, pero a una velocidad menor a la anterior, en este caso la corriente invertida producirá un torque resistente menor al

cuadrantes, controlado por un regulador de velocidad manejada por tiristores, y manejando una carga rotacional.

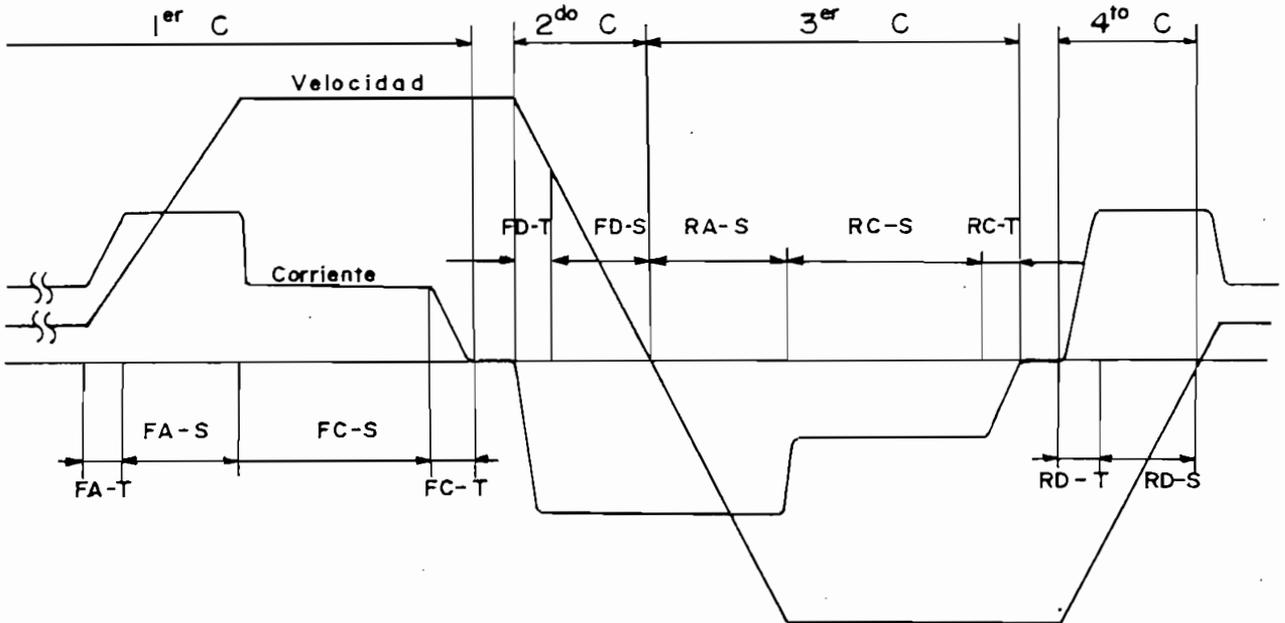


Figura 2.7. CARACTERISTICAS DE VELOCIDAD Y CORRIENTE EN OPERACION DE CUATRO CUADRANTES CON CARGA ROTACIONAL

Los modos son definidos de acuerdo al estado de la corriente y la velocidad que ocurren en cada cuadrante. De la figura 2.7. se observa que en el primer cuadrante se tienen cuatro modos:

- Velocidad acelerante directa-corriente transitoria (FA-T)
- Velocidad acelerante directa-corriente estable (FA-S)
- Velocidad constante directa -corriente estable (FC-S)
- Velocidad constante directa -corriente transitoria (FC-T)

En el segundo cuadrante se tienen dos modos:

- Velocidad desacelerante directa-corriente transitoria (FD-T)

-Velocidad desacelerante directa-corriente estable (FD-S)

Por otro lado se tienen tres modos en el tercer cuadrante:

-Velocidad acelerante reversa-corriente estable (RA-S)

-Velocidad constante reversa -corriente estable (RC-S)

-Velocidad constante reversa -corriente transitoria (RC-T)

Dos modos ocurren en el cuarto cuadrante:

-Velocidad desacelerante reversa-corriente transitoria (RD-T)

-Velocidad desacelerante reversa-corriente estable (RD-S)

A partir de la misma figura se puede notar que los modos que ocurren en el tercer y cuarto cuadrante son muy similares a los que ocurren en el primero y segundo con la diferencia que la corriente y la velocidad son inversas y que el modo FA-T desaparece en el tercer cuadrante.

Resumiendo, se presenta en la tabla 2.2., en forma detallada, el comportamiento del conversor y del motor D.C. en cada cuadrante.

CONSIDERACION		CONVERSOR			MOTOR			
CUADRANTE	MODO	Operacion del Puente	Modo de Operación	Angulo de Disparo	Corriente I_a		Velocidad	
					Direcc.	Pend.	Direc.	Pend.
1 ^{er}	FA-T	DIR	REC	$\alpha_{min} \leq \alpha < 90^\circ$	DIR	+	DIR	+
	FA-S	DIR	REC	$\alpha_{min} < \alpha < 90^\circ$	DIR	*	DIR	+
	FC-S	DIR	REC	$\alpha_{min} < \alpha < 90^\circ$	DIR	0	DIR	0
	FC-T	DIR	INV	$90^\circ < \alpha \leq \alpha_{max}$	DIR	-	DIR	*
2 ^{do}	FD-T	REV	INV	$90^\circ < \alpha \leq \alpha_{max}$	REV	-	DIR	-
	FD-S	REV	INV	$90^\circ < \alpha < \alpha_{max}$	REV	*	DIR	-
3 ^{er}	RA-S	REV	REC	$\alpha_{min} < \alpha < 90^\circ$	REV	*	REV	-
	RC-S	REV	REC	$\alpha_{min} < \alpha < 90^\circ$	REV	0	REV	0
	RC-T	REV	INV	$90^\circ < \alpha \leq \alpha_{max}$	REV	+	REV	*
4 ^{to}	RD-T	DIR	INV	$90^\circ < \alpha \leq \alpha_{max}$	DIR	+	REV	+
	RD-S	DIR	INV	$90^\circ < \alpha \leq \alpha_{max}$	DIR	*	REV	+

Tabla 2.2. COMPORTAMIENTO DEL CONVERTOR Y MOTOR EN CUATRO CUADRANTES

En la tabla 2.2. se lee:

* La pendiente en este punto no se considera.

FOR/REV: Léase directo para FDR y reverso para REV.

REC/INV: Léase rectificador para REC e inversor para INV.

Los α_{\min} y α_{\max} son valores de α (ángulo activado de los tiristores) límites que aseguran la conmutación de los tiristores.

A continuación, se hace un análisis de los modos de operación en el trabajo de una máquina D.C. con excitación independiente controlada por un regulador de velocidad manejada por tiristores, pero manejando ésta vez una carga gravitacional.

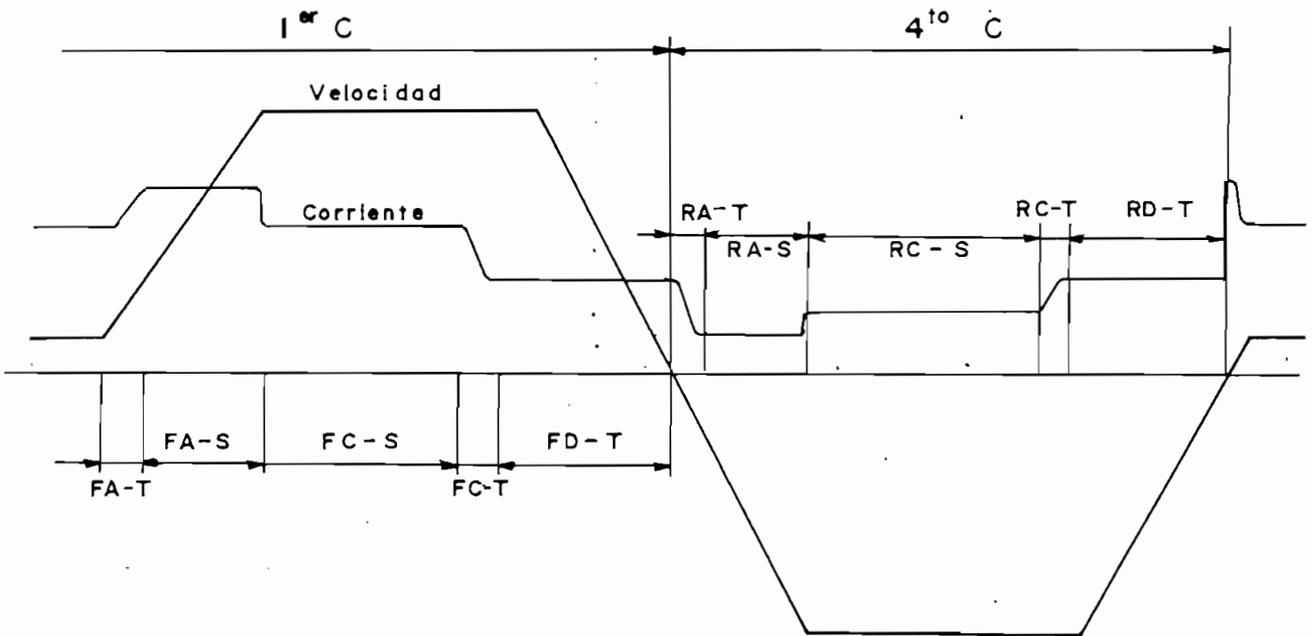


Figura 2.7.a. CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDAD Y CORRIENTE DE OPERACION DE CUADRANTES CON CARGA GRAVITACIONAL

Para éste caso, en que la carga es gravitacional, los modos de operación serán definidos en el primer y cuarto cuadrante.

En el primer cuadrante se tiene:

- Velocidad acelerante directa-corriente transitoria (FA-T)
- Velocidad acelerante directa-corriente estable (FA-S)
- Velocidad constante directa -corriente estable (FC-S)
- Velocidad constante directa -corriente transitoria (FC-T)
- Velocidad desacelerante directa-corriente estable (FD-S)

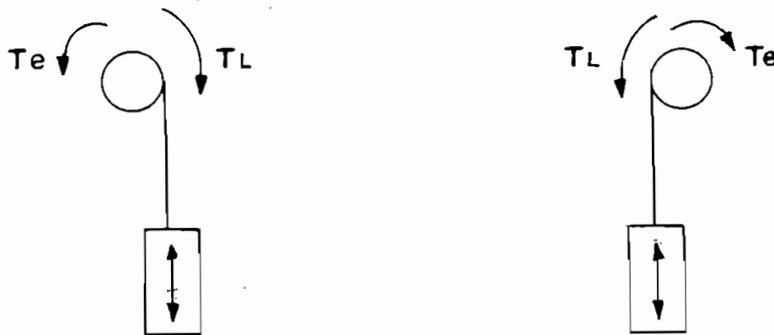
En el cuarto cuadrante se tiene;

- Velocidad acelerante reversa-corriente transitoria (RA-T)
- Velocidad acelerante reversa-corriente estable (RA-S)
- Velocidad constante reversa -corriente estable (RC-S)
- Velocidad constante reversa -corriente transitoria (RC-T)
- Velocidad desacelerante reversa-corriente estable (RD-T)

Como se puede observar en la figura 2.7.b., cuando la máquina D.C. está manejando una carga gravitacional, se tiene que solo trabaja en dos cuadrantes (primero y cuarto) ya que la corriente de armadura permanece positiva, es decir que la máquina genera un torque electromagnético siempre en el mismo sentido. Así mismo se puede hacer una comparación con el caso en que la máquina opera con carga rotacional (figura 2.7.a.) en lo que se refiere al trabajo en el primer cuadrante, para este segundo caso se observa un modo más de operación, en que la corriente estable y la velocidad es desacelerante directa, para éste punto de operación se consigue que el torque electromagnético dado por la carga es igual al torque resistente que presenta la carga produciendo que la velocidad llegue a cero; además se concluye que la

corriente de armadura nunca se puede hacer cero ya que en este caso el torque entregado por la máquina se hace nulo y la carga caería sin ningún control por efecto de la gravedad.

Para que la máquina D.C. con carga gravitacional trabaje en los otros dos cuadrantes (2do. y 3ero.), se puede imaginar en un sistema físico en que la carga presente un torque resistente en el sentido contrario al presentado originalmente. Una representación gráfica de este sistema es el presentado en la figura 2.8.



a) en primer y cuarto cuadrante

b) en segundo y tercer cuadrante

Figura 2.8. REPRESENTACION FISICA EN QUE LA CARGA PRESENTA UN TORQUE EN LOS DOS SENTIDOS

2.4: METODOS Y SISTEMAS PARA EL CONTROL DE CUATRO CUADRANTES.-

Para que una máquina eléctrica trabaje en cuatro cuadrantes es preciso que aporte un torque electromagnético en uno y otro sentido de giro del rotor y además que pueda tener opción a frenarle por recuperación de energía a la red.

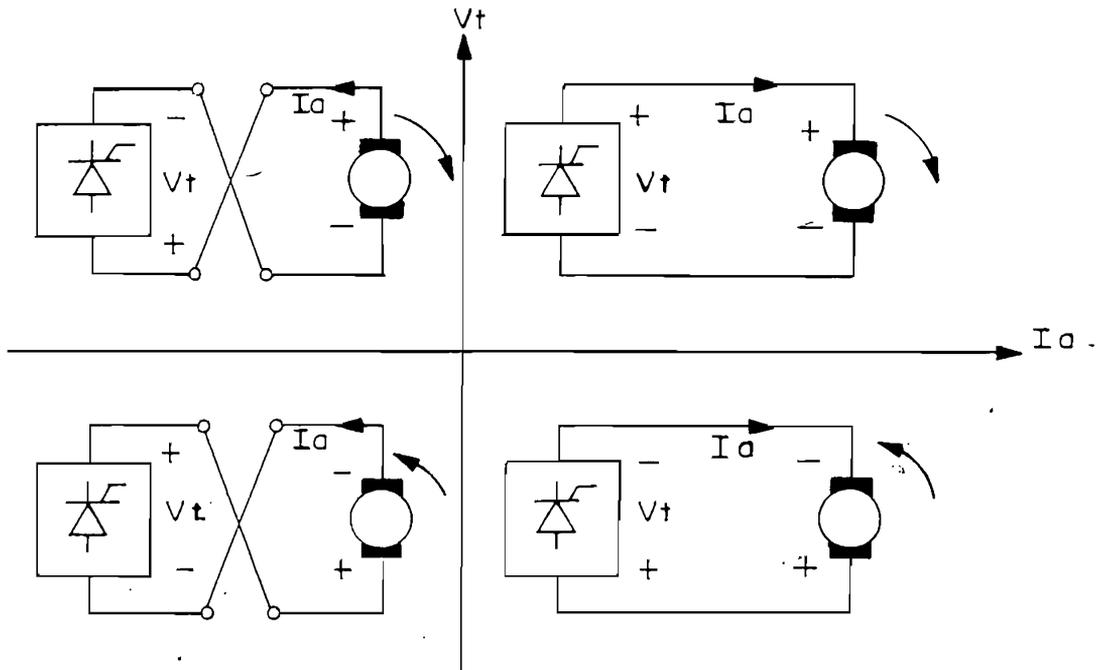


Figura 2.8. CONTROL DE CUATRO CUADRANTES POR INVERSION EN EL INDUCIDO.

2.4.2. Inversión de Campo:-

Se puede conseguir el mismo efecto por inversión de la excitación. Para este método, al igual que en el método anterior, nos servimos de tiristores como muestra la figura 2.9., y la forma de funcionamiento es similar a la descrita en el numeral anterior.

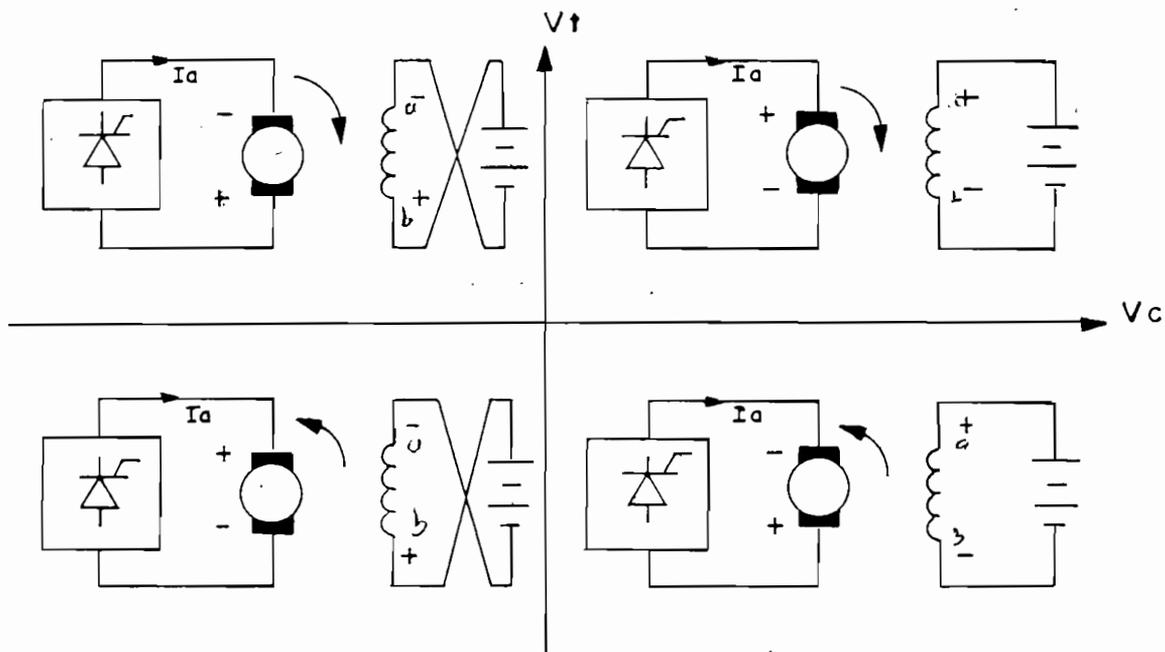


Figura 2.9. CONTROL DE CUATRO CUADRANTES POR INVERSION EN EL CAMPO DE EXCITACION.-

En ángulos pequeños y a un determinado sentido de excitación corresponde un giro del motor en un sentido, si se invierte la excitación obtenemos recuperación de energía por la red, con un control de ángulos mayores a 90° .

Las desventajas de éste método de control de cuatro cuadrantes, comparado con el método por inversión en la armadura se las puede simplificar en lo siguiente:

- a.- La cantidad del transitorio de corriente que se tendría al invertir el campo es mucho mayor a la que se tendría al hacer la inversión en la armadura, razón por el cual sería necesario que el circuito de tiristo

res que controlan la velocidad del motor sea de mayor potencia y por consiguiente más caro, y

- b.- Si por algún motivo, falla el circuito de conmutación en el campo, dejando los terminales del campo abierto, se producirá un embalamiento del motor produciendo así la destrucción del mismo.

2.4.3. Control con Doble Puente en el Inducido.-

Es posible efectuar el control de cuatro cuadrantes con dos puentes completos de tiristores conectados en antiparalelo. Existen dos modalidades para este control:

- a.- Trabajo Simultáneo de los Conversores.- Se basa en efectuar una diferencia de corrientes en el motor procedentes de los puentes conversores, de tal manera que la mayor de ellas excita al motor. Controlando dichas corrientes podemos, pues, hacer predominar una u otra, provocando el giro y el frenado.

El problema de este montaje reside en la corriente mínima de mantenimiento de los tiristores, pues en el momento en que los dos puentes generan tensiones iguales y de sentido opuesto, las intensidades se anularán en el motor. Para remediarlo hay que dotar el circuito de inductancias a fin de provocar un retardo en la corriente.

- b.- Trabajo Alternado de los Conversores.- Es probablemente el método más empleado para el control de cuatro

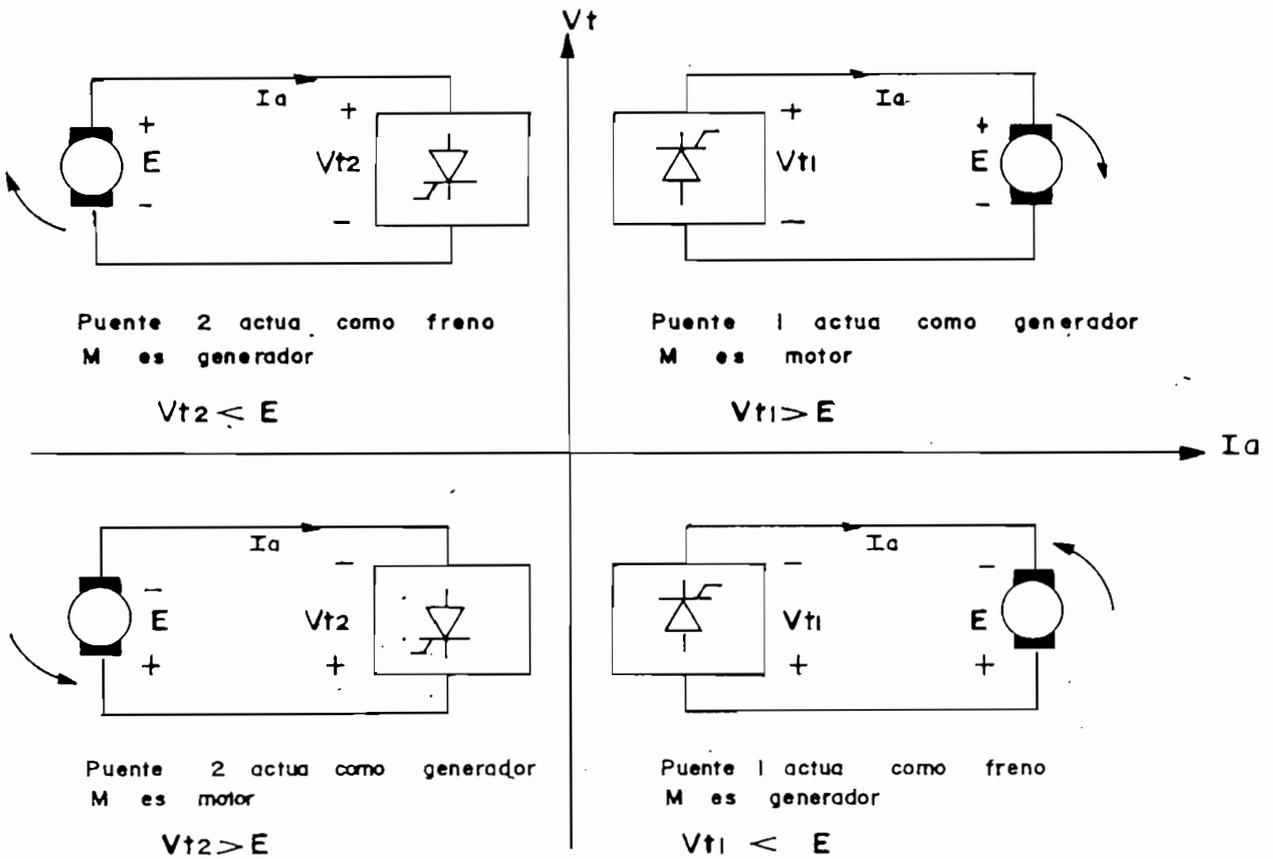


Figura 2.10. CONTROL DE CUATRO CUADRANTES POR DOBLE PUENTE EN EL INDUCIDO SIN CORRIENTE CIRCULANTE

En el primer cuadrante, el puente # 1 actúa sobre el motor, haciéndolo girar en un sentido. Si queremos frenarlo e invertir el sentido de giro será preciso pasar al cuarto cuadrante, para lograr ésto será necesario hacer trabajar al puente # 1 como inversor sincrónico (con ángulo activado mayor a 90°) de tal forma que el motor se frene (se asume que el motor se para por efecto de la carga). Cuando se extinga la corriente el motor estará parado, momento en que podrá en

C A P I T U L O I I I

PROGRAMA DE LA SIMULACION DIGITAL

3.1. GENERALIDADES.-

El programa digital desarrollado en el presente trabajo podrá analizar, en una máquina D.C. excitada independientemente y controlada por circuitos conversores AC-DC, lo siguiente:

1. Arranque {
 - Con cualquier ángulo fijo
 - Con cambio de ángulo durante el proceso

2. Estado Estable

3. Perturbación {
 - Incremento brusco de carga
 - Cambio de ángulo de disparo

4. Parada {
 - Con inversión en el campo
 - Con desconexión de la armadura
 - Con inversión en la armadura

5. Cambio de Giro {
 - Con inversión en el campo
 - Con inversión en la armadura

Se debe acotar que el arranque y estado estable que podrá simular el programa, será únicamente en el primer y tercer cuadrante, ya que el trabajo en el segundo y cuarto será solo como estado transitorio en los procesos de parada y de cambio de giro, así mismo, los cambios de giro serán un paso

del primero al tercero o viceversa.

El programa digital ha sido desarrollado en lenguaje BASIC, arreglado para que trabaje en el microcomputador Tektronix 4051 que se dispone en la Facultad.

La realización de la simulación se la hace con un programa principal de enlace y ocho subprogramas, de los cuales, uno es de selección de funcionamiento, cuatro simulan al motor dependiendo del trabajo que se desee y, tres simulan la fuente de alimentación que se tiene en la armadura del motor.

Además, se tiene un programa GRAFICO, que presenta los resultados en forma gráfica así como las condiciones iniciales.

3.2. PROGRAMA PRINCIPAL.-

El programa, primeramente hace una presentación del trabajo realizado, continuando con la lectura de los parámetros de la máquina que fueron utilizados en la corrida anterior y preguntando si se desea cambiarlos, en caso de respuesta afirmativa, se borra el archivo, y se guardan los nuevos parámetros en el archivo con el mismo nombre anterior (PARAMED).

Luego de ésto, el programa continúa preguntando el cuadrante en que se desea trabajar, aquí se define la variable J1, la misma que toma el valor de 1 para el caso en que trabaje en el primer cuadrante y, 2 para el tercer cuadrante.

A continuación, se carga el subprograma FUNCION, el mismo que corre inmediatamente. En éste subprograma se defi

ne la variable K2 cuyo valor determinará, en el programa principal, a cual de los programas MOTOR se carga en la memoria del computador, como se puede ver en el cuadro 3.1.

VALOR K2	PROGRAMA CARGADO	FUNCION QUE DESARROLLA
1	MOTOR1	Arranque con cualquier ángulo y estado estable
2	MOTOR2	Arranque con cambio en el ángulo y perturbaciones
3	MOTOR3	Paradas
4	MOTOR4	Inversión de Giro

Cuadro 3.1.

Los subprogramas que simulan la alimentación de armadura, se cargan en la memoria del computador una vez definida la variable J3, y dependiendo de éste valor se podrá seleccionar cualquiera de los convertidores duales disponibles, como se observa en el cuadro 3.2.

VALOR J3	PROGRAMA CARGADO	CIRCUITO QUE SE SIMULA
1	COND2TP	Convertor dual monofásico tipo puente
2	COND3MO	Convertor dual trifásico de media onda
3	COND3TP	Convertor dual trifásico tipo puente

Cuadro 3.2.

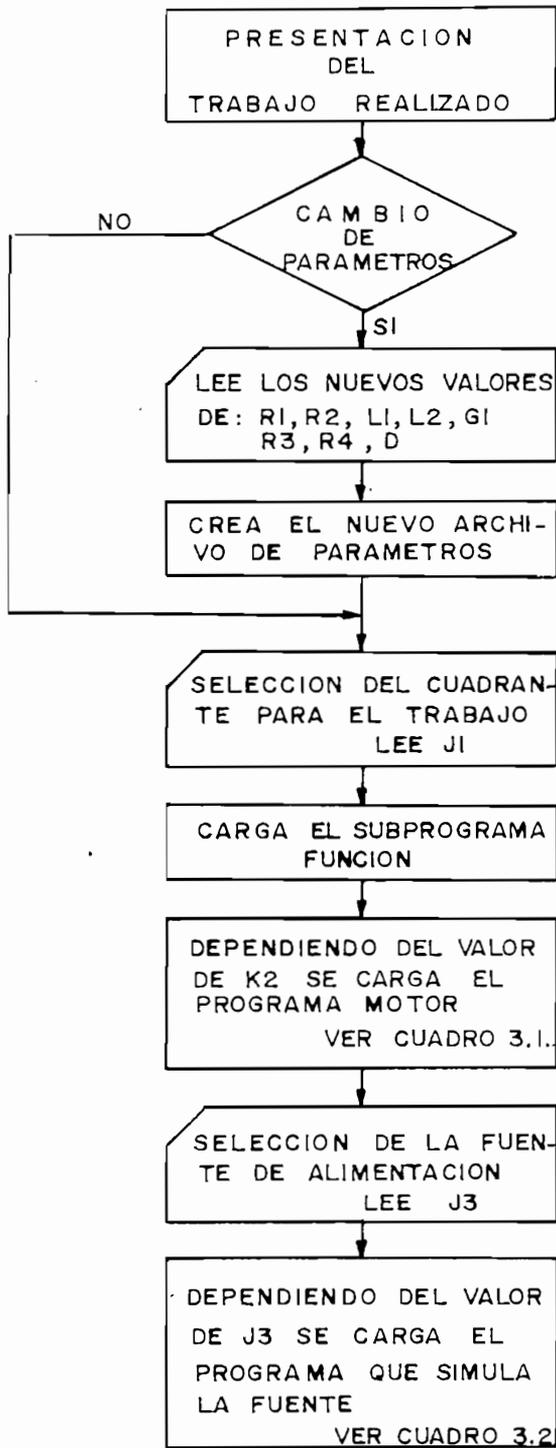


Figura 3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL

3.3. SELECCION DE TRABAJO.-

La selección del trabajo que se desea analizar en la máquina, se la realiza mediante el subprograma FUNCION, el mismo que se ejecuta una vez que ha sido cargado en la memoria del computador. En éste subprograma se ingresan además las condiciones iniciales.

El tipo de trabajo para la máquina, se puede seleccionar entre:

1. Arranque
2. Estado Estable
3. Perturbaciones
4. Parada
5. Cambio de Giro

Al hacer la selección entre los puntos anteriores se define la variable J8, la cual tendrá los siguientes valores:

Arranque (J8 = 1).- Se tiene dos tipos de arranque, el primero con cualquier ángulo de activado y el otro con cambio de inversor a rectificador durante el proceso de arranque, definiéndose la variable J5, la cual vale 1 para el primer caso y 2 para el segundo. Para ambos casos se tiene que las variables en el instante $t = 0$ deben ser cero, debido a que la máquina parte del reposo. En éste punto se ingresa el valor del voltaje que alimenta el campo de excitación (V1) y se definen las siguientes variables:

Y(1) = 0 Corriente de campo
Y(2) = 0 Corriente de armadura
Y(3) = 0 Velocidad
M = 0
N2 = 0
N = 3

Donde, M permite determinar en que paso del proceso Runge-Kutta se encuentra el cálculo; N2 es el contador de puntos calculados y N determina el número de ecuaciones diferenciales que se usa en el modelo.

Para el caso de tener $J5 = 1$ (arranque con cualquier ángulo) se definen las banderas como $K2 = 1$ y $J9 = 3$, con lo cual se cargará en la memoria del computador el subprograma MOTOR1 (ver cuadro 3.1.) y además no se tomará en cuenta un cambio en el ángulo de activado de los tiristores. Por otro lado, para segundo tipo de arranque ($J5 := 2$), se definen las banderas $K2 = 2$ y $J9 = 2$ con lo que se cargará el subprograma MOTOR2 y sí se tomará en cuenta el cambio de ángulo, además se ingresa, para éste caso, el nuevo valor del ángulo y el tiempo al cual se produce el cambio.

Estado Estable ($J8 = 2$).- Para éste caso se ingresan los valores de corriente de campo, corriente de armadura y velocidad al instante $t = 0$, tiempo en que empiezan los cálculos iterativos, además se ingresa el voltaje de la fuente de alimentación al campo, y se hace

la misma definición de variables que se realiza para el caso de arranque con cualquier ángulo fijo.

Perturbación (J8 = 3).- Dentro de éste caso se tienen dos tipos de perturbación: en el torque de carga o en el ángulo de activado de los tiristores; al escoger en tre cualquiera de los dos casos se define la variable J9, la cual tomará el valor de 1 para el caso de perturbación en el torque de carga, o 2 para la perturbación en el ángulo de activado. Además de hacer los mismos ingresos y definiciones que en el caso de estado estable (excepto la definición de J9), se ingresa el valor del nuevo ángulo A2 o el valor del nuevo torque, dependiendo del valor de J9; para éste ca so se ingresan los valores correspondientes al torque dependiente de la velocidad T8 así como el torque inde pendiente de la velocidad T5, y luego el tiempo al cual se produce dicha perturbación (T7). Por último se define a la variable K2 igual a 2, con lo que se llama al programa MOTOR2 para realizar los cálculos iterativos.

Parada (J8 = 4).- Para éste caso se puede escoger entre tres tipos de paradas diferentes, con lo que se de fine la variable J7, la cual tomará los valores de, 1 para parar una inversión en el campo, 2 para parar con la desconexión en la armadura y, 3 para el caso de parar con inversión de la fuente de armadura. Se ingre-

san los valores de corriente de campo, corriente de armadura, velocidad, voltaje de alimentación del campo, y el tiempo al cual se produce la parada; además se definen las siguientes variables:

M = 0

N2 = 0

N = 3

K2 = 3

J9 = 3

Donde M, N2, N, J9 ya han sido definidas en el caso del arranque y, K2 = 3 sirve para llamar al subprograma MOTOR3.

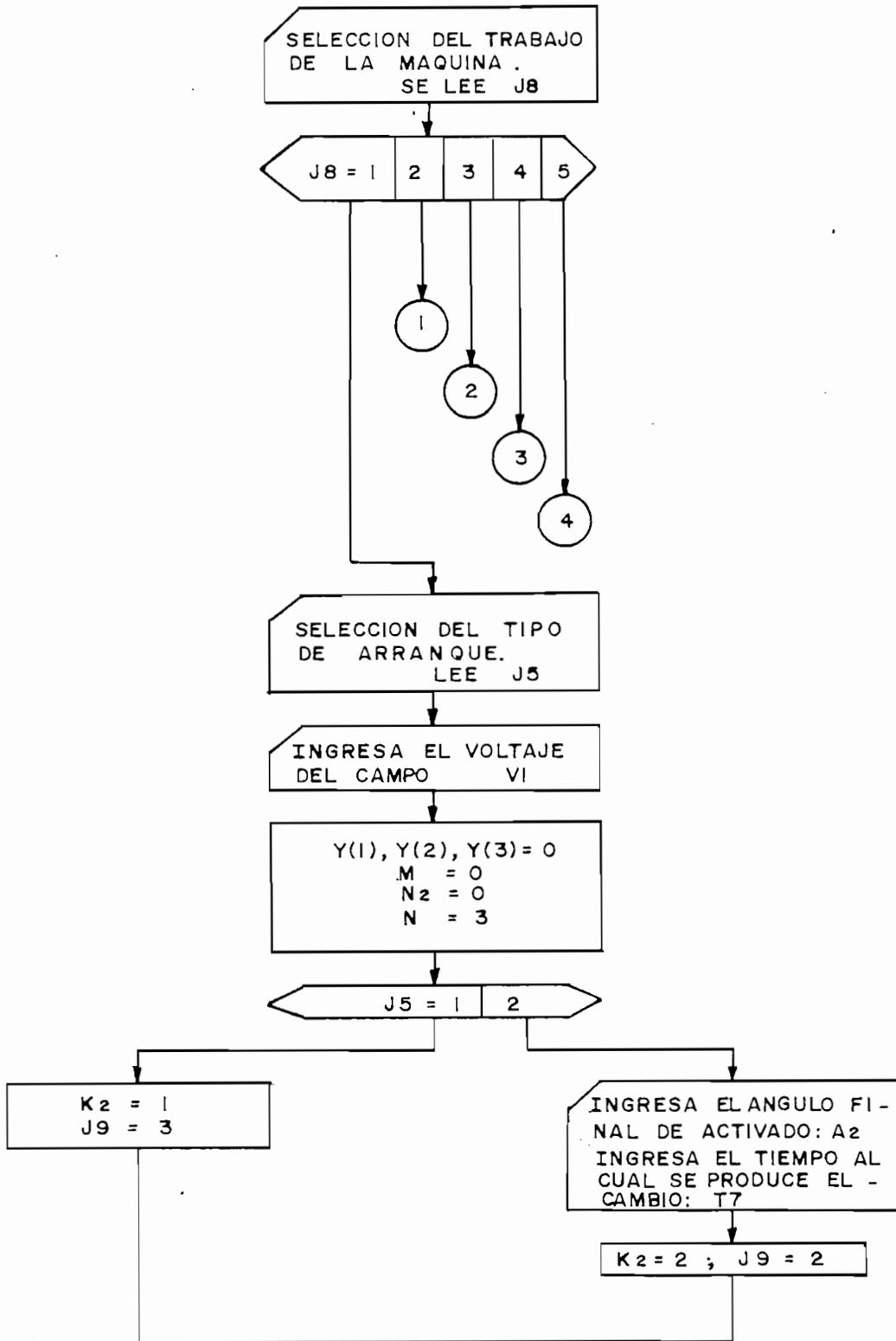
Cambio de Giro (J8 = 5).- Se define primeramente la variable J6, la cual toma el valor de 1 para el caso de cambio de giro con inversión en el campo y, 2 para el caso de inversión en la armadura. además se definen las mismas variables y se ingresan los mismos valores anteriores; se tendrá para éste caso, K2 = 4 con lo que se carga el subprograma MOTOR4 y K6 = 1 lo que sirve para invertir el torque de carga una vez que la velocidad se ha invertido.

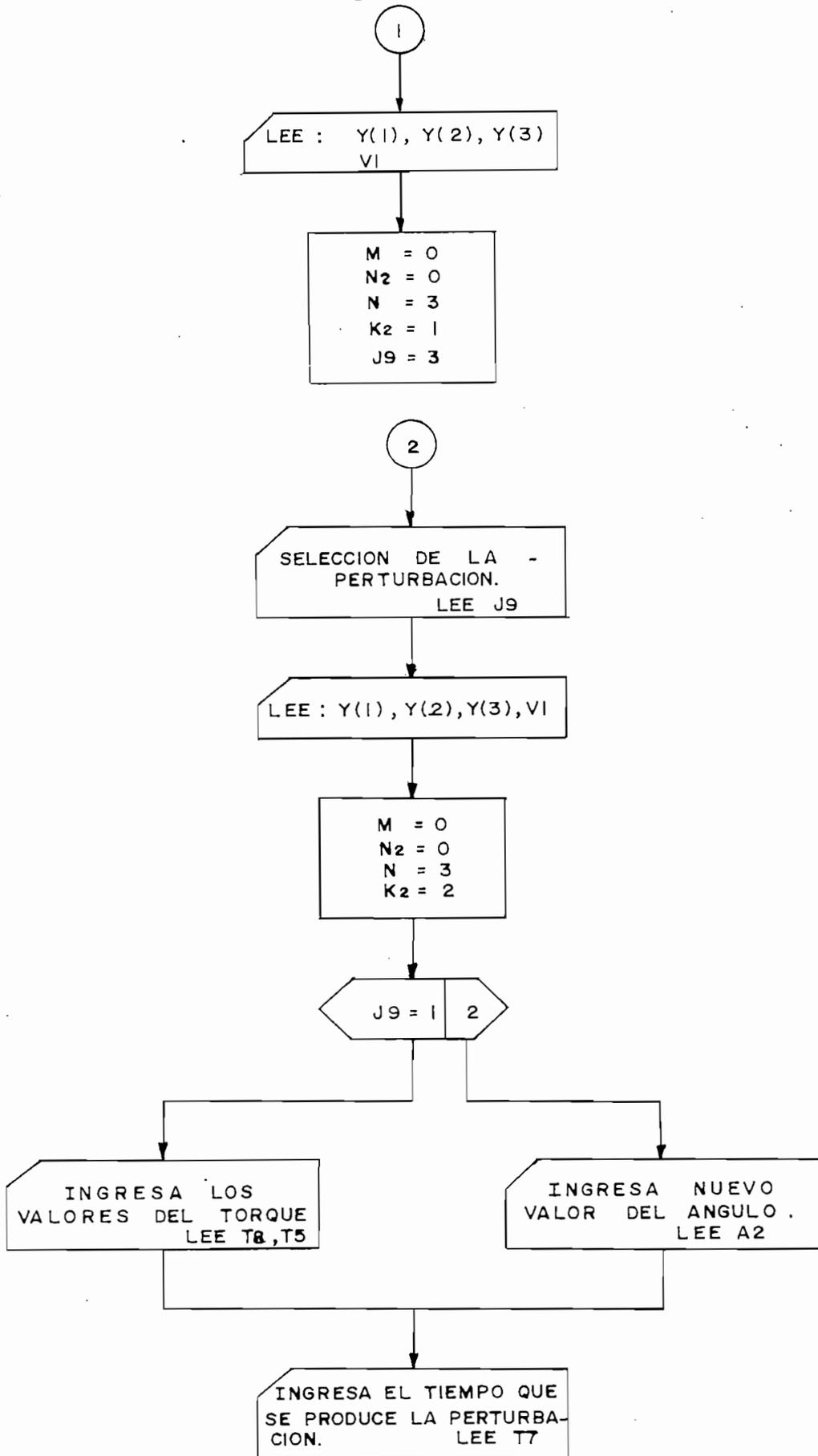
Todo lo expuesto para éste subprograma se lo puede resumir en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3.

PARA EL CASO DE TENER:					
J5	J6	J7	J8	J9	
1	X	X	1	3	Arranque con cualquier ángulo (se carga MOTOR1)
2	X	X	1	2	Arranque con cambio de ángulo (se carga MOTOR2)
X	X	X	2	3	Estado Estable (se carga MOTOR1)
X	X	X	3	1	Perturbación en el torque (se carga MOTOR2)
X	X	X	3	2	Perturbación en el ángulo (se carga MOTOR2)
X	X	1	4	3	Parada con inversión de campo (se carga MOTOR3)
X	X	2	4	3	Parada con desconexión de armadura (se carga MOTOR3)
X	X	3	4	3	Parada con inversión de armadura (se carga MOTOR3)
X	1	X	5	3	Cambio de giro con el campo (se carga MOTOR4)
X	2	X	5	3	Cambio de giro con la armadura (se carga MOTOR4)

X: Esta variable no ha sido definida en éste punto





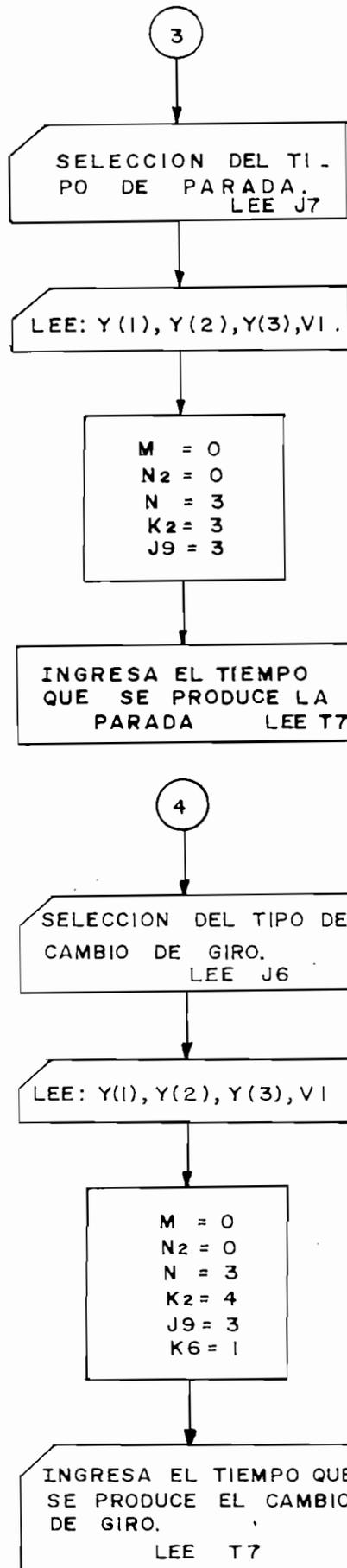


Figura 3.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SUBPROGRAMA FUNCION

3.4. FUENTES DE ALIMENTACION.-

Dentro de las fuentes que pueden alimentar la armadura del motor, se tienen tres convertidores duales, los cuales son seleccionados de acuerdo al valor con la que se define la variable J3 (ver cuadro 3.2.)

3.4.1. COND2TP (Convertidor dual monofásico tipo puente).-

Con éste subprograma se ingresan los siguientes valores:

VØ Voltaje RMS de alimentación de la red

FØ Frecuencia de la red

A1 Angulo de retardo de los tiristores

NØ Número de puntos que se desea calcular

N1 Número de puntos por intervalo de conducción, es decir, el número de intervalos en que se va a dividir el período de la onda de voltaje que alimenta al motor

Y se definen las siguientes variables:

$V_{\text{Ø}} = \sqrt{2} V_{\text{Ø}}$ Voltaje pico

$W = 2 \cdot \text{PI} \cdot F_{\text{Ø}}$ Frecuencia angular

$D_{\text{Ø}} = \text{Ø}$ Contador del número de períodos

$K_{\text{Ø}} = \text{Ø}$ Seleccionador de la función sinusoidal que se aplica a la máquina

$A1 = A1 \cdot \text{PI} / 180$ Angulo de activado expresado en radianes

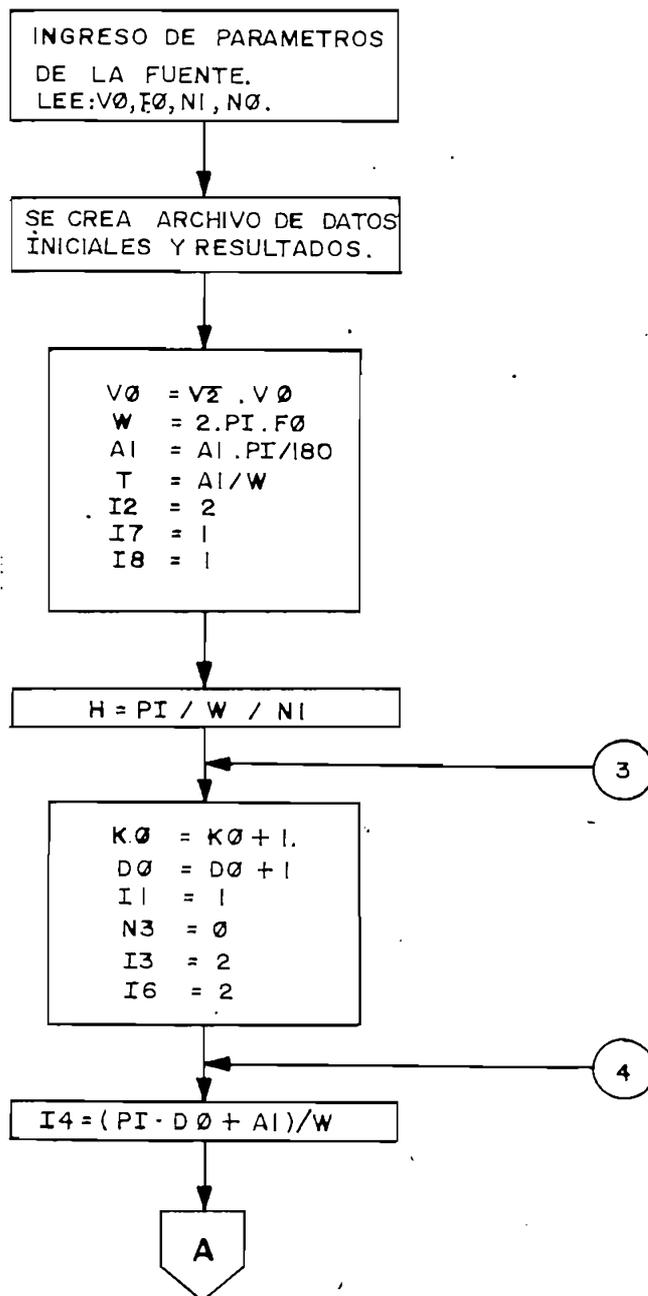
$I2 = 2$ Bandera que se utiliza para calcular un paso de integración más, luego de una conducción discontinua

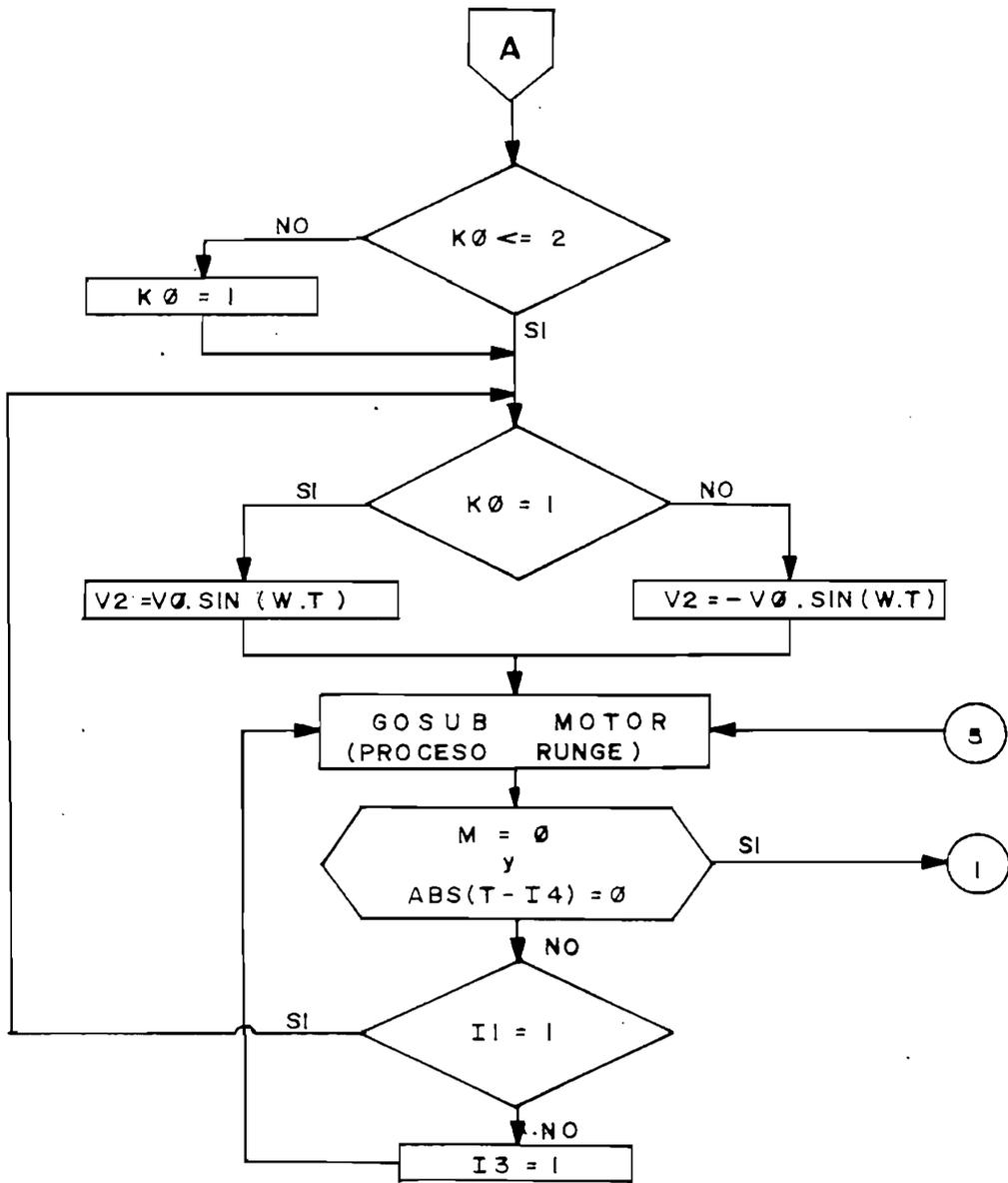
$T8 = 1$ Bandera que permite cambiar una sola vez el ángulo de activado

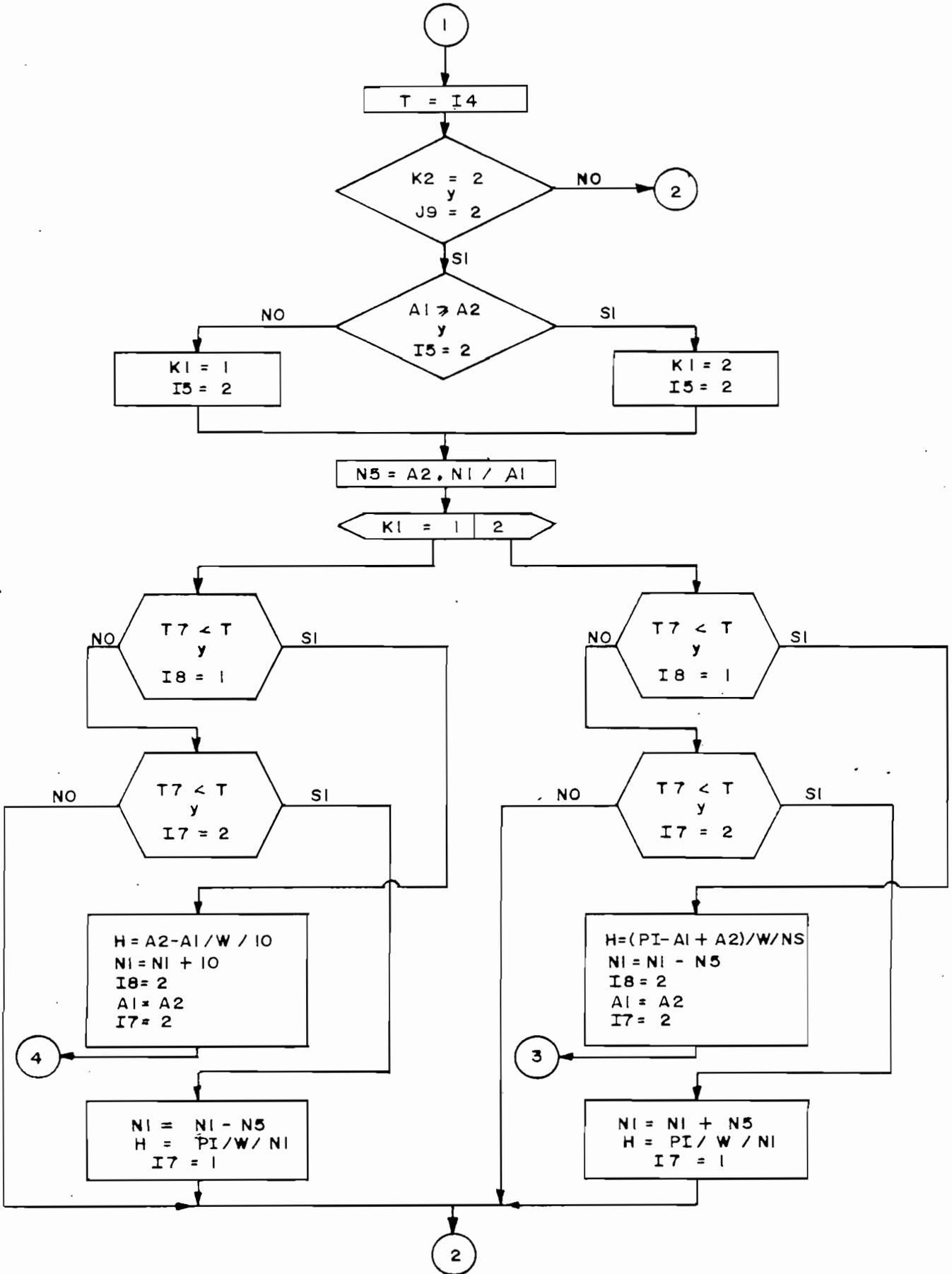
I7 = 1

Bandera con la que se regresa al intervalo de integración original, una vez cambiado el ángulo de activado

Una vez ingresado los valores y definidas las variables así como las banderas, se inicia la simulación, para ésto se presenta la figura 3.3. el diagrama de flujo de éste subprograma.







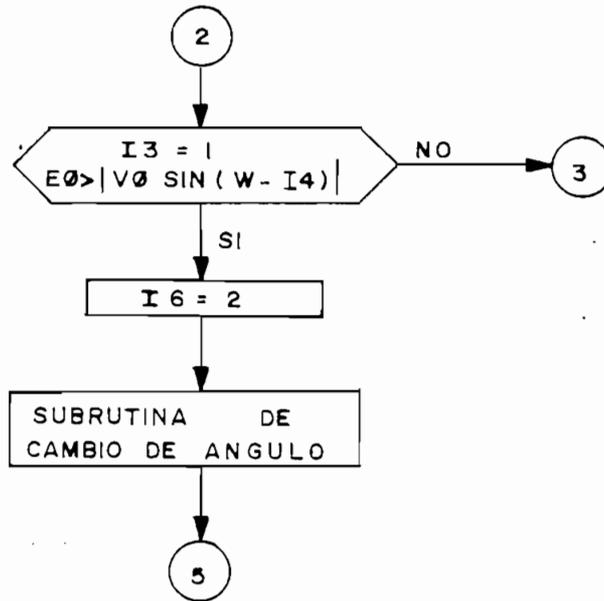


Figura 3.3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SUBPROGRAMA COND2TP

Como se mencionó en la introducción, el presente trabajo es una continuación de la tesis "MODELACION DIGITAL DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA ALIMENTADA POR CIRCUITOS A TIRISTORES" (1), por lo tanto se dará una mayor atención a las modificaciones realizadas en el presente trabajo.

Cuando se cumple la condición $K2 = 2$ y $J9 = 2$, implica que se quiere analizar a la máquina cuando sobre ella se realiza un cambio en el ángulo de activado de los tiristores que componen el conversor dual que alimenta la armadura. Este cambio puede ser a su vez, de un ángulo inicial $A1$ menor de activado, a un ángulo final $A2$ mayor ó viceversa; para ambos casos se define la variable $N5$ como:

$N5 = A2 \cdot N1 / A1$ Da el número de intervalo que se aumenta o disminuye en la división de la onda de voltaje

Para el caso de que no se cumpla $A1 > A2$, se tiene que cuando se produce el cambio de ángulo (en el tiempo $T7$), se debe retardar el pulso de activado, para ello se incrementa el número de puntos por intervalo de conducción $N1$ y se define un nuevo intervalo de integración, como se puede ver en la figura 3.4.

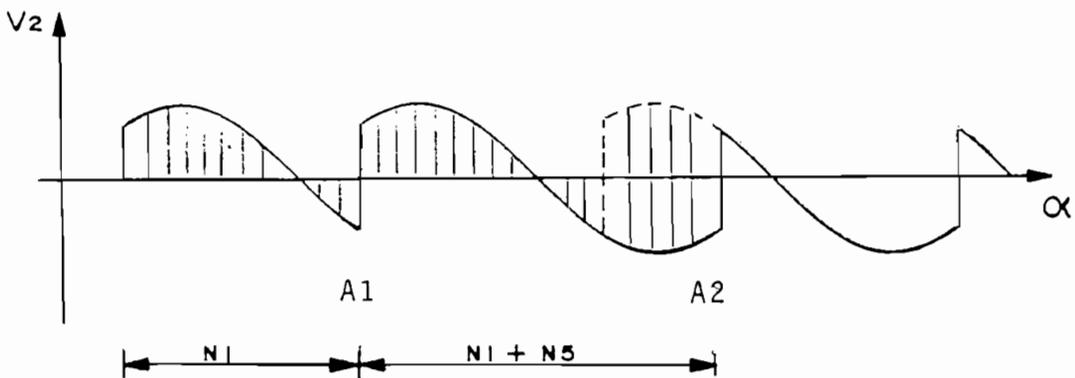


Figura 3.4. CAMBIO DE UN ANGULO MENOR A MAYOR

Una vez producido el cambio se regresa a las condiciones iniciales, y se sigue el proceso de integración.

Un caso similar se tiene cuando el cambio de ángulo se hace de un valor mayor a un valor menor, con la diferencia que en vez de retardar el pulso de activado al producirse el cambio, se hace un adelanto en el pulso, para lo cual se disminuye el número de puntos por intervalo de conducción, como se puede ver en la figura 3.5.

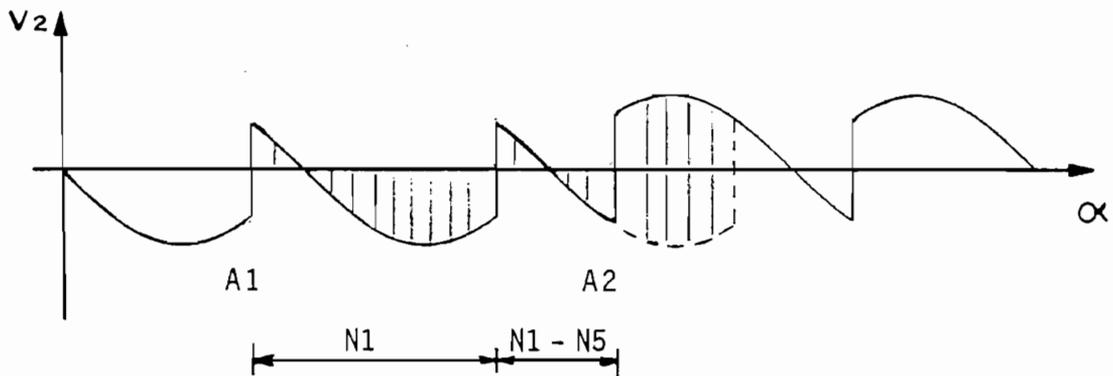


Figura 3.5. CAMBIO DE UN ANGULO MAYOR A MENOR

El control que se ha simulado sobre los cambio en el ángulo de activado de los tiristores, viene a ser una primera aproximación, de lo que en la realidad sería un sistema electrónico para arranque controlado, en los que el ángulo de activado va cambiando en pasos regresivos hasta alcanzar las condiciones de trabajo requeridas.

3.4.2. COND3MO (Conversor dual trifásico de media onda).-

Para simular ésta fuente, se tiene el mismo subprograma anterior, con la diferencia que para éste caso se tendrá:

$T = (A1 + \text{PI}/G/W$	Tiempo inicial del proceso Runge-Kutta
$K\emptyset$	Puede valer 0, 1, 2, 3
$I4 = (\text{PI}/6 \cdot (1 + 4 \cdot D\emptyset) + A1)/W$	Tiempo de disparo del próximo tiristor
$H = 2 \cdot \text{PI}/3/W/N1$	Intervalo de integración

3.4.3. COND3TP (Convertor dual trifásico tipo puente).-

Para éste caso las diferencias serán:

$K\emptyset$ Puede valer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6

$I4 = (PI/6 \cdot (1 + 2 \cdot D\emptyset) + A1)/W$ Tiempo de disparo del próximo tiristor

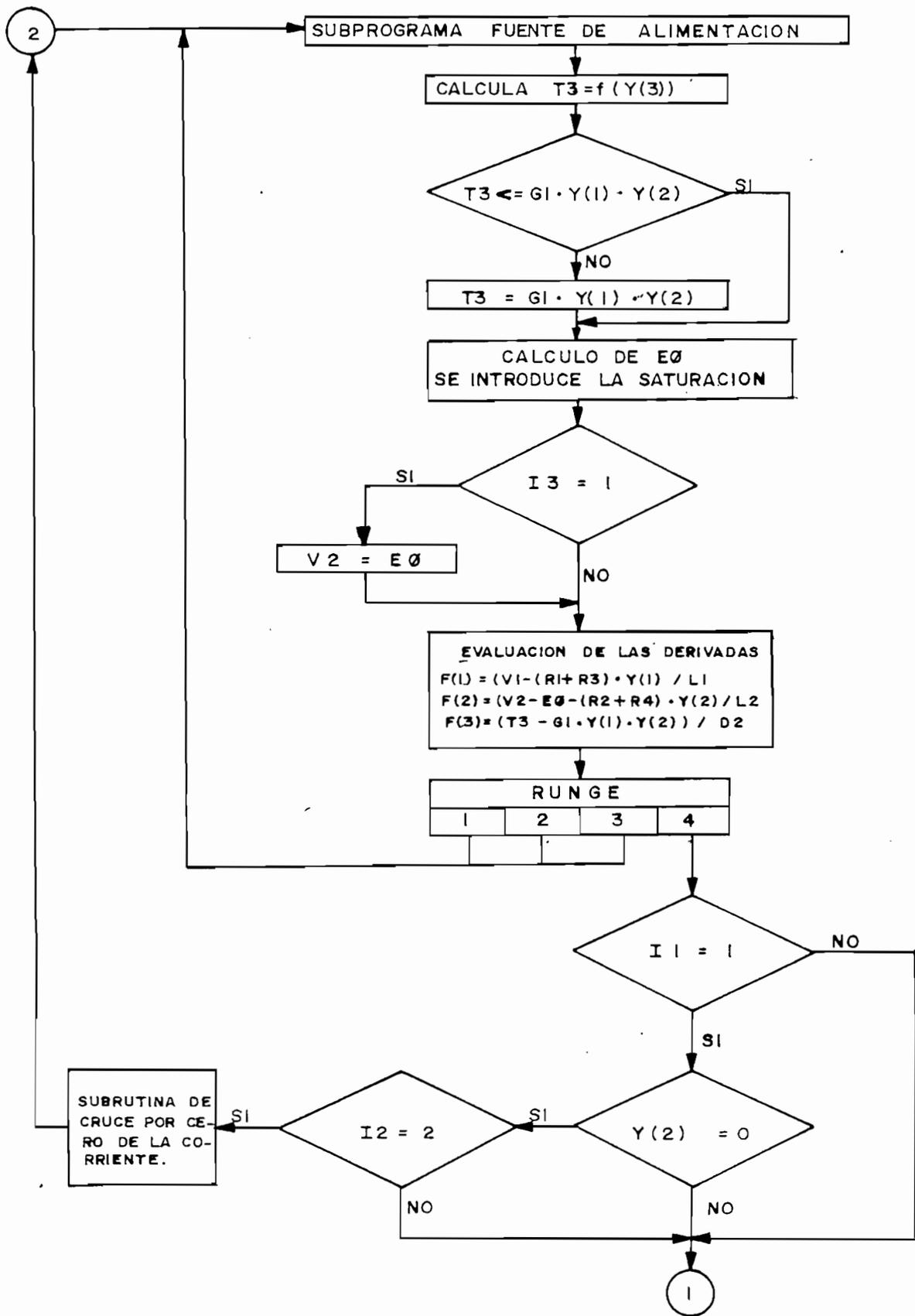
$H = PI/3/W/N1$ Intervalo de integración

3.5. MOTOR D.C.-

Para realizar la modelación de la máquina se utilizan los subprogramas MOTOR#, los mismos que son cargados en la memoria del computador, dependiendo del valor de la variable K2 (ver cuadro 3.1.)

En cada uno de éstos subprogramas se encuentra el proceso iterativo Runge-Kutta, el modelo matemático que representa al motor, las condiciones que imponen a la corriente de armadura y el almacenamiento de datos en archivo. Además se simula el efecto de la saturación magnética y la actualización del valor de la inductancia rotacional, y la carga rotacional.

3.5.1. Motor1.- Este subprograma es utilizado para el caso de que se quiera simular, un arranque con cualquier ángulo fijo ó un estado estable. El diagrama de flujo es presentado en la figura 3.6.



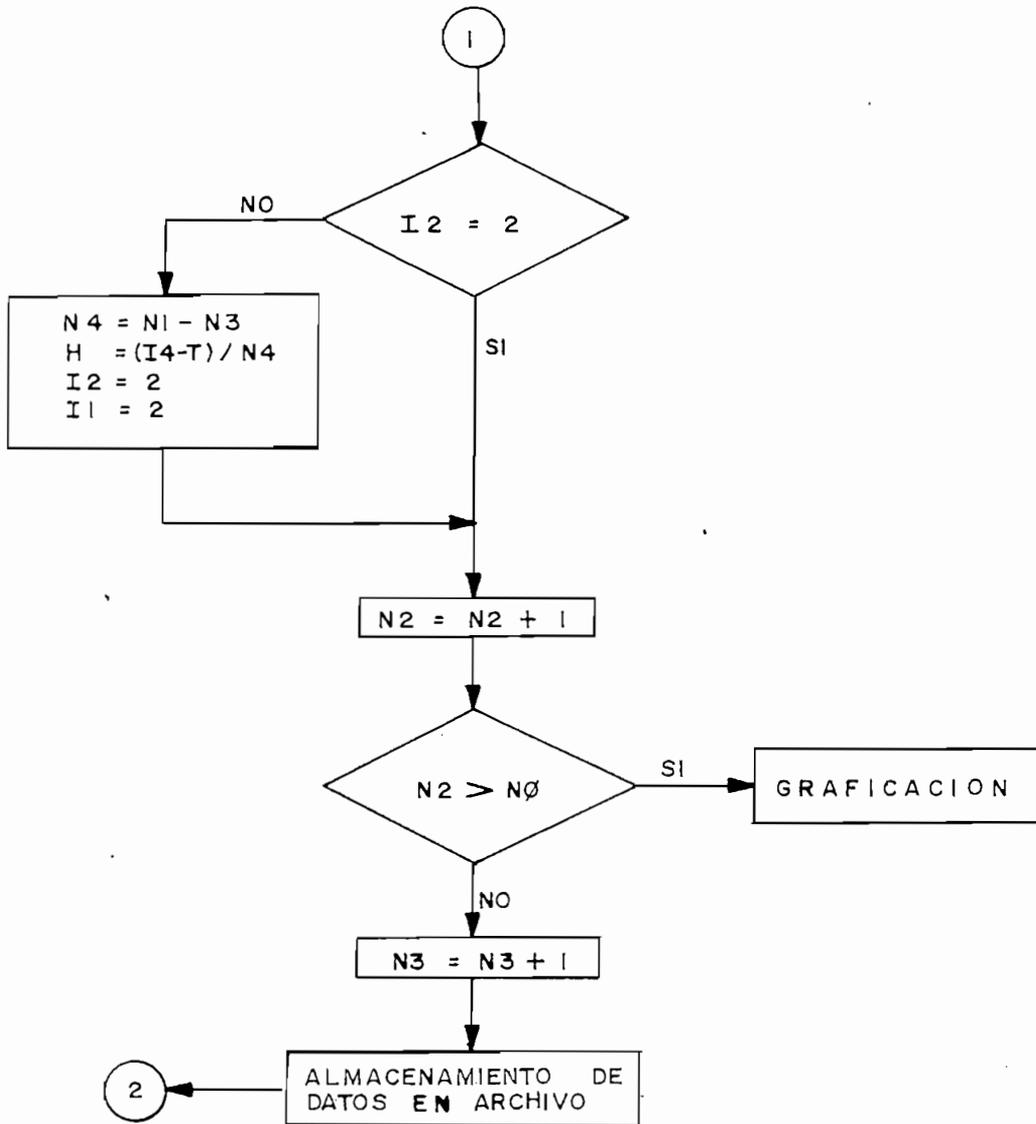


Figura 3.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SUBPROGRAMA MOTOR1

Del subprograma que simula la fuente de alimentación se llega a éste otro subprograma como a una subrutina. Se empieza con el cálculo de la carga, la misma que es una carga rotacional del tipo: $B\omega + K$, donde B representa el coeficiente de fricción viscosa y K el torque constante pues

to en el eje, luego se pasa a la subrutina que calcula el voltaje inducido, para lo cual se toma en cuenta la corriente de campo que se tiene en ese instante y se aplica una de las tres funciones lineales a la que se ha aproximado la curva de magnetización, se tiene además que en esta subrutina, se actualiza el valor de la inductancia rotacional, dependiendo así mismo, en cual de las aproximaciones lineales de la curva se encuentre.

Posteriormente, se pregunta por el estado de la bandera I3, que es la que determina el tipo de voltaje con el cual se debe alimentar al motor, es decir, que para el caso de conducción continua se alimenta con el voltaje de la fuente y en conducción discontinua se alimenta con el voltaje inducido.

Luego de evaluar las derivadas, se entra en el primer paso del proceso Runge-Kutta y se regresa al subprograma de la fuente de alimentación. Esta lógica se repite cuatro veces, tomando en cuenta que al llegar al proceso Runge-Kutta se va a un paso distinto. Una vez terminado el último paso, se pregunta si existió conducción continua, en cuyo caso se averigua si la corriente calculada es negativa, y en el caso de cumplirse ésta segunda condición, se ejecuta la subrutina de cruce por cero de la corriente, en la que se encuentra aproximadamente el instante en que la corriente de armadura cruzó por cero.

Por otro lado una vez que se pasa por la subrutina de cruce por cero, la bandera I2 toma el valor de 1 con lo cual

se podrá calcular el nuevo intervalo de integración.

El próximo paso a seguir, es el incremento del número de puntos calculados y del número de puntos que se han calculado desde el inicio del período de posible conducción hasta el fin del mismo, con lo cual, con la ayuda de éste segundo contador, se podrá determinar cuantos puntos se han calculado hasta el momento en que la corriente de armadura cruza por cero, por lo tanto, se sabrá cuantos puntos faltan para completar el período, e implícitamente definir el nuevo intervalo de integración.

Por último, se almacenan los datos en un archivo de resultados.

3.5.2. Motor2.- Este subprograma será cargado para simular las perturbaciones, y para el arranque con cambio de ángulo durante el proceso.

Básicamente éste subprograma es igual al MOTOR1, con la diferencia que se incluye la perturbación en el torque de carga, una vez que se cumpla la condición de que el tiempo de perturbación $T7$ sea menor al tiempo de integración. Por otro lado, en el caso de que se esté en un cambio de ángulo el programa corre con los mismos pasos que el MOTOR1, ya que éste caso particular de simulación se lo ejecuta en el subprograma de la fuente de alimentación

Por lo tanto, en la figura 3.7. se presenta en diagrama de flujo solo el bloque de perturbación que se in-

cluye, ya que todo el resto fue explicado en el subprograma anterior.

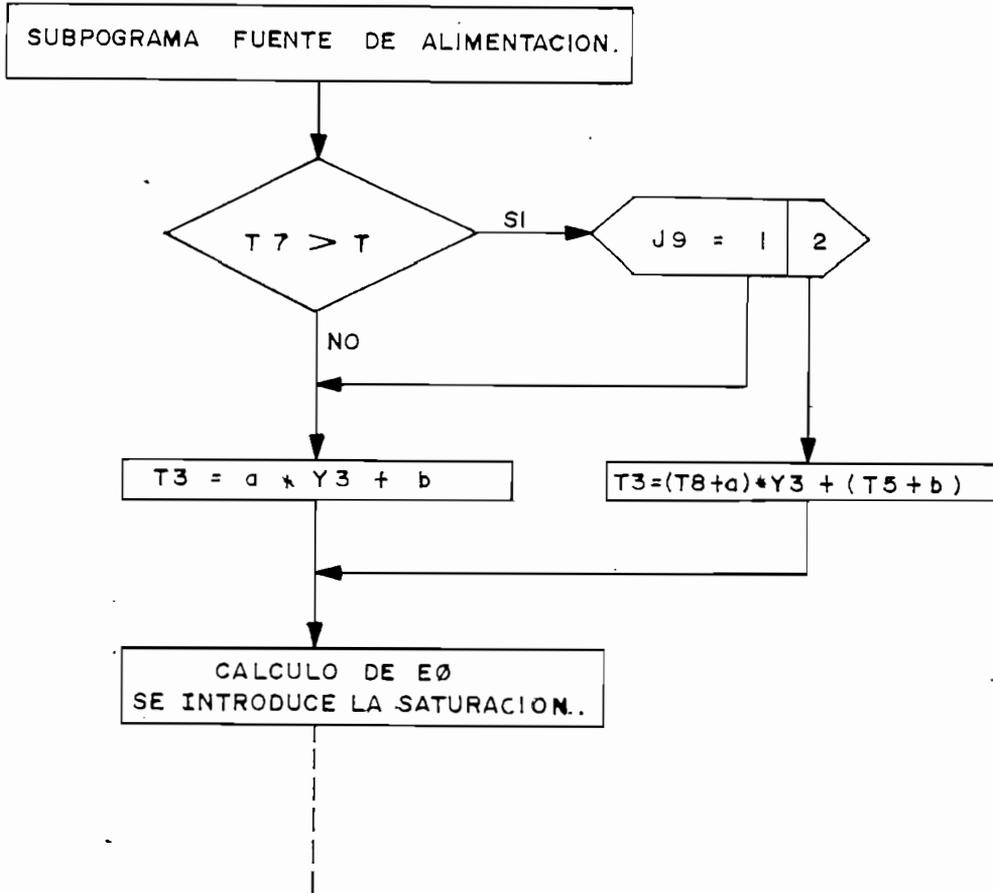


Figura 3.7. DIAGRAMA DE FLUJO QUE SE INCLUYE EN MOTOR2 PARA LAS PERTURBACIONES

3.5.3. Motor3.- Subprograma utilizado para simular las paradas. Al igual que para el subprograma anterior, éste toma como base al subprograma MOTOR1, incluyendo ciertas instrucciones que permitan simular los tres tipos de paradas.

Para los casos de parada con inversión de campo y con

desconexión de la armadura, se tiene únicamente, que al cumplirse la condición de que el tiempo de parada $T7$ sea menor al tiempo de integración, se tendrá que al regresar del subprograma de la fuente de alimentación se invertirá el valor de la fuente del campo $V1$ ó el valor de la fuente de alimentación $V2$ será reemplazado por el valor del voltaje inducido es $E\emptyset$, respectivamente, haciendo que las ecuaciones sean evaluadas para éstas dos nuevas condiciones.

Para el caso de estar con parada con inversión de armadura, el caso se hace un poco diferente, debido a que el programa fue elaborado originalmente para que trabaje con rectificadores unidireccionales y no con conversos duales, es decir no se permitía la inversión de la corriente de armadura. Por lo tanto, ya que para la simulación además de invertirse el voltaje de armadura $V2$, se hace un ajuste en la subrutina de cruce por cero de corriente, debido a que se debe ir a ésta subrutina cuando la corriente pase de positiva a negativa y para el caso inverso, además, el hecho de que la corriente pase por cero al invertirse la fuente, no deberá ser tomado por el programa como una conducción discontinua, para lograr éste objetivo se utilizan banderas adicionales cuyo valor dependerá del estado de trabajo.

Además, se tiene que para los tres casos de parada, el programa termina sus cálculos solo cuando la velocidad

se haga cero. sin importar el número de puntos a calcularse definidos al inicio del programa fuente. Por último, se tiene como una diferencia adicional con respecto al MOTOR1, el hecho de que la subrutina que encuentra el tiempo aproximado en que la corriente de armadura pasa por cero, es originalmente, una aproximación a una función cuadrática, con la que se tiene una buena aproximación. Pero para el MOTOR3, cuando se quiere simular una parada con inversión en la armadura, se tiene que la pendiente de la corriente se aproxima a casi una recta perpendicular, lo que hace que la aproximación cuadrática produzca errores de cálculo; la solución a éste problema se la consiguió haciendo el cálculo del tiempo en que la corriente pasa por cero, por medio de una aproximación a una función lineal, la misma que se la utiliza solo para el caso mencionado, ya que para los otros dos tipos de parada se utiliza la aproximación cuadrática original, además, se incluye el hecho de que al hacer la aproximación lineal el error que se tiene es insignificante debido a que en la realidad, al invertirse el voltaje de armadura, la pendiente con que baja la corriente es de casi 90°.

3.5.4. Motor4.- Este subprograma tiene las mismas consideraciones en cuanto se refiere a la inversión de campo y a la de armadura, hechas en el subprograma MOTOR3, con la única diferencia de que éste programa no detie-

ne su ejecución para cuando la velocidad pasa por cero y, se invierte el torque de carga para cuando la máquina cambia su sentido de giro.

Por último, se tiene el subprograma gráfico, el mismo que es una subrutina que se posee como biblioteca y, con cambios apropiados para la conveniencia de éste trabajo, sirve justamente para la presentación gráfica de los resultados obtenidos en los programas anteriores.

Cabe añadir el hecho de que todos los programas presentados, fueron elaborados con suficientes comentarios que permiten fácilmente entender los listados de los mismos, así como de mensajes que ayudan al usuario.

C A P I T U L O I V

PRUEBAS EXPERIMENTALES Y COMPROBACION DE RESULTADOS

Para comprobar la validez del programa, fue necesario el diseño y la construcción de un conversor monofásico controlado tipo puente, el mismo que se presenta en detalle en el Apéndice C, así como la utilización de la Máquina Generalizada Westinghouse cuyos datos de placa, parámetros y características se encuentran en el Apéndice A.

Las pruebas tanto experimentales como de simulación realizadas fueron:

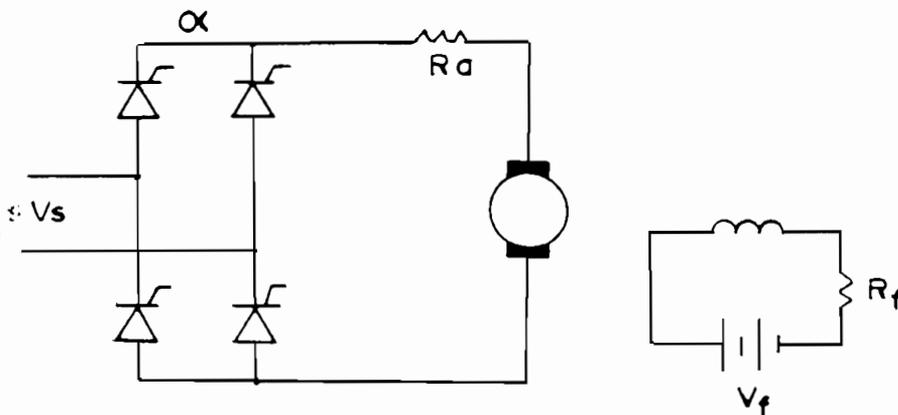


Figura 4.1. CIRCUITO EXPERIMENTAL

donde:

V_s = Voltaje de alimentación del conversor.

V_f = Voltaje de campo.

R_a = Resistencia en serie con la armadura.

R_f = Resistencia en serie con el campo.

α = Angulo de activado de los tiristores.

4.1. ARRANQUE.-

4.1.1. Arranque con Cualquier Angulo Fijo.-

Las condiciones tomadas para las pruebas de la simulación y para las experimentales fueron:

-Voltaje de campo (V_f)	22 volt (DC)
-Resistencia de arranque con el campo (R_f)	1.8 ohm
-Voltaje de alimentación del conversor (V_S)	118 volt (RMS)
-Angulo de activado de los tiristores (α)	120°

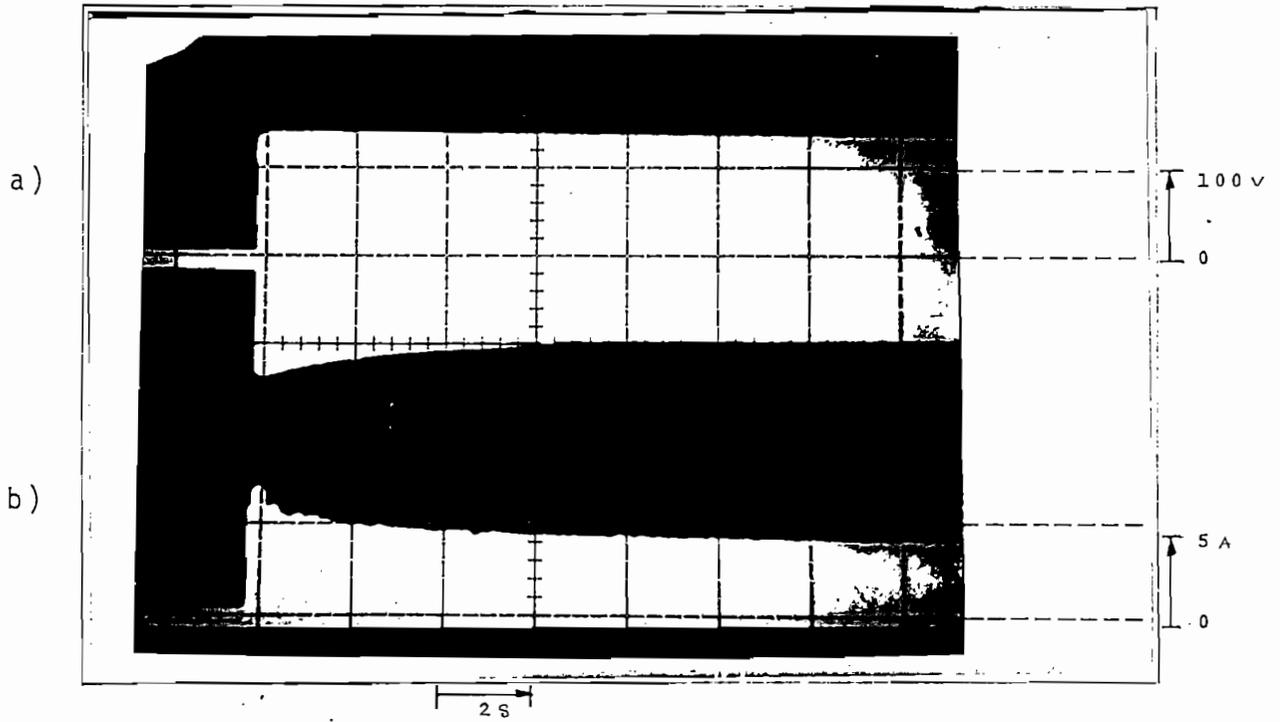
Para ésta prueba, se realiza el arranque en vacío y, la resistencia de arranque en la armadura (R_a) es cero, ya que el pico de la corriente es limitada con el ángulo de activado de los tiristores de la fuente.

Las fotografías # 1 y # 2 presentan las formas de onda de voltaje y corriente de armadura y, las de velocidad y corriente de armadura respectivamente; mientras que los gráficos 4.1., 4.2., 4.3. y 4.4. presentan los resultados de la simulación para la corriente de campo, corriente de armadura, velocidad y voltaje de armadura respectivamente.

Al hacer la comparación numérica de los valores de las fotografías y de los gráficos, se tiene:

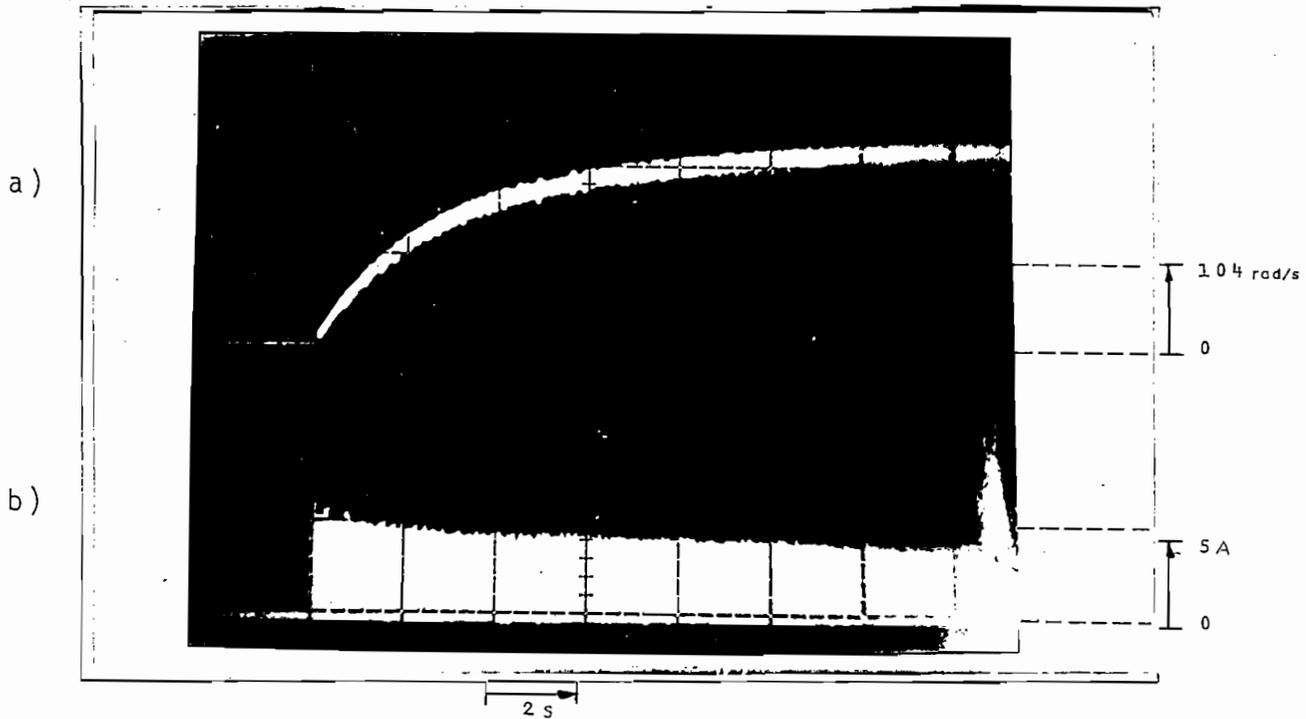
	FOTOS	GRAFICOS
Valor máximo del voltaje en el arranque	140 V	130 V
Valor mínimo del voltaje en el arranque	-140 V	-140 V
Pico de la corriente de arranque	5.5 A	4.2 A
Velocidad en el arranque	0.0	0.0
Pico de la corriente de armadura en 1.4 seg	4.5 A	3.28 A
Velocidad en 1.5 seg	45 rad/s	36.5 rad/s

Para éste caso se tiene que en la simulación, el campo es conectado al mismo tiempo que la armadura, mientras que para las puebas experimentales el campo ya ha sido estabilizado en su valor nominal para cuando la armadura se conecta.



Fotografía # 1.- ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$

- a) Voltaje de armadura
- b) Corriente de armadura



Fotografía # 2.- ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$

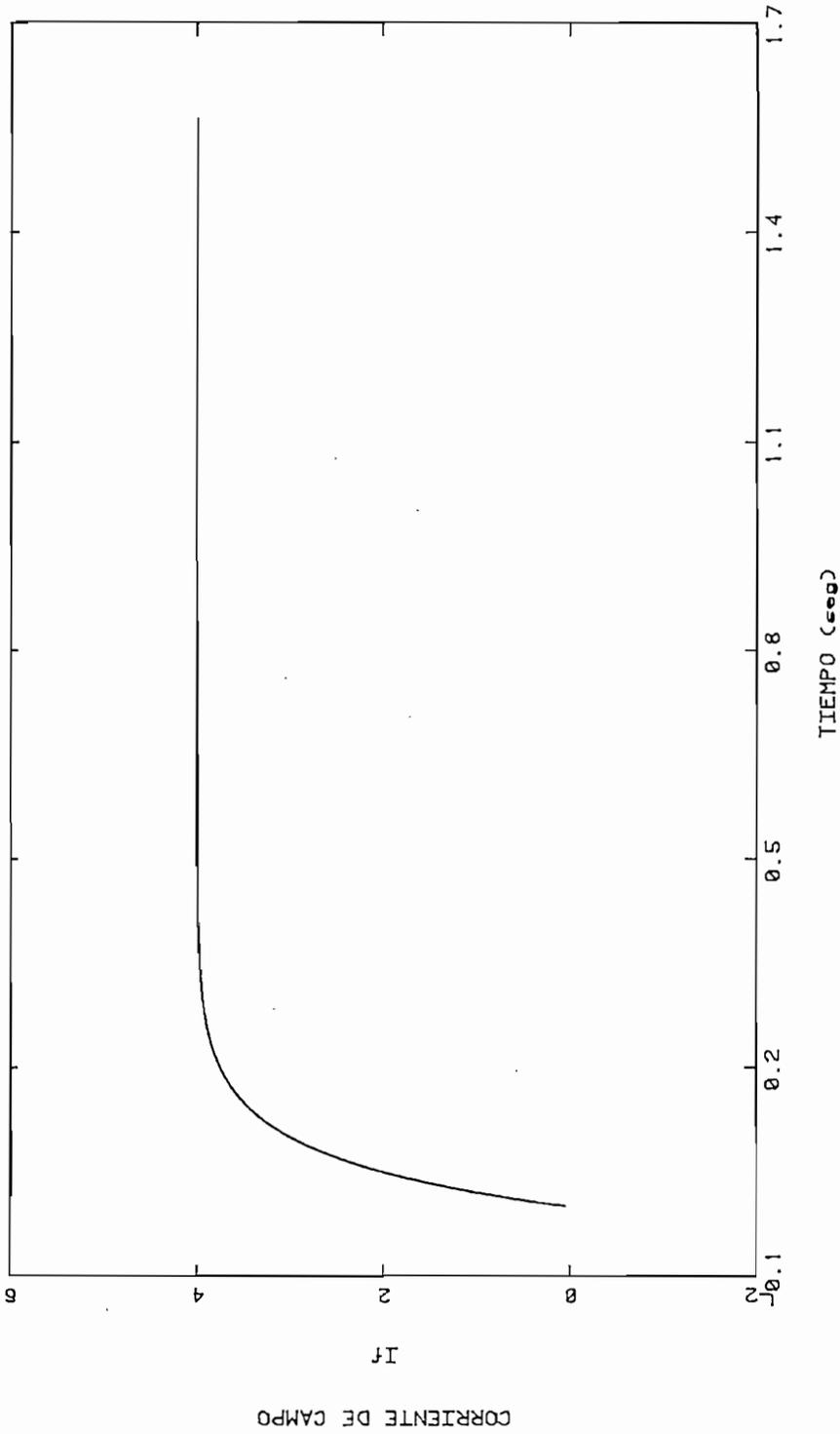


GRAFICO 4.1.

ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$
=====

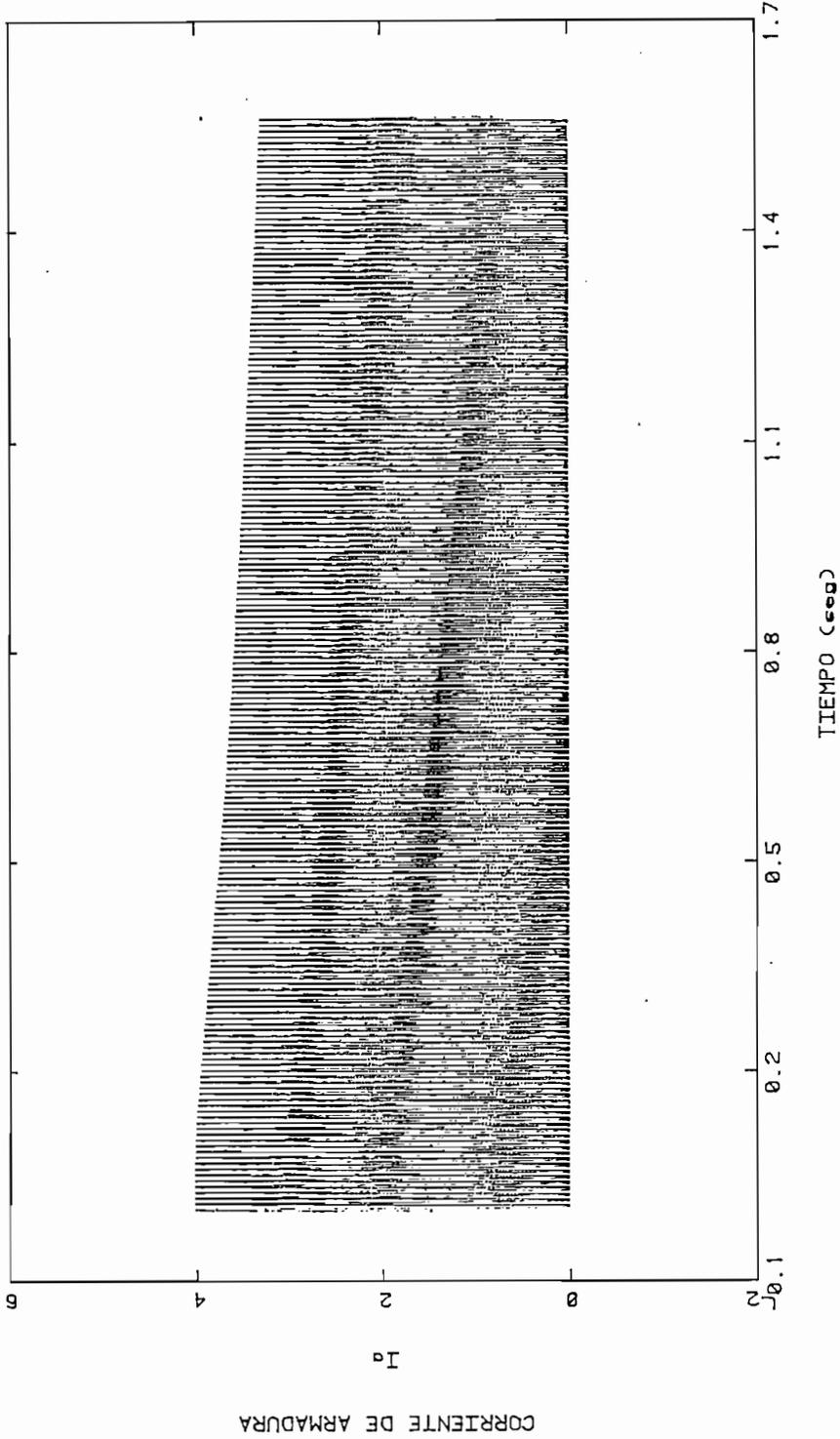


GRAFICO 4.2.

ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$
=====

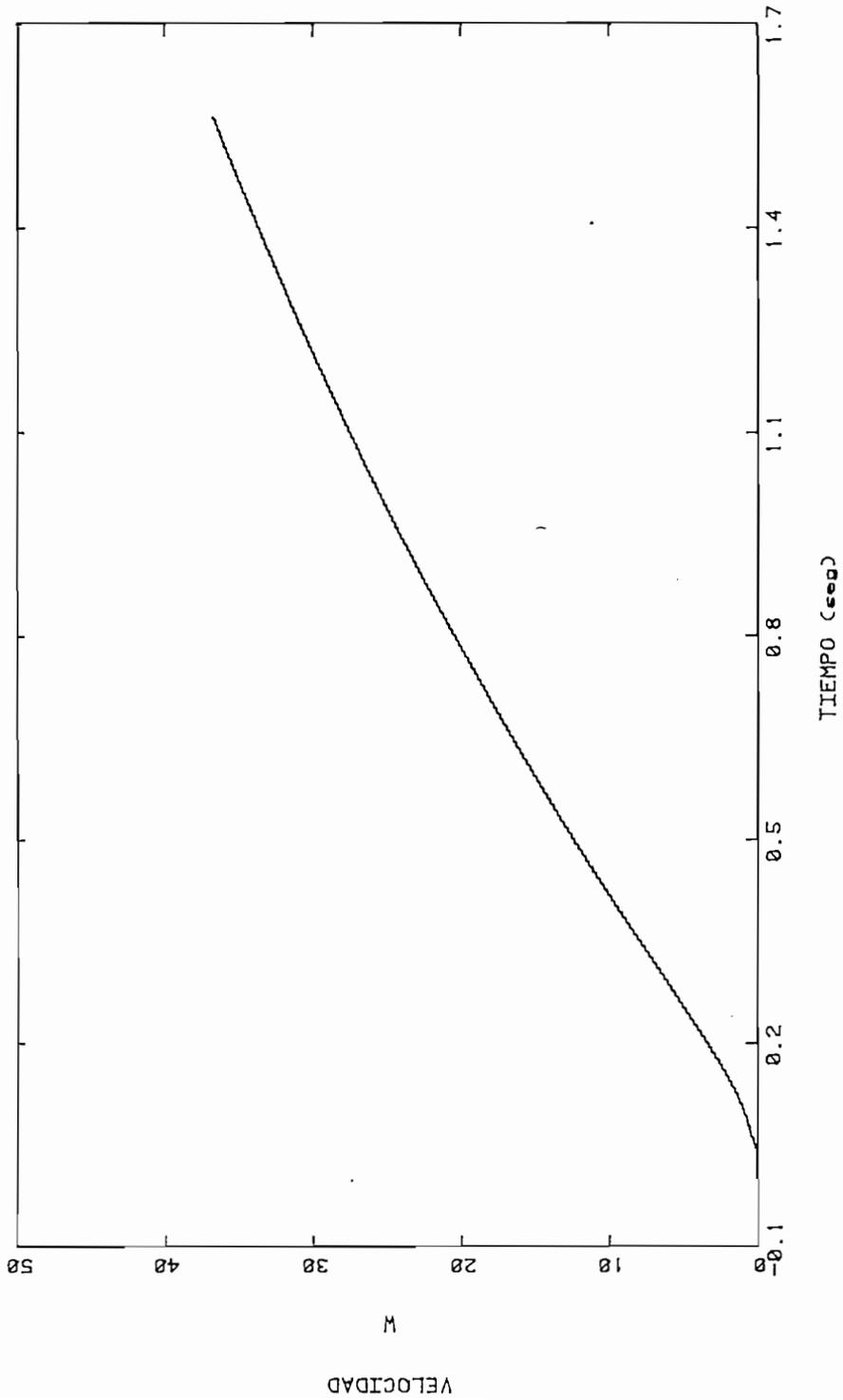


GRAFICO 4.3.

ARRANQUE CON $\alpha = 120^\circ$

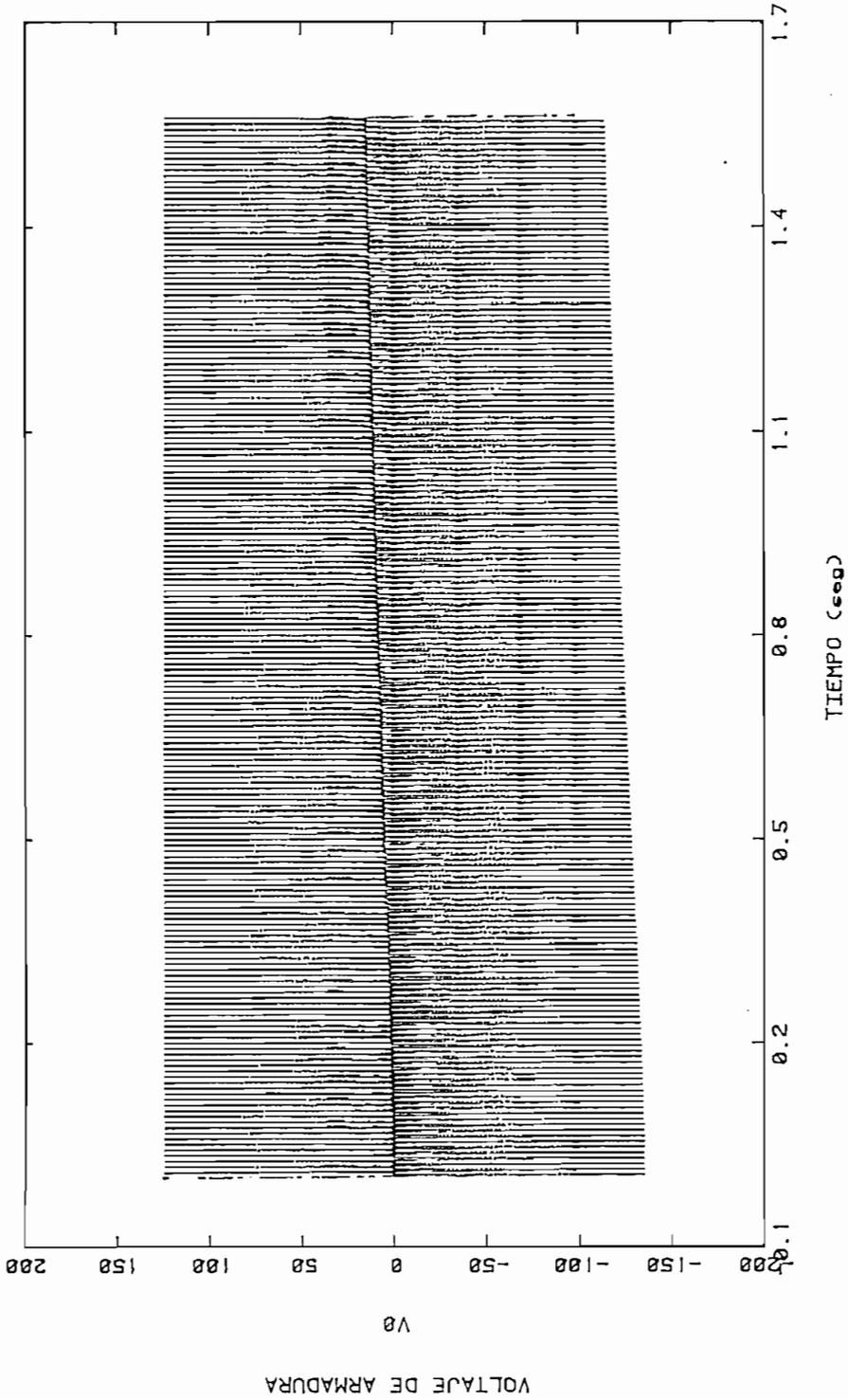


GRAFICO 4.4.

4.1.2. Arranque con Cambio de Angulo Durante el Proceso.-

Para ésta parte, debido a las limitaciones de circuito experimental, se presentan solamente los resultados gráficos, haciendo además la comparación de lo que sería el arranque con ángulo fijo y con cambio de ángulo dentro del proceso de arranque, en cuanto a los picos de corriente de armadura y a la forma de onda de la velocidad.

Los gráficos 4.5. y 4.6. presentan las formas de onda de corriente de armadura y velocidad para cuando el arranque se hace con un cambio, en función paso, desde un ángulo inicial de 120° a uno final de 60° ; mientras que los gráficos 4.7. y 4.8. presentan las mismas curvas, pero cuando el arranque es con un ángulo fijo de 60° .

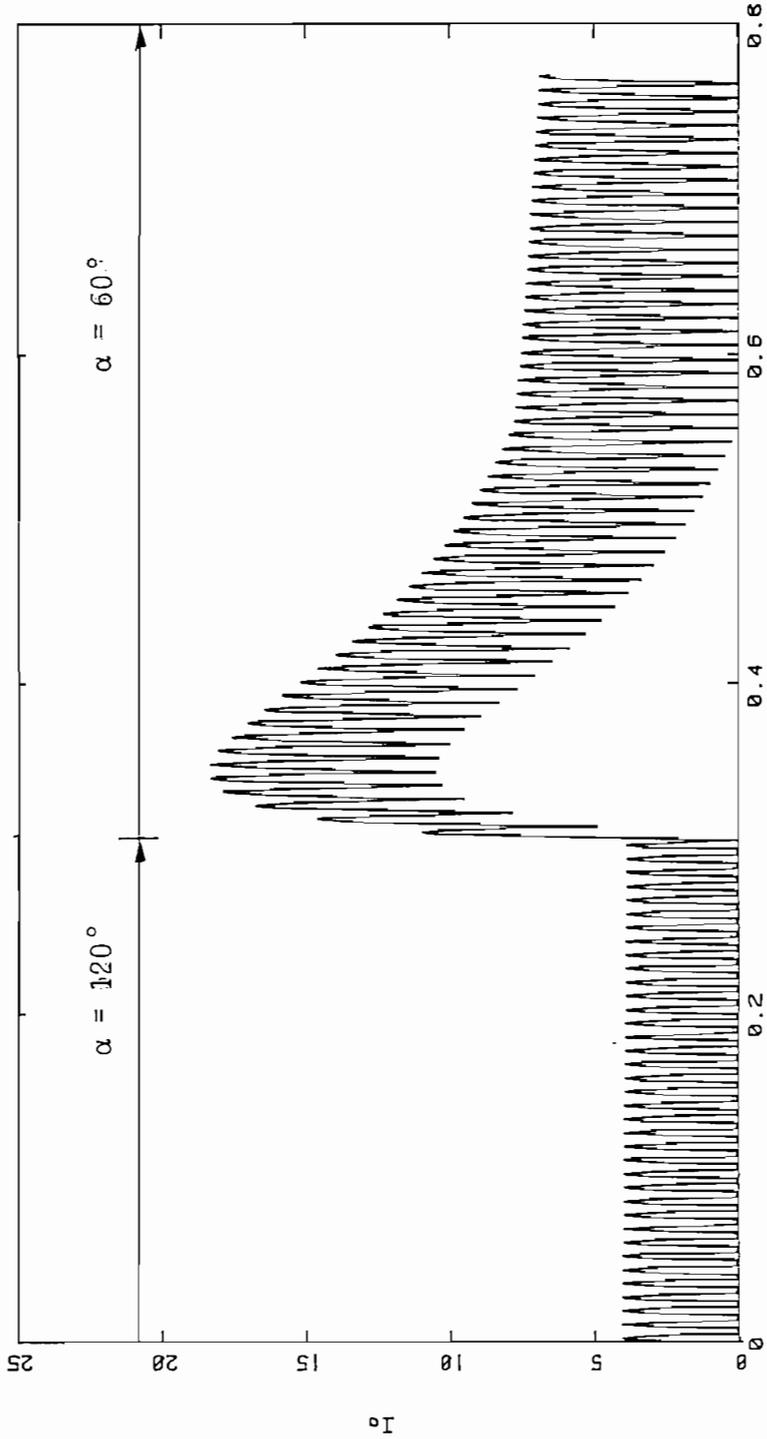
En cuanto a las demás condiciones tomadas para éstos dos casos, son iguales a las que se tenían en el numeral anterior.

Aquí se puede observar claramente el propósito principal de éstos circuitos estáticos, siendo éste el que se pueda controlar fácilmente la magnitud de los transitorios que se tienen en arranques de las máquinas eléctricas.

Comparando numéricamente se tiene:

	CON α FIJO	CON CAMBIO DE α
Pico máximo de la corriente de armadura	21 A	18.3 A
Velocidad a 0.8 seg.	146 rad/seg	121 rad/seg

ARRANQUE CON CAMBIO DE ANGULO DURANTE EL PROCESO



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.5.

CORRIENTE DE ARMADURA

ARRANQUE CON CAMBIO DE ANGULO DURANTE EL PROCESO

=====

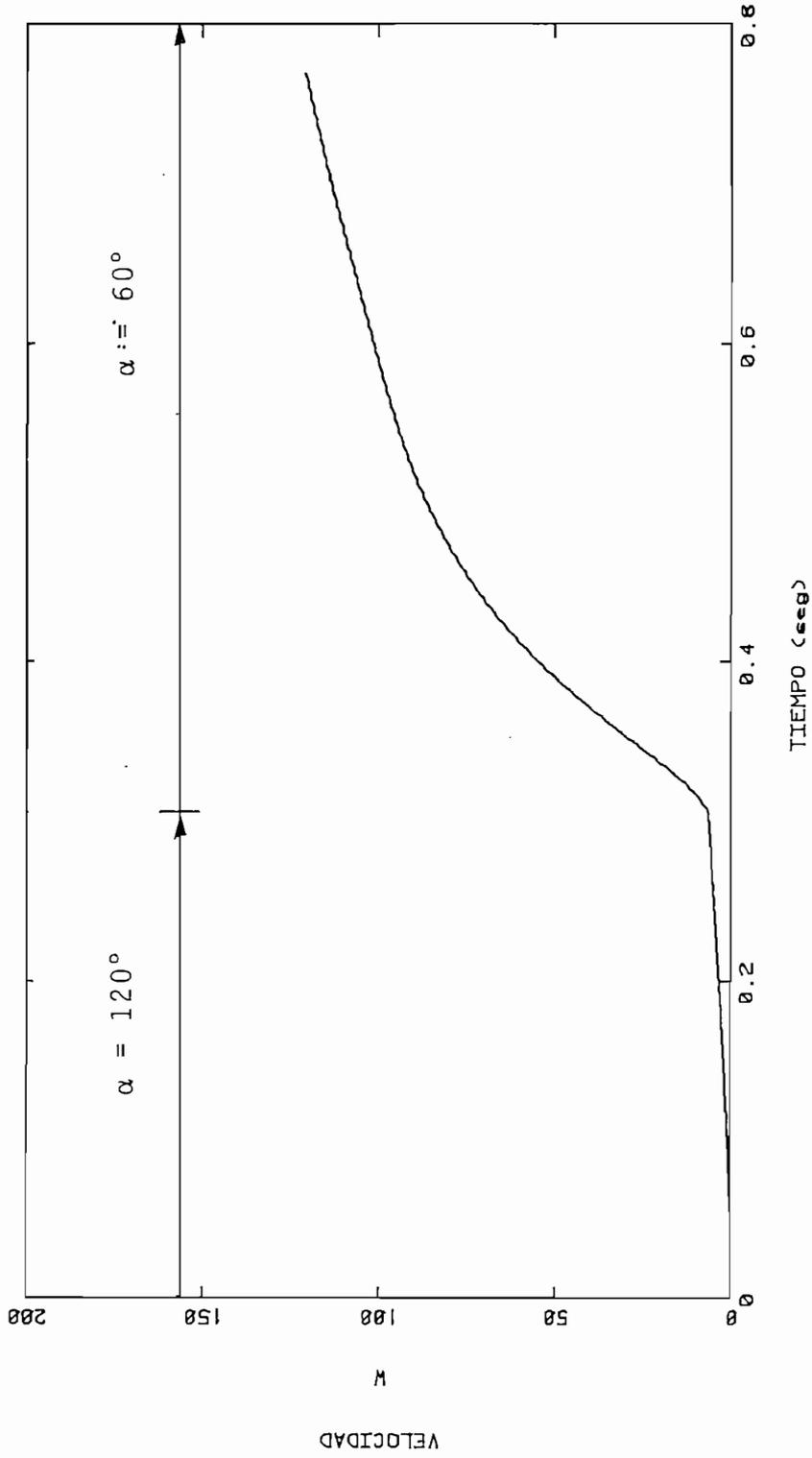


Gráfico 4.6.

ARRANQUE CON ANGULO FIJO ($\alpha = 60^\circ$)

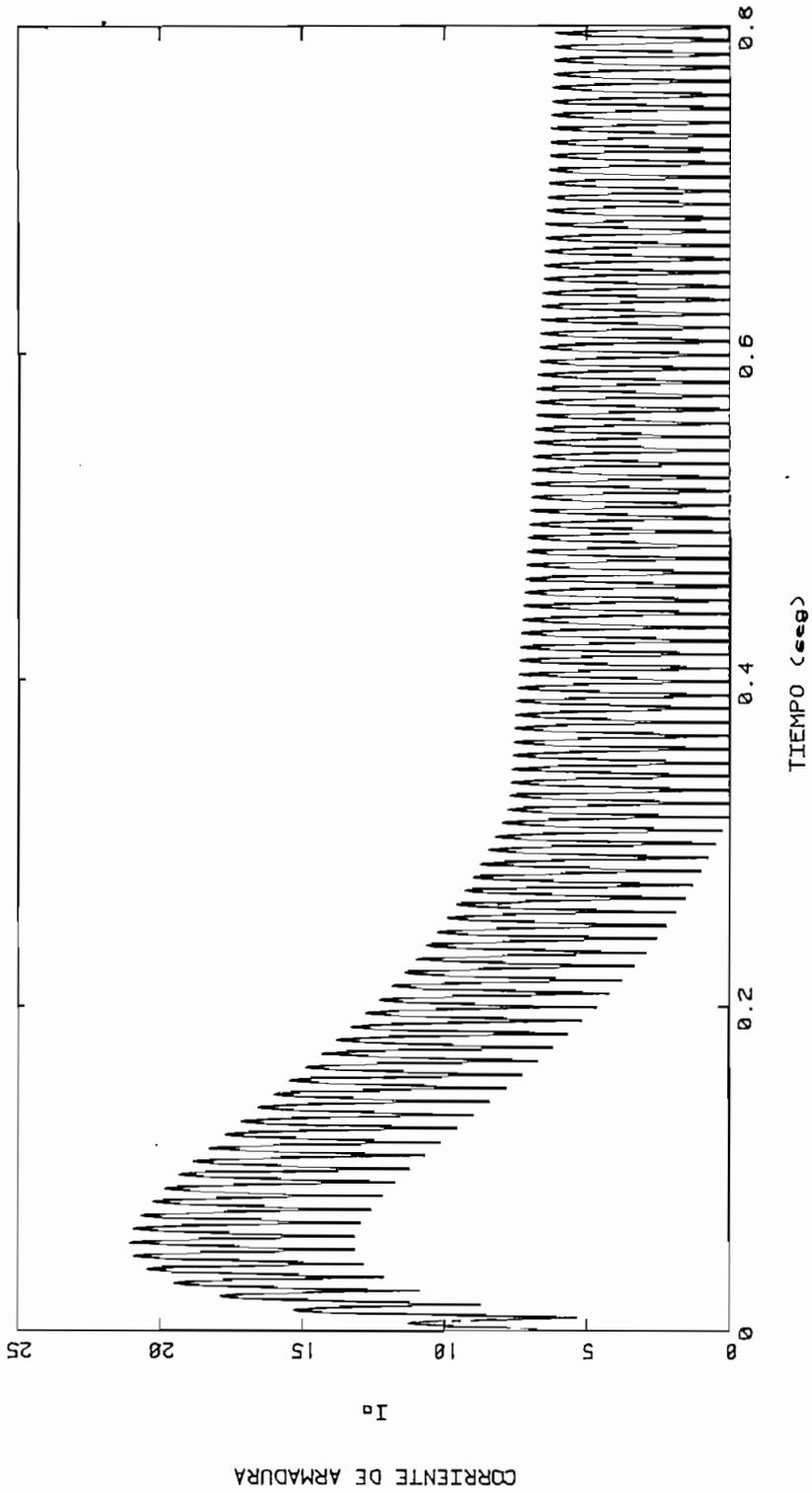
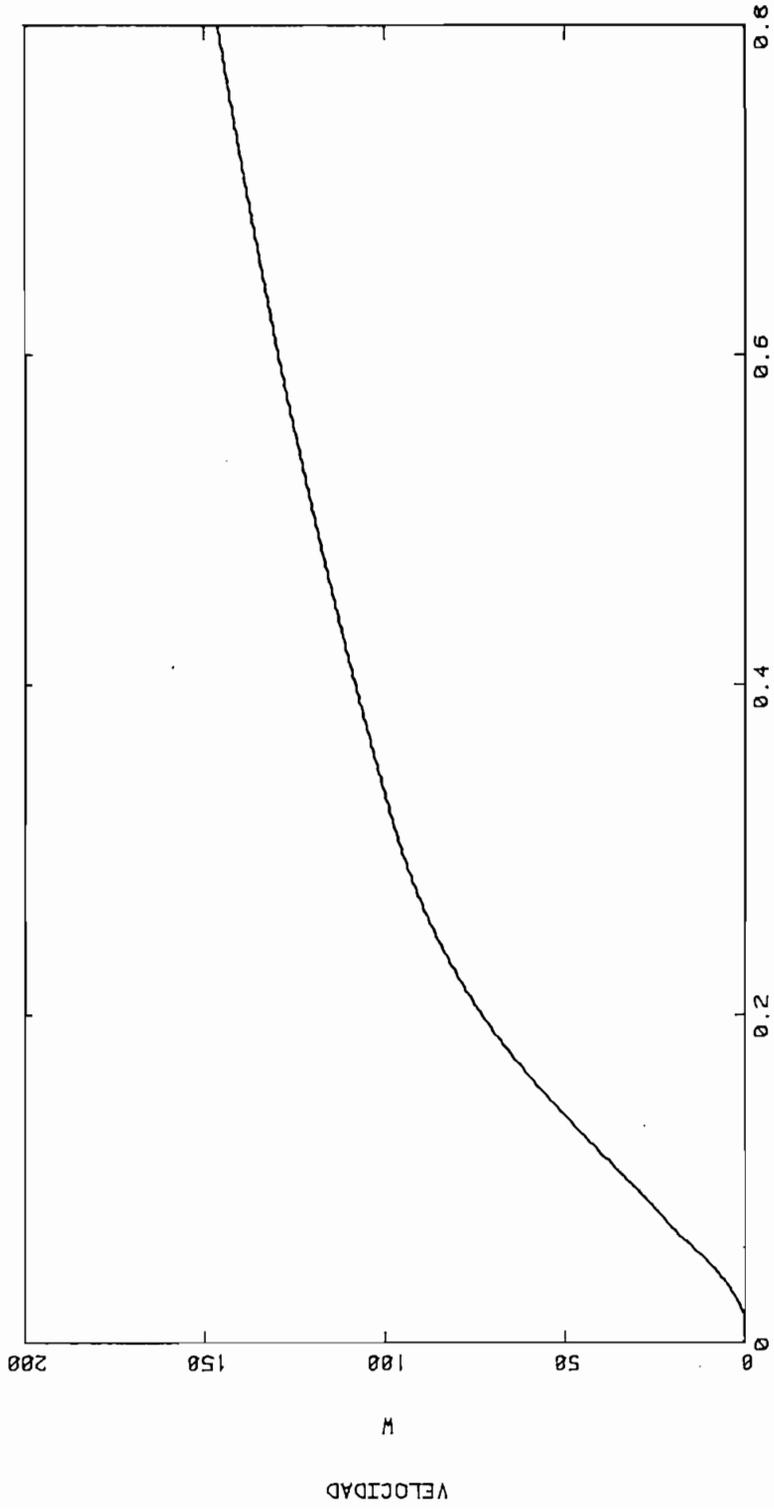


Gráfico 4.7.

ARRANQUE CON ANGULO FIJO ($\alpha = 60^\circ$)



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.8.

VELOCIDAD

4.2. ESTADO ESTABLE.-

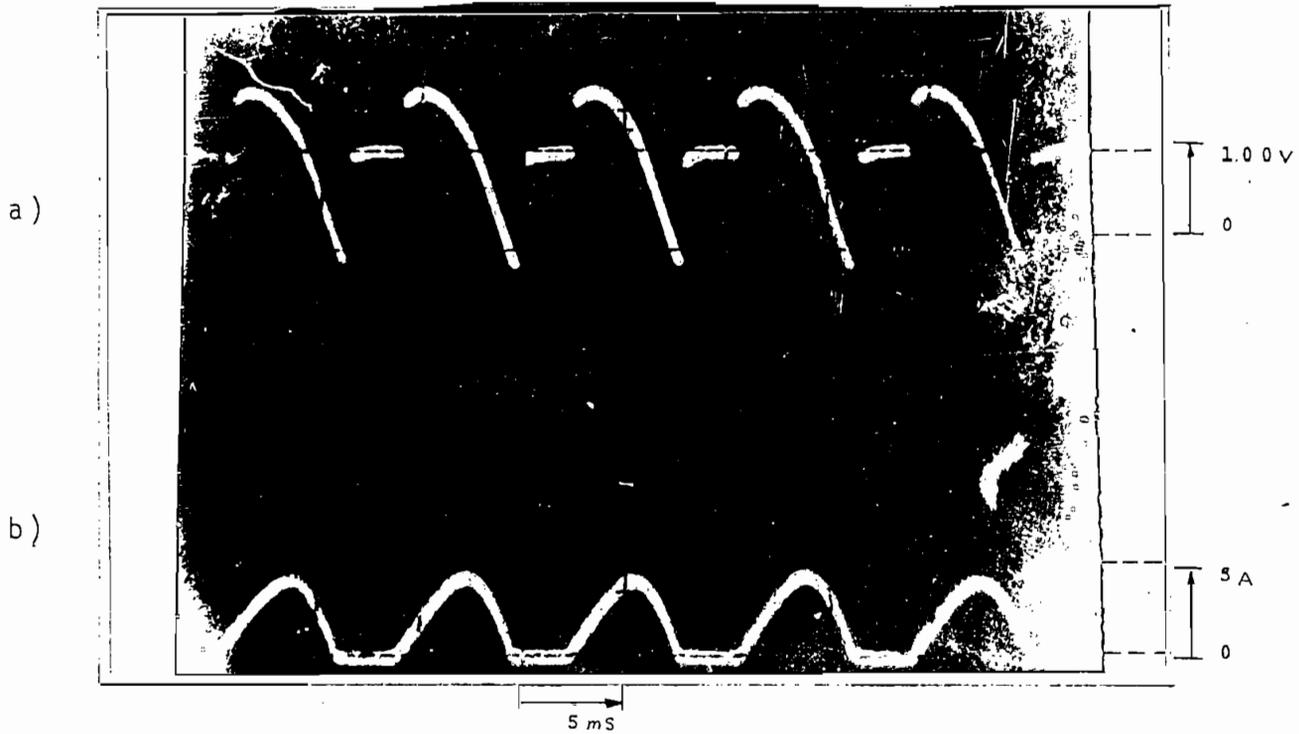
Para poder analizar a la máquina en su estado estable, se tomaron las siguientes consideraciones:

Voltaje de alimentación del conversor (V_s)	118 volt (RMS)
Angulo de activado de los tiristores (α)	66°
Voltaje de campo (V_f)	22 volt (DC)

Los resultados obtenidos con la máquina se presentan en las fotografías # 3 y # 4, y los resultados de la simulación en los gráficos 4.9., 4.10., 4.11. y 4.12.

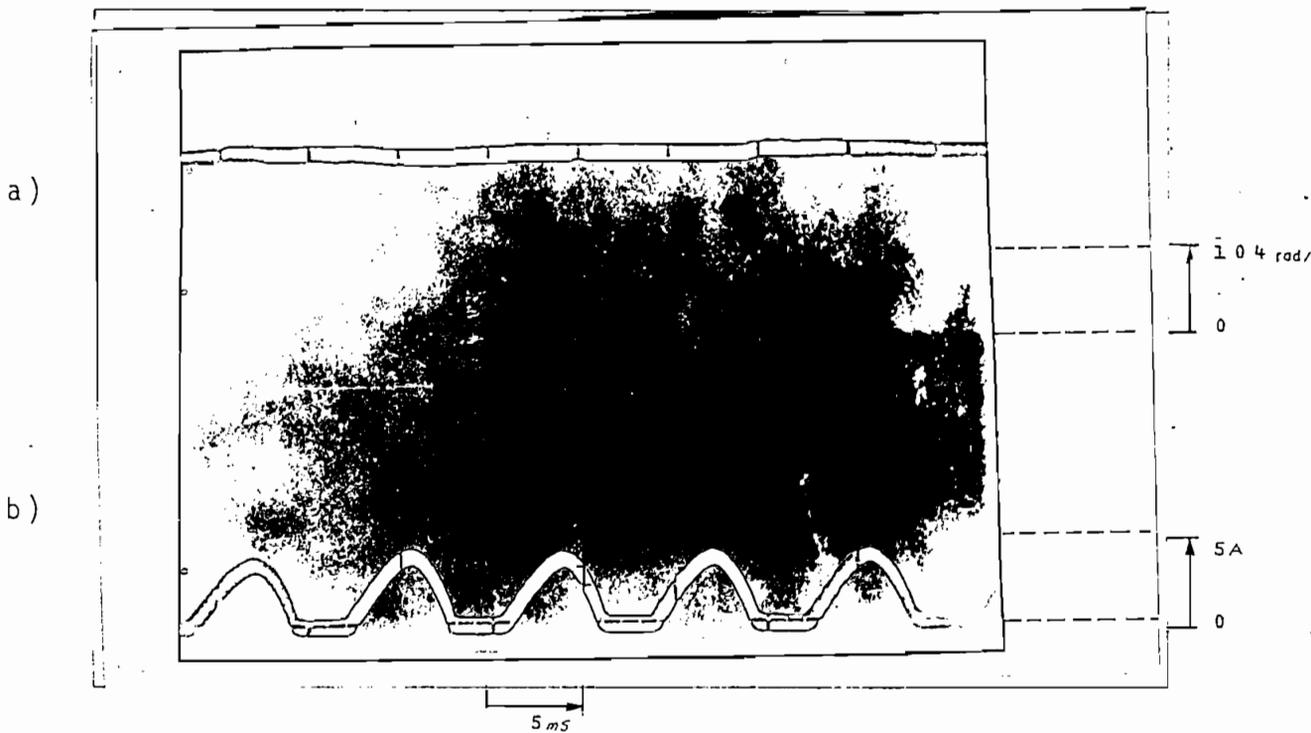
Haciendo la comparación numérica se tiene:

	FOTO	GRAFICO
Voltaje pico de armadura	160 V	166 V
Voltaje inducido	100 V	95 V
Corriente pico de armadura	4.5 A	3.6 A
Velocidad	220 rad/seg	220 rad/seg
Corriente de Campo	4.0 A	4.0 A



Fotografía # 3.- ESTADO ESTABLE

- a) Voltaje de armadura
- b) Corriente de armadura

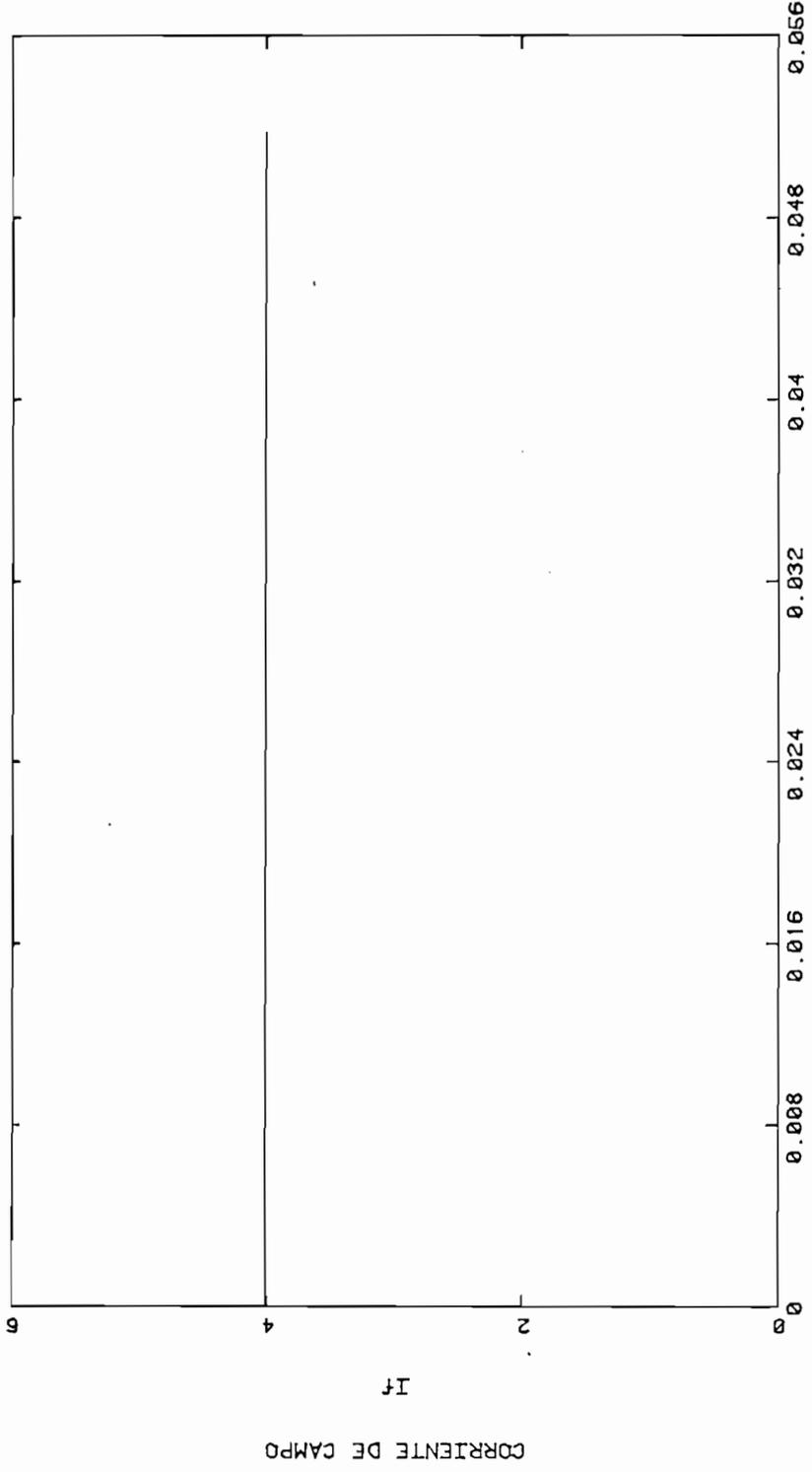


Fotografía # 3.- ESTADO ESTABLE

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

ESTADO ESTABLE ($\alpha = 66^\circ$)

=====

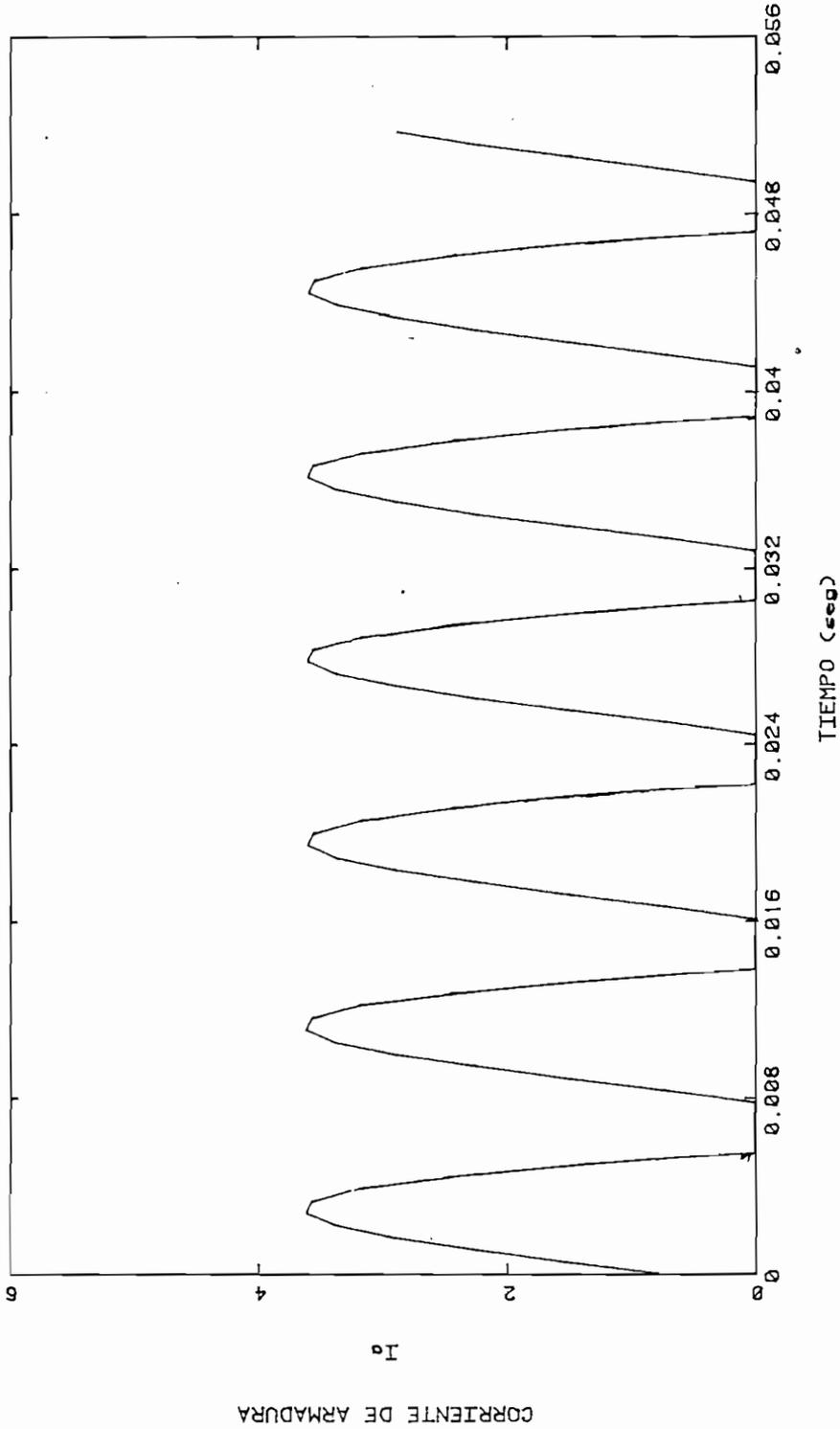


TIEMPO (seg)

Gráfico 4.9.

ESTADO ESTABLE ($\alpha = 66^\circ$)

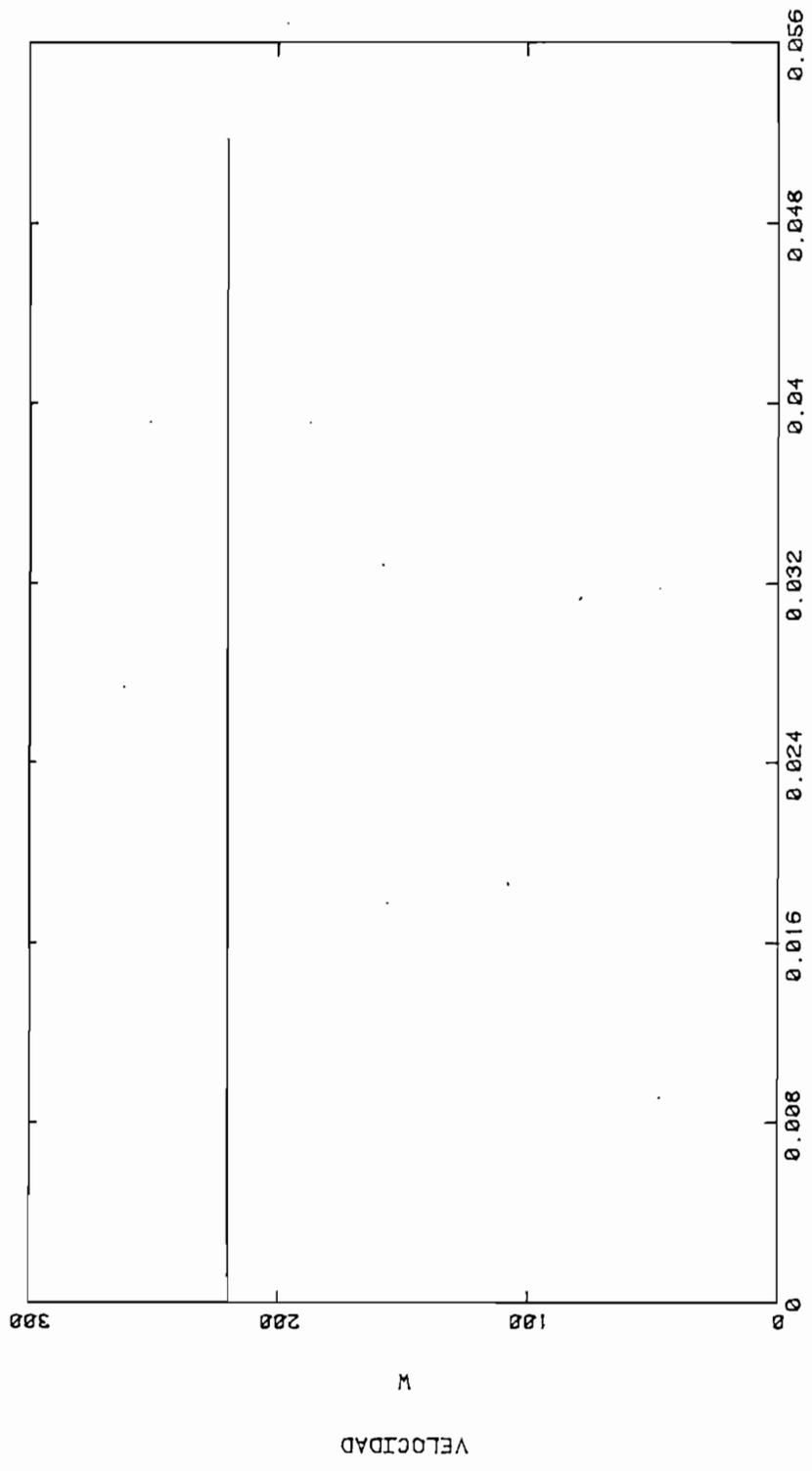
=====



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.10.

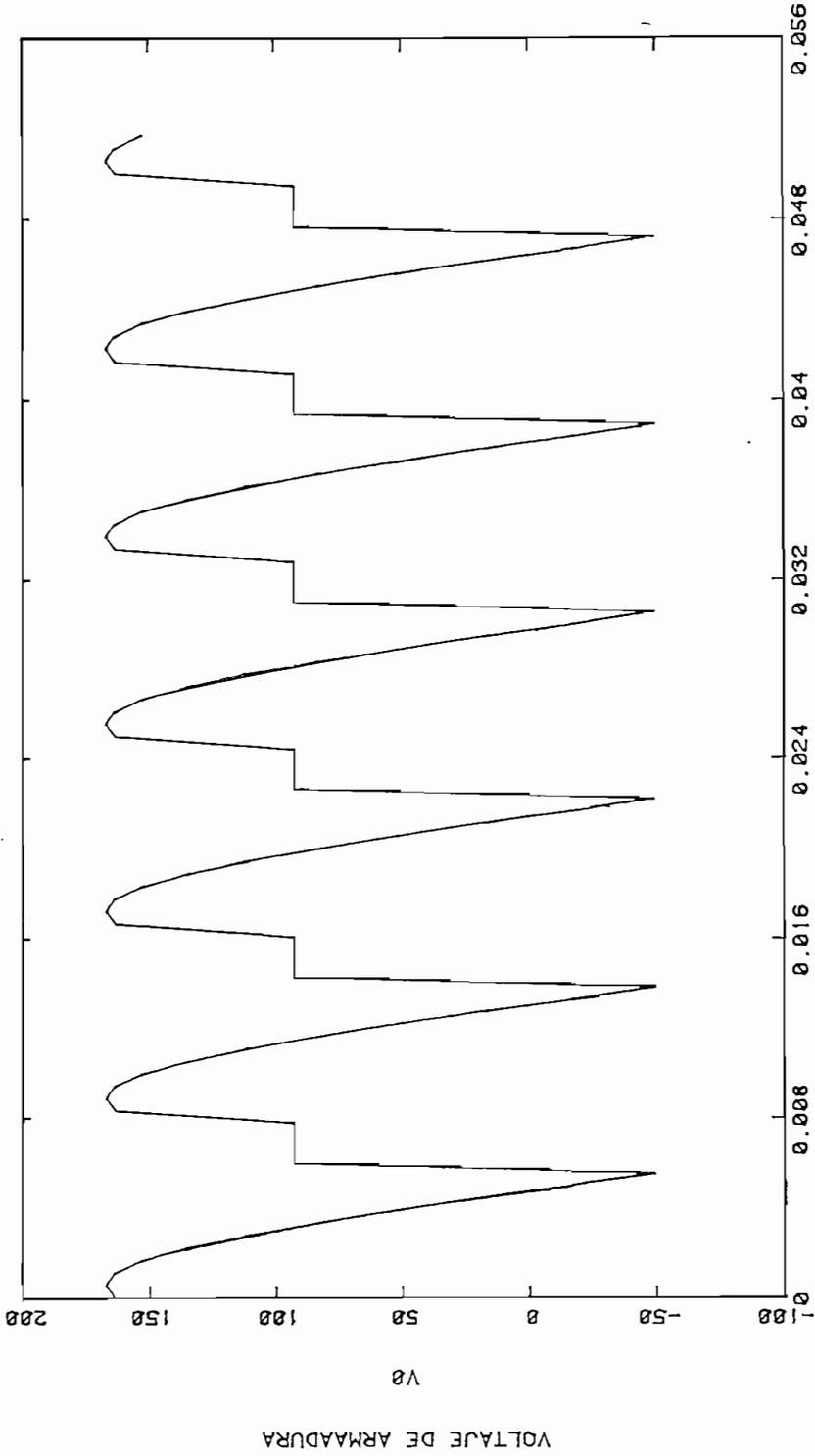
ESTADO ESTABLE ($\alpha = 66^\circ$)
=====



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.11.

ESTADO ESTABLE ($\alpha = 66^\circ$)



TIEMPO (seg)
Gráfico 4.12.

4.3. PERTURBACIONES.-

4.3.1. Perturbación con un Cambio en el Angulo de Activado.-

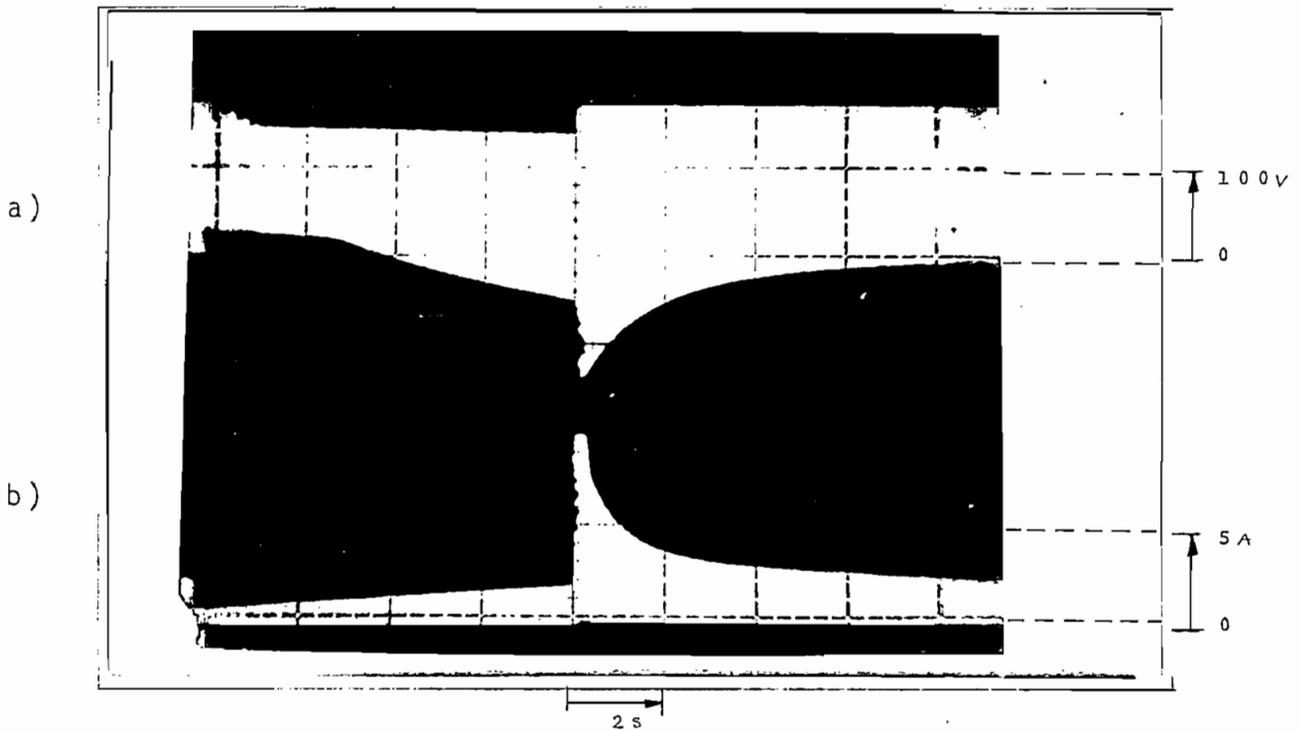
Manteniendo las mismas condiciones de voltaje de campo y armadura anteriores, analicemos ahora, los transitorios en una máquina D.C. alimentada con un convertidor monofásico controlado, para cuando se produce un cambio de ángulo de activado en los tiristores de la fuente.

El cambio realizado para las pruebas es de un ángulo inicial de 132° a uno de 64° , los resultados experimentales se presentan en las fotografías # 5 y # 6 y los resultados de la simulación en los gráficos 4.13., 4.14. y 4.15.

Para las condiciones iniciales en la simulación se ingresan los valores, de las fotografías, anterior a la perturbación.

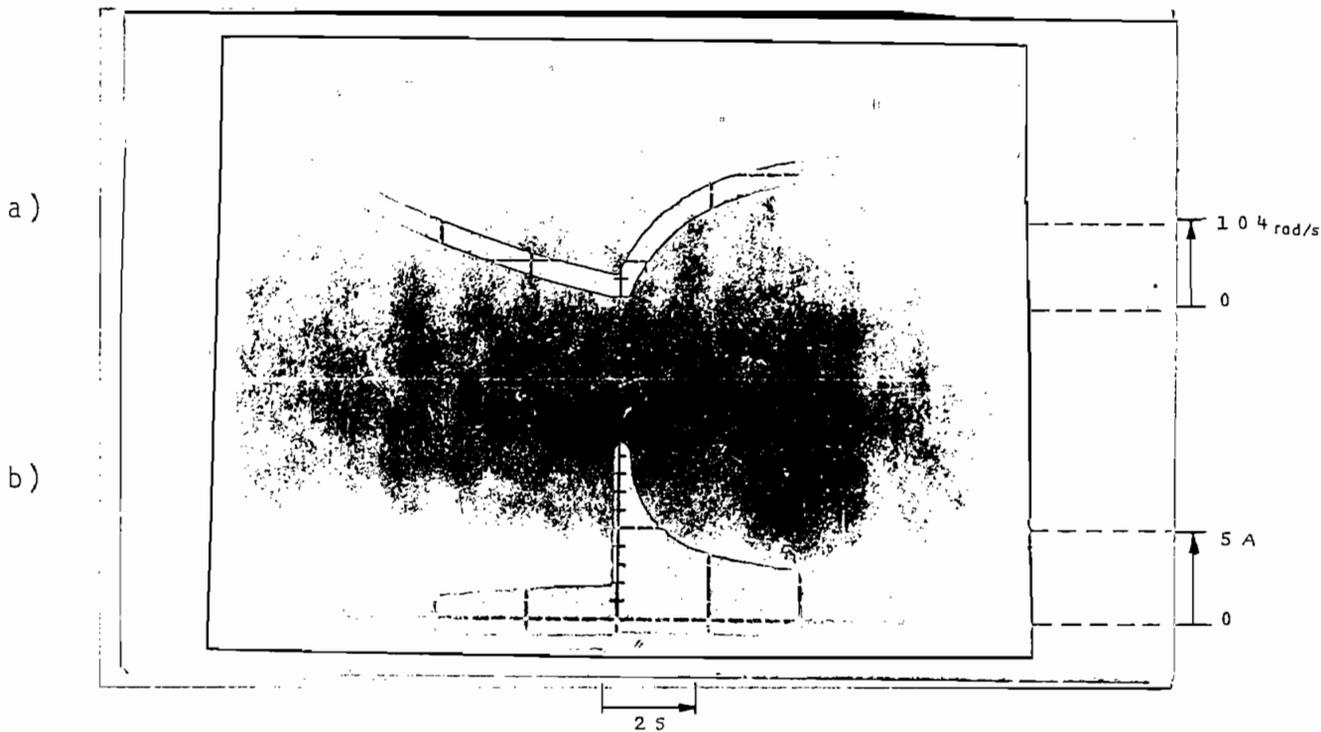
Los resultados obtenidos fueron:

	FOTO	GRAFICO
Voltaje máximo de armadura	160 V	168 V
Voltaje mínimo de armadura	-140 V	-152 V
Pico de corriente de armadura	19 A	13.6 A
Velocidad antes de la perturbación	50 rad/seg	48 rad/seg
Velocidad a 0.8 seg	145 rad/seg	140 rad/seg
Tiempo en que se produce la perturbación	---	0.1 seg



Fotografía # 5.- PERTURBACION EN EL ANGULO DE ACTIVADO'

- a) Voltaje de armadura
- b) Corriente de armadura



Fotografía # 6.- PERTURBACION EN EL ANGULO DE ACTIVADO

- a) Velocidad
- d) Corriente de armadura

PERTURBACION EN EL ANGULO DE ACTIVADO

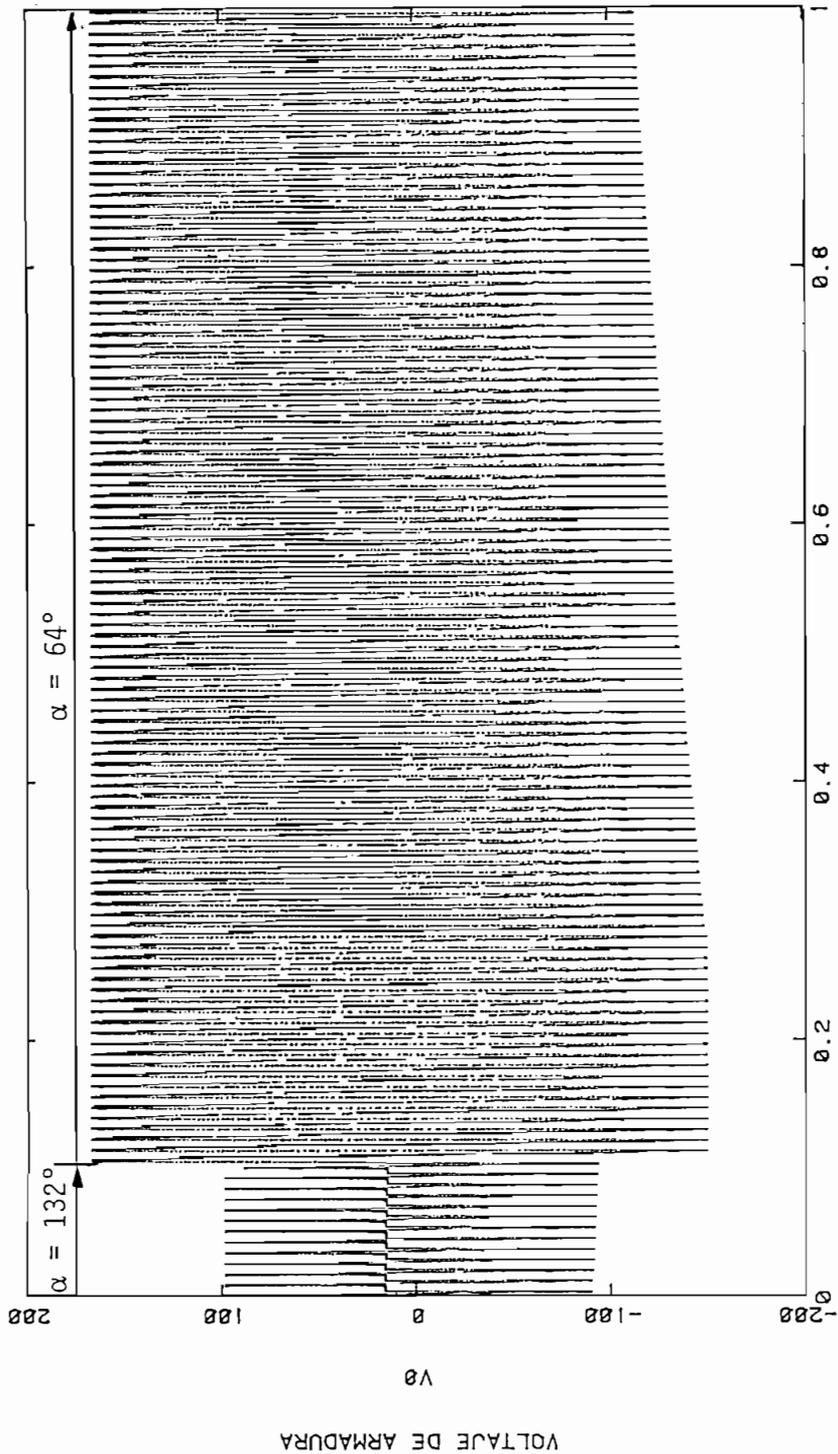
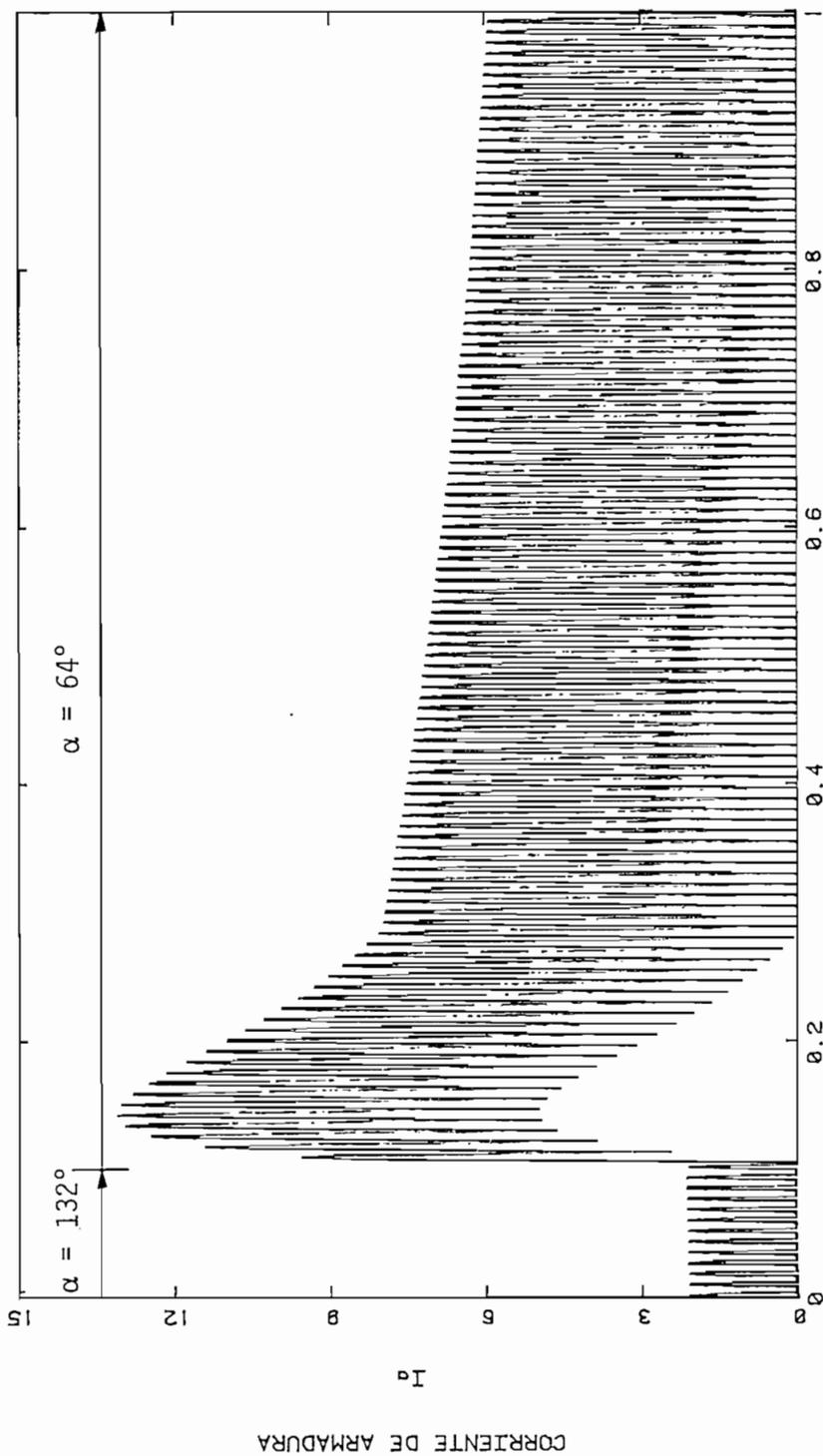


Gráfico 4.13.

PERTURBACION EN EL ANGULO DE ACTIVADO



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.14.

CORRIENTE DE ARMADURA

PERTURBACION EN EL ANGULO DE ACTIVADO

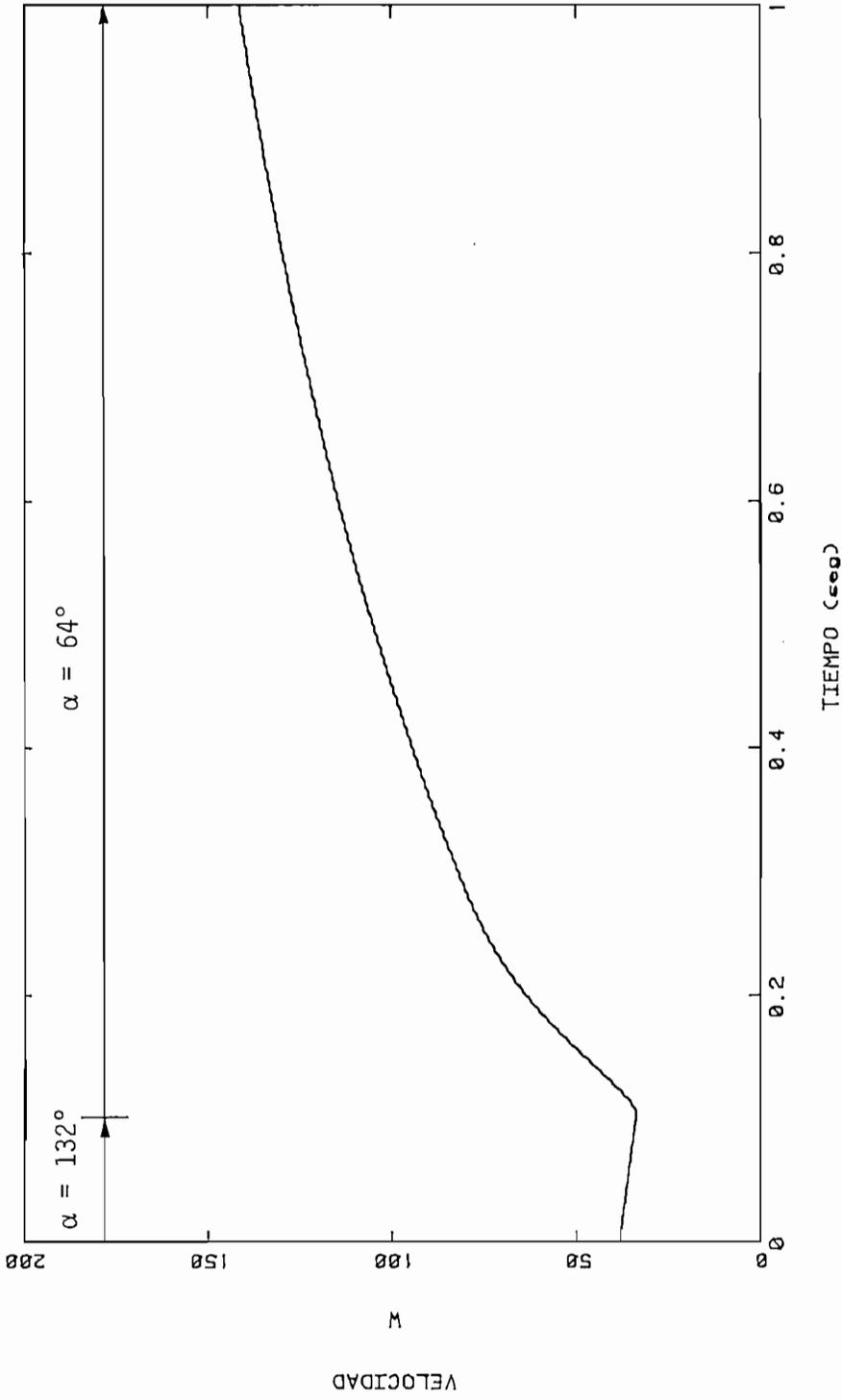


Gráfico 4.15.

4.3.2. Perturbación en el Torque de Carga.-

Para poder analizar una perturbación en el torque de carga, se carga el motor utilizado con una segunda máquina D.C., la misma que se la hace trabajar como generador y se varía la resistencia estática que tiene conectada a sus terminales.

Para la prueba experimental, primeramente se hace trabajar al generador en vacío, y para producir la perturbación, se conecta una resistencia de 30Ω a los terminales del generador. Los resultados prácticos se presentan en la fotografía # 7.

Para lograr la perturbación en la simulación, se hace al tiempo $T7 = 0.018$ seg. (tiempo utilizado en el que se produce la perturbación), se cambie la ecuación de recta que representa la carga rotacional, por lo tanto, se pasa de la recta de carga en vacío, dada por:

$$T3 = 0.001916 \cdot W + 0.735$$

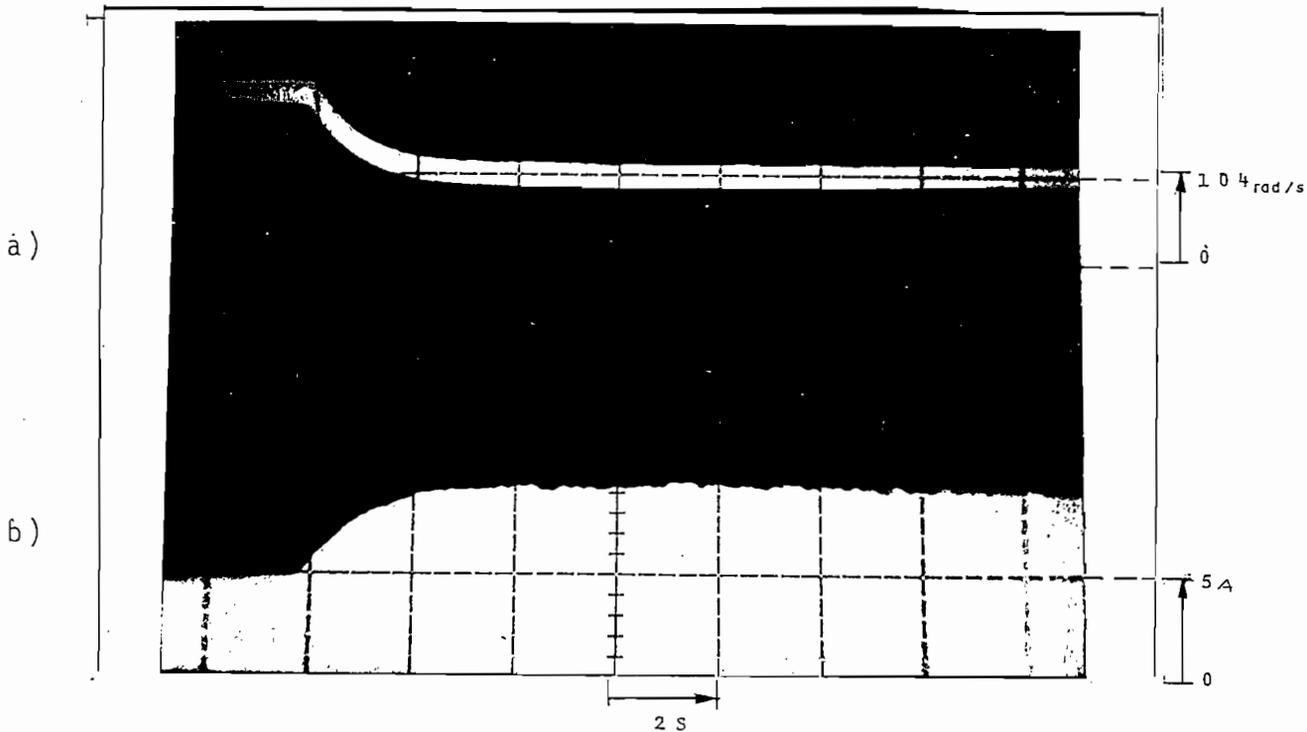
a la recta que representa la carga de 30Ω , dada por:

$$T3 = 0.021297 \cdot W + 0.735$$

Los resultados gráficos de la simulación se presentan en los gráficos 4.16. y 4.17.

Los resultados obtenidos fueron:

	FOTO	GRAFICO
Valor pico de la corriente de armadura antes de la perturbación	4.5 A	4.1 A
Valor pico de la corriente de armadura a 0.35 seg. después de la perturbación	6.7 A	6.5 A
Velocidad antes de la perturbación	200 rad/seg	200 rad/seg
Velocidad a 0.35 seg. después de la perturbación	140 rad/seg	121 rad/seg



Fotografía # 7.- PERTURBACION EN EL TORQUE DE CARGA

- a) Velocidad
- b) Corriente de armadura

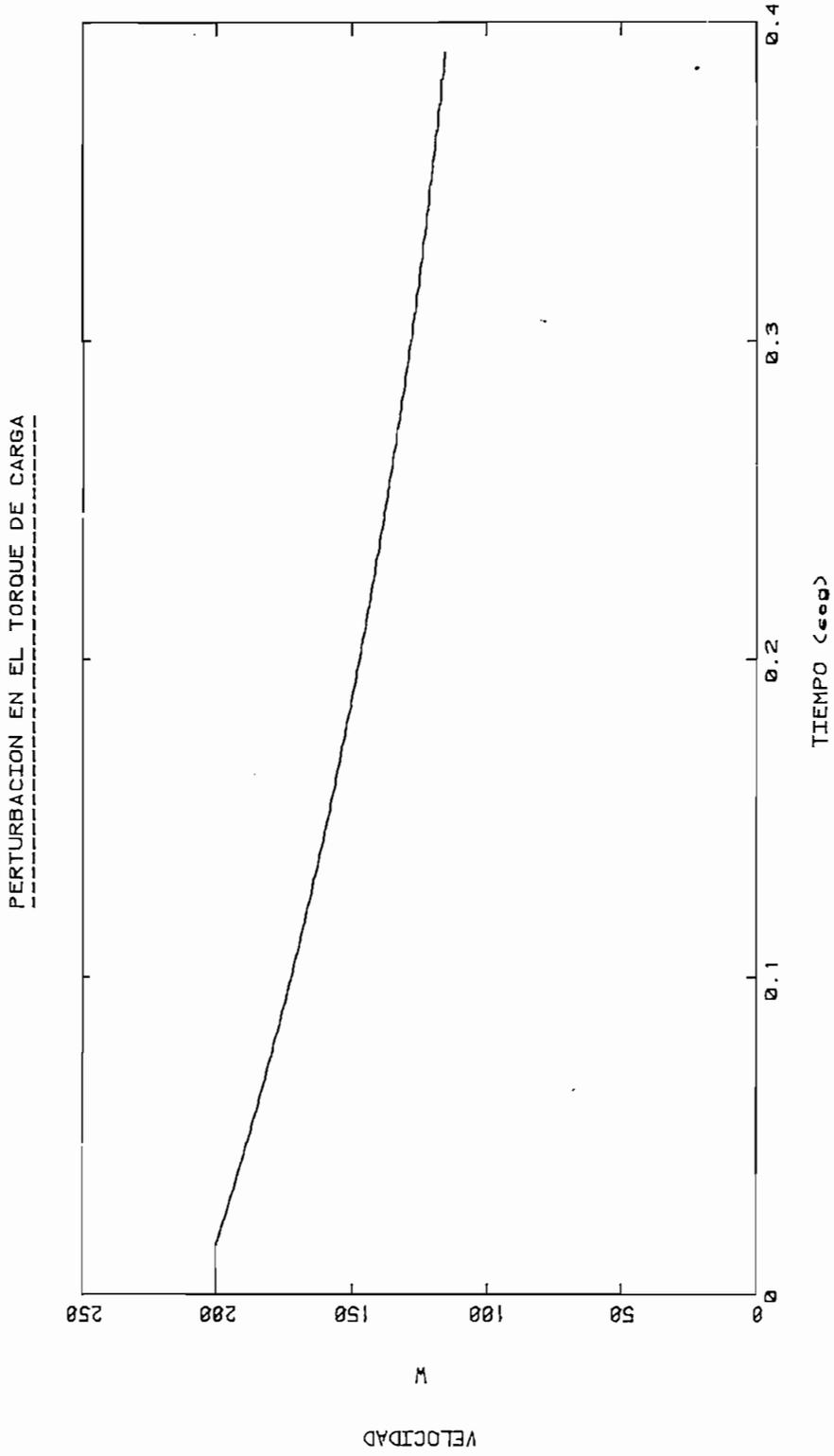


Gráfico 4.16.

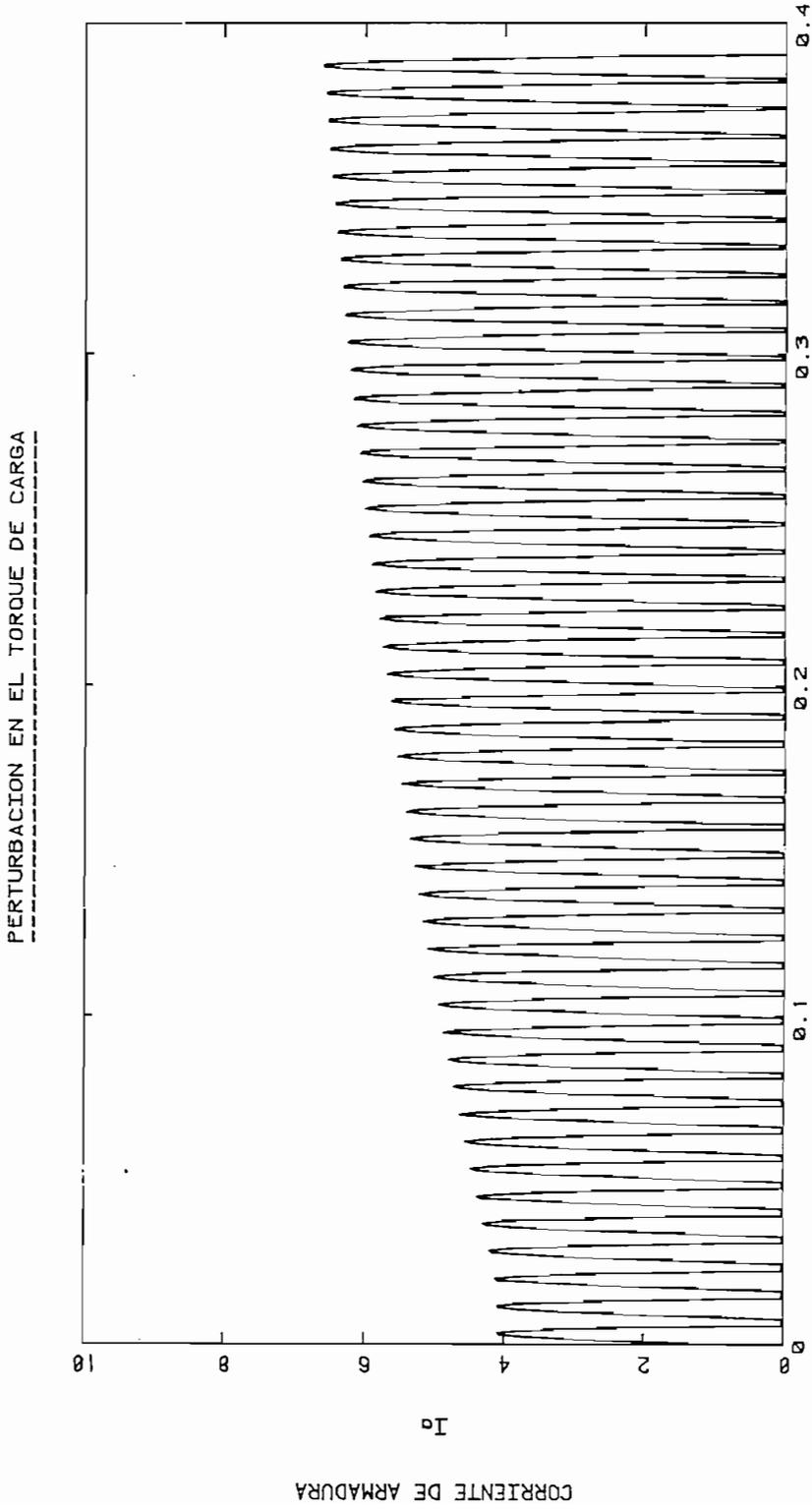


Gráfico 4.17.

4.4 PARADAS.-

Por limitaciones del circuito experimental, algunas de éstas pruebas no fueron posible realizarlas, razón por el cual, en estos casos se presentan únicamente los resultados de la simulación.

Por otro lado, para hacer una comparación de los transitorios de la máquina, al producirse la parada, será necesario realizar los tres tipos diferentes de simulación, bajo las mismas condiciones.

Angulo de activado de los tiristores (α)	54°
Voltaje de línea (V_s)	118 volt (RMS)
Tiempo en que se produce la parada	0.018 seg.
Voltaje de campo (V_f)	22 volt (DC)

Los resultados obtenidos se presentan en los gráficos 4.18. y 4.19., las formas de onda de corriente de armadura y velocidad para parada con inversión en el campo; los gráficos 4.20. y 4.21. para la parada con desconexión de la armadura, y los gráficos 4.22. y 4.23 para la parada con inversión en la armadura.

En todos los casos se supone al generador cargado con un torque proporcional a la velocidad, equivalente a:

$$T3 = 3 \cdot (0.026941 \cdot W + 0.735)$$

Los resultados obtenidos fueron:

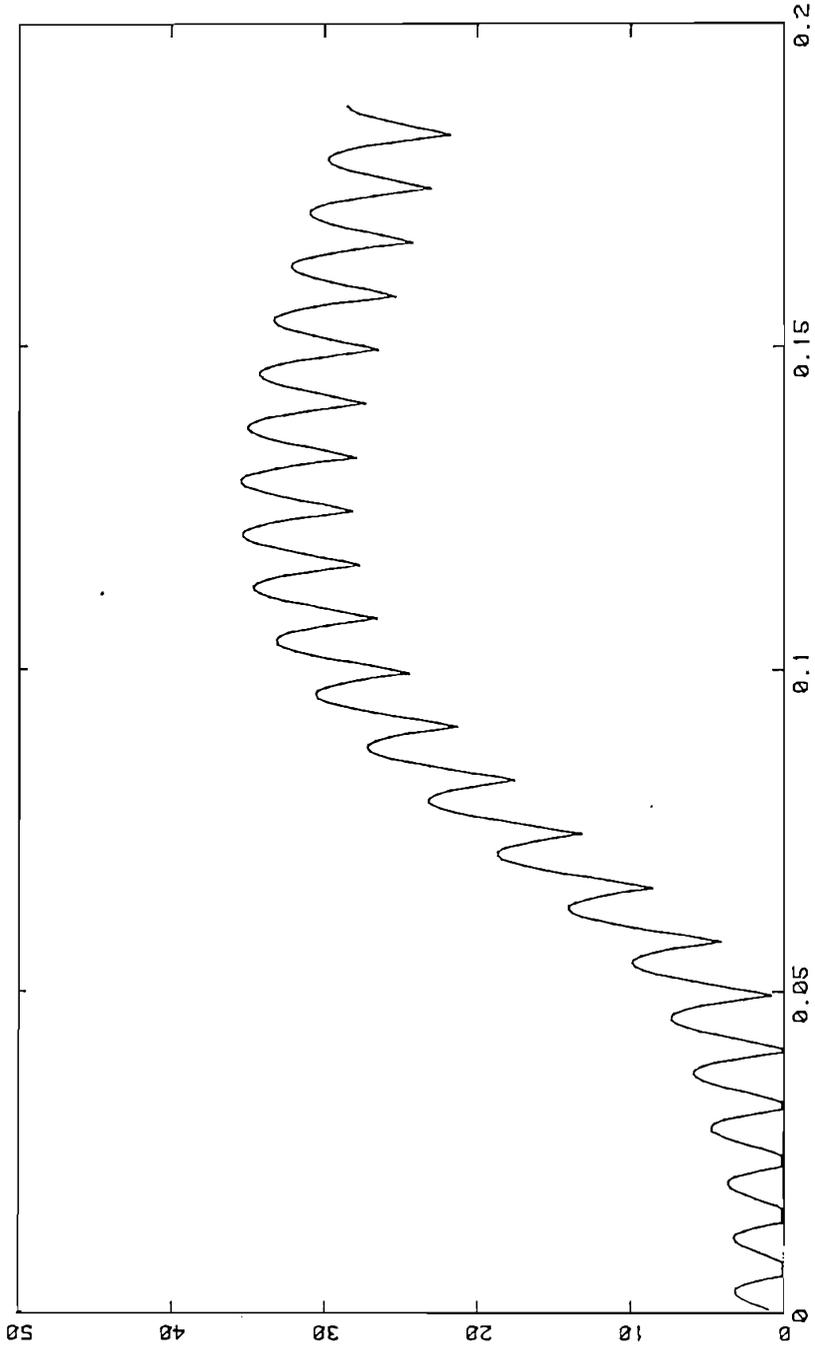
	PICO DE LA CORRIENTE DE ARMADURA		TIEMPO DE PARADA
	ANTES	DESPUES	
Inversión de campo	3.2 A	+36 A	0.168 seg.
Desconexión de armadura	3.2 A	0	0.462 seg.
Inversión de armadura	3.2 A	-46 A	0.102 seg.

Para las formas de onda del voltaje de alimentación se tiene, que al mantener el ángulo de activado de los tiristores y al ir disminuyendo la velocidad en el proceso de parada, el voltaje pasa de una conducción discontinua a continua, esto ocurre tanto para las paradas con inversión de campo como con inversión de armadura, mientras que para el caso de desconexión en la armadura el voltaje que aparece en los terminales es el voltaje inducido, el cual va decreciendo proporcionalmente a la velocidad.

En cuanto a la corriente de campo se tiene que, al invertir la fuente de excitación, la corriente de campo pasa de su valor nominal positivo a su valor nominal negativo, mientras que para los otros dos casos de parada, esta corriente se mantiene estable.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los procesos de parada simulado representan más bien un análisis del tiempo de parada y de los transitorios de corriente para casos especiales, ya que en la realidad, un proceso de parada implicaría que cuando la velocidad llegue a cero se desconecten tanto la fuente de campo como la de armadura.

PARADA CON INVERSION DE CAMPO



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.18.

CORRIENTE DE ARMADURA

I_a

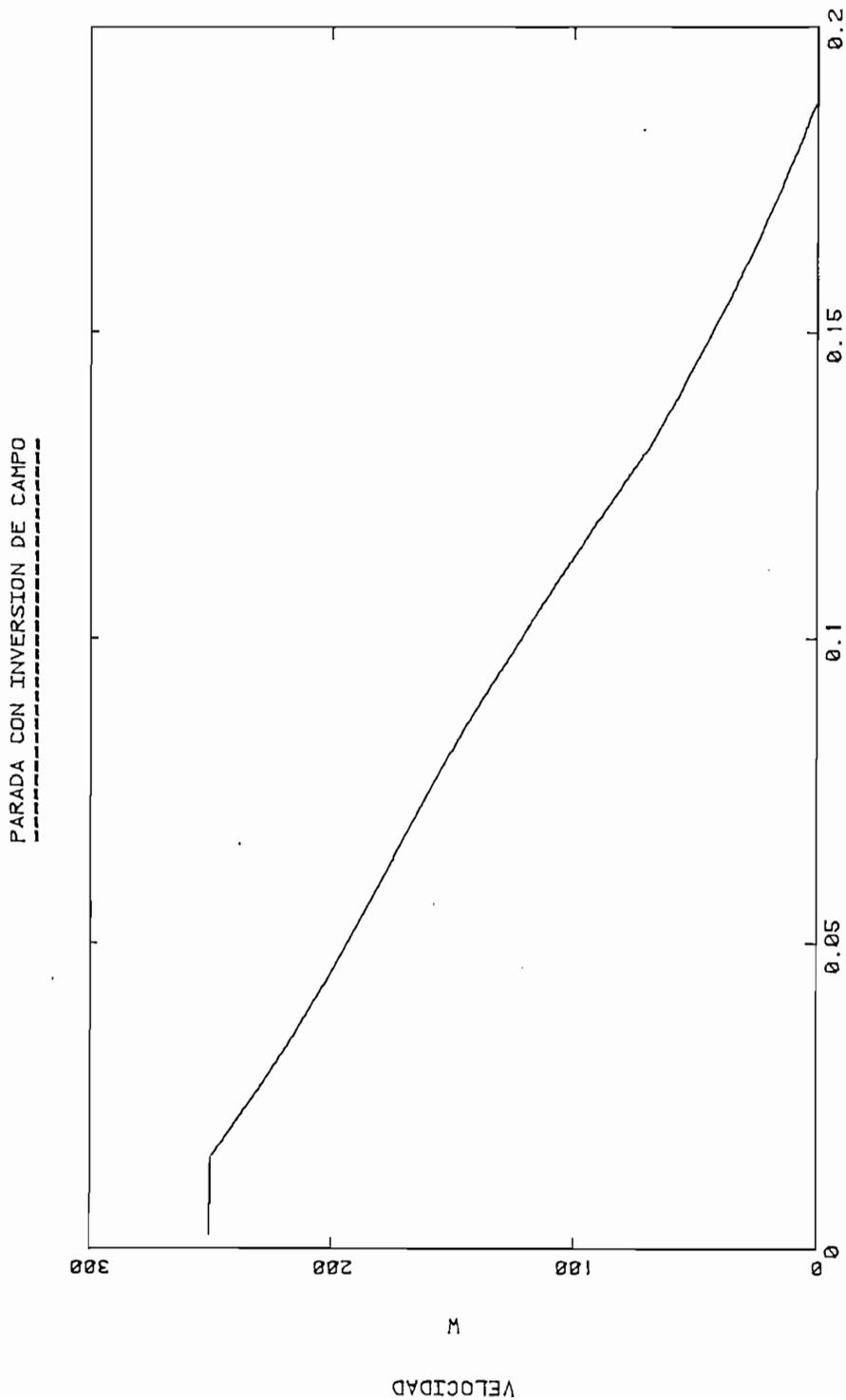
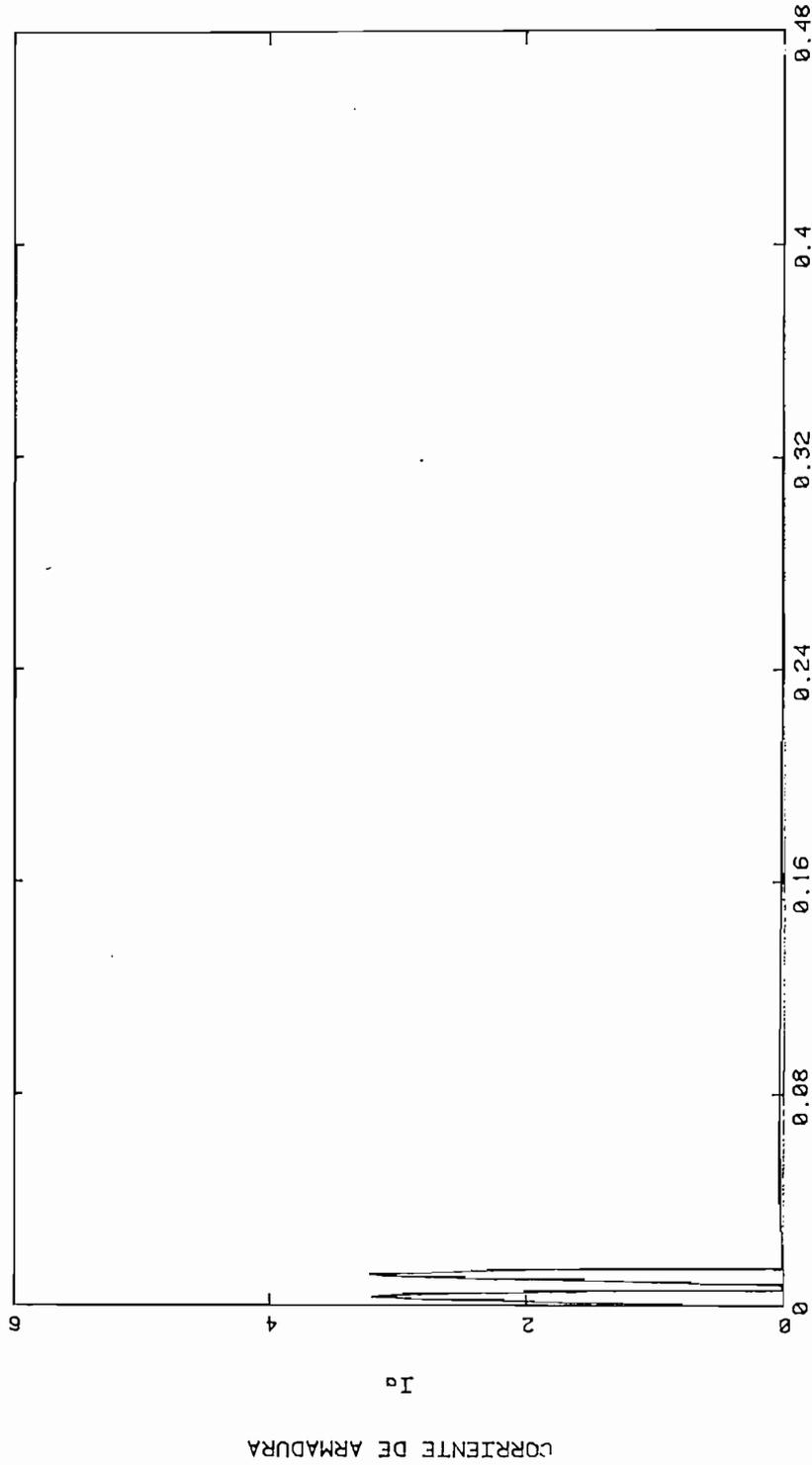


Gráfico 4.19.

PARADA CON DESCONEXION DE LA ARMADURA

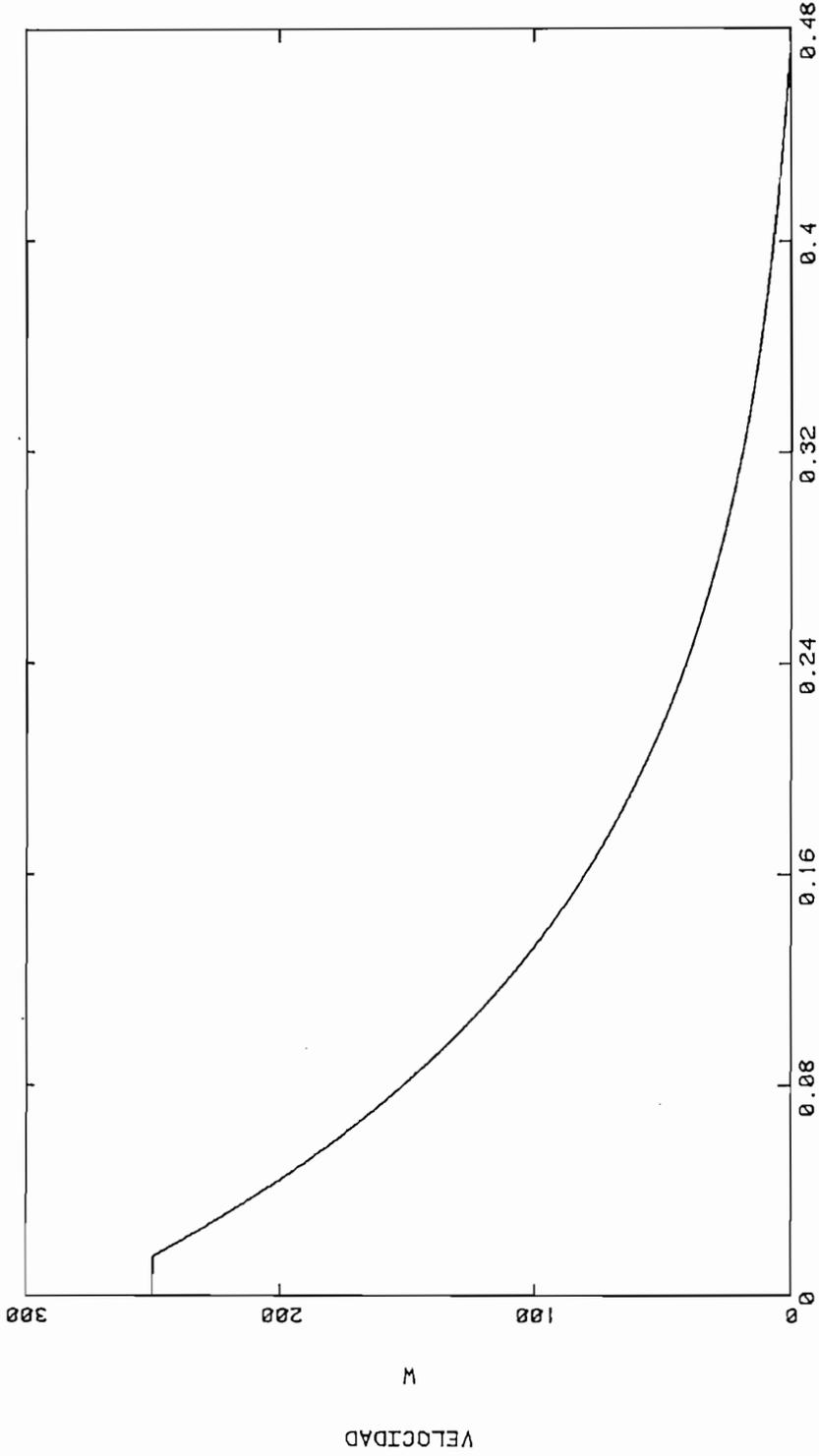
=====



TIEMPO (seg)

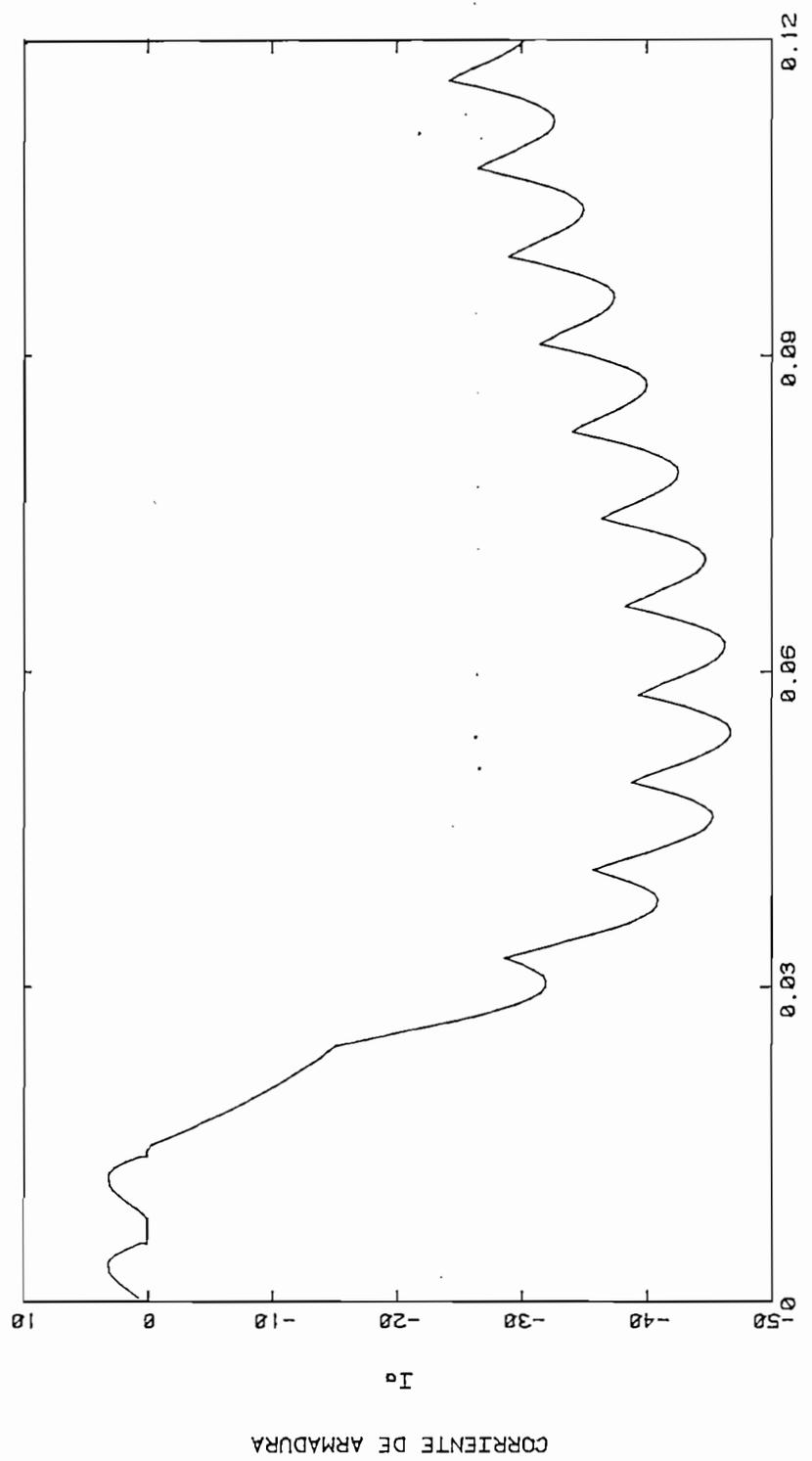
Gráfico 4.20.

PARADA CON DESCONEXION DE LA ARMADURA
=====



TIEMPO (seg)
Gráfico 4.21.

PARADA CON INVERSION DE ARMADURA



TIEMPO (seg)
Gráfico 4.22.

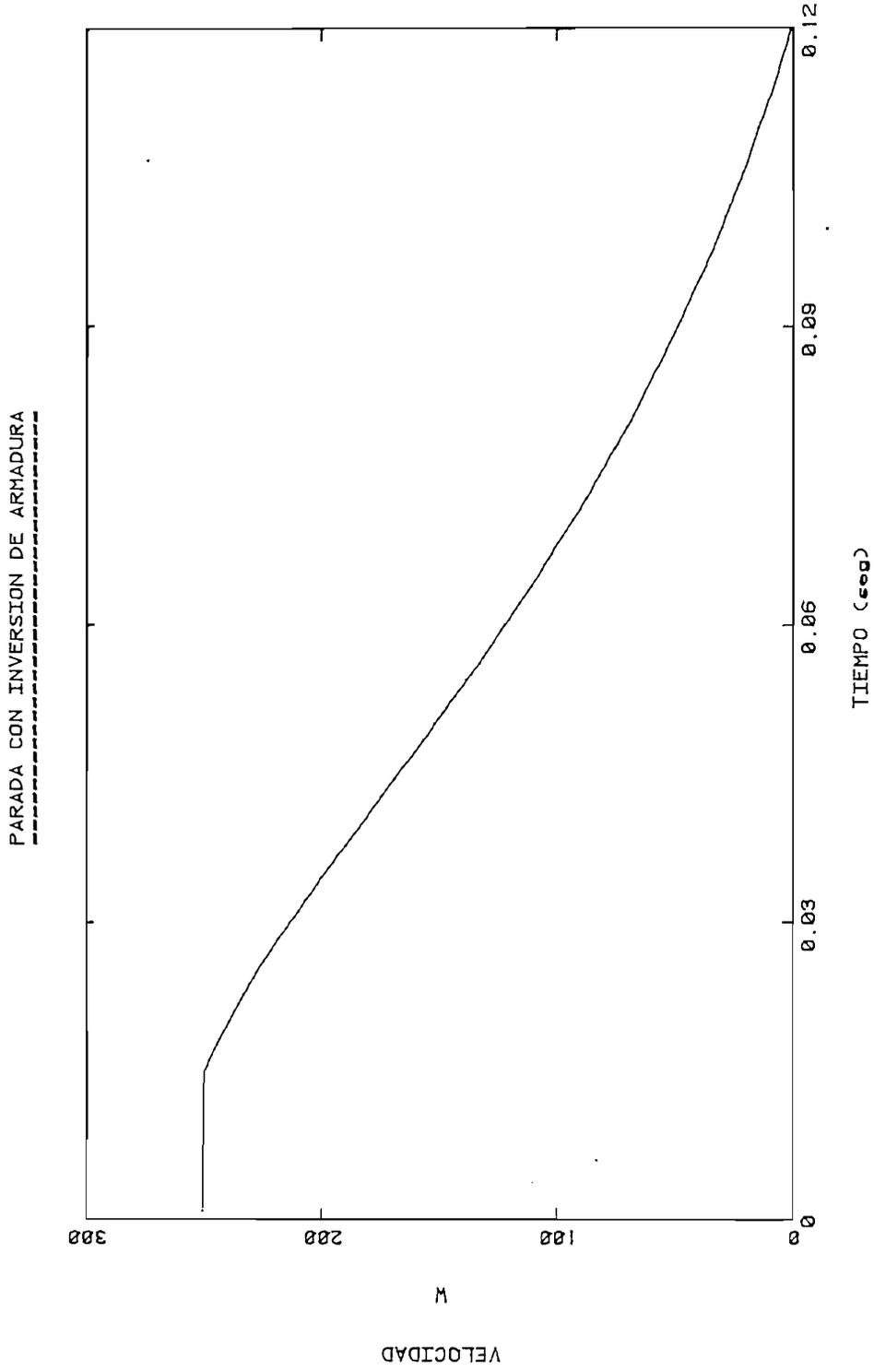


Gráfico 4.23.

4.5. INVERSION DE GIRO.-

Con las mismas condiciones tomadas en la simulación de la parada con inversión de la armadura, se tiene ahora, la simulación de la inversión de giro.

Los resultados se presentan en los gráficos 4.24., 4.25. y 4.26.; como se puede observar el transitorio de corriente, es el mismo que el producido en la parada, ésto se explica fácilmente partiendo del hecho que, el proceso de parada es solo el análisis de una parte de la inversión de giro, ya que al llegar la velocidad a cero y manteniendo la fuente de alimentación de armadura invertida, la máquina comenzará a girar en el otro sentido, y en el caso de que se mantenga la condición del ángulo de activado, el motor se estabilizará en los mismos valores correspondientes al primer cuadrante.

Cabe indicar que el torque de carga simulado en el programa, está dado por:

$$T3 = 0.026941 \cdot W + 0.735$$

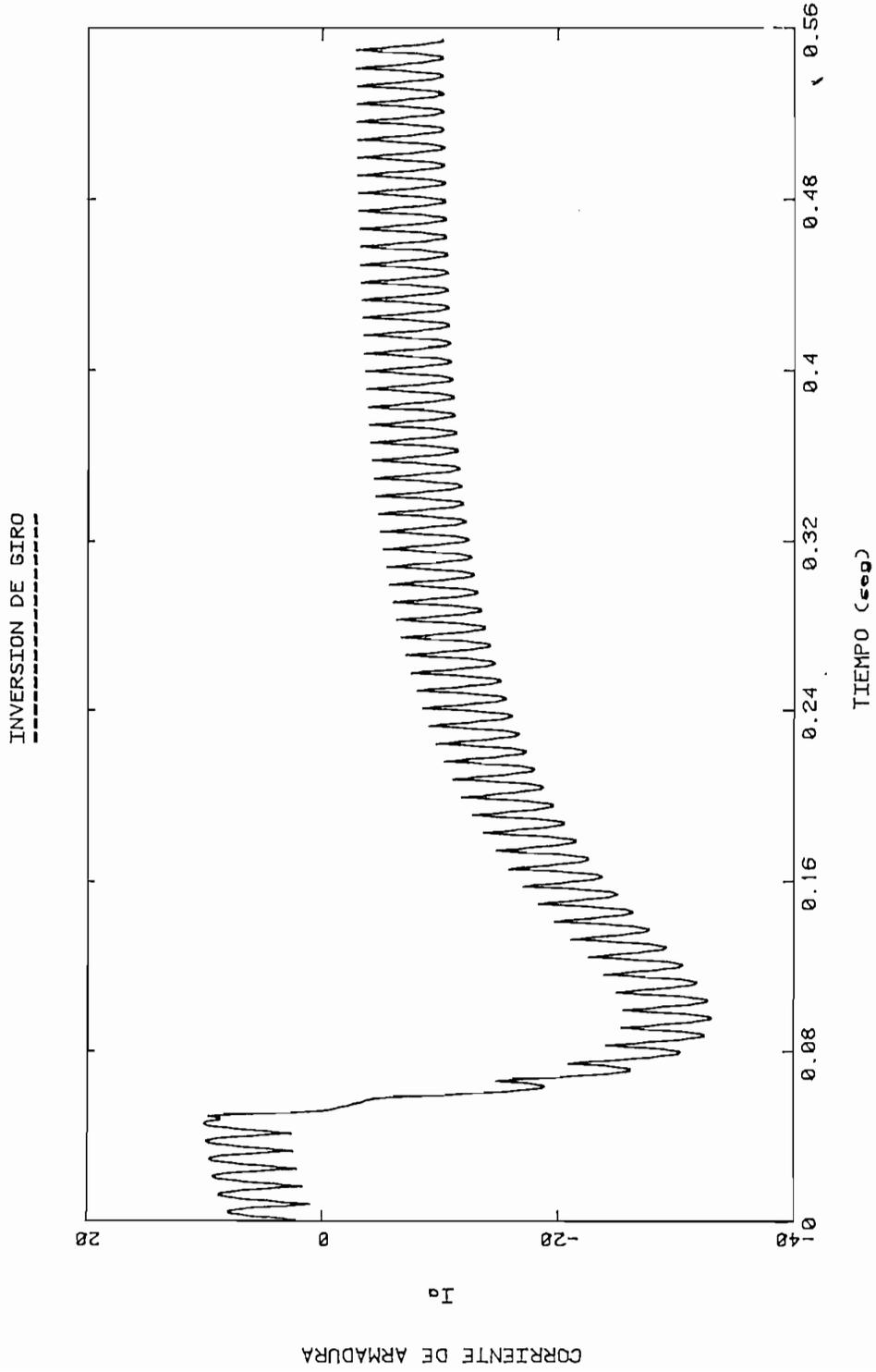


Gráfico 4.24.

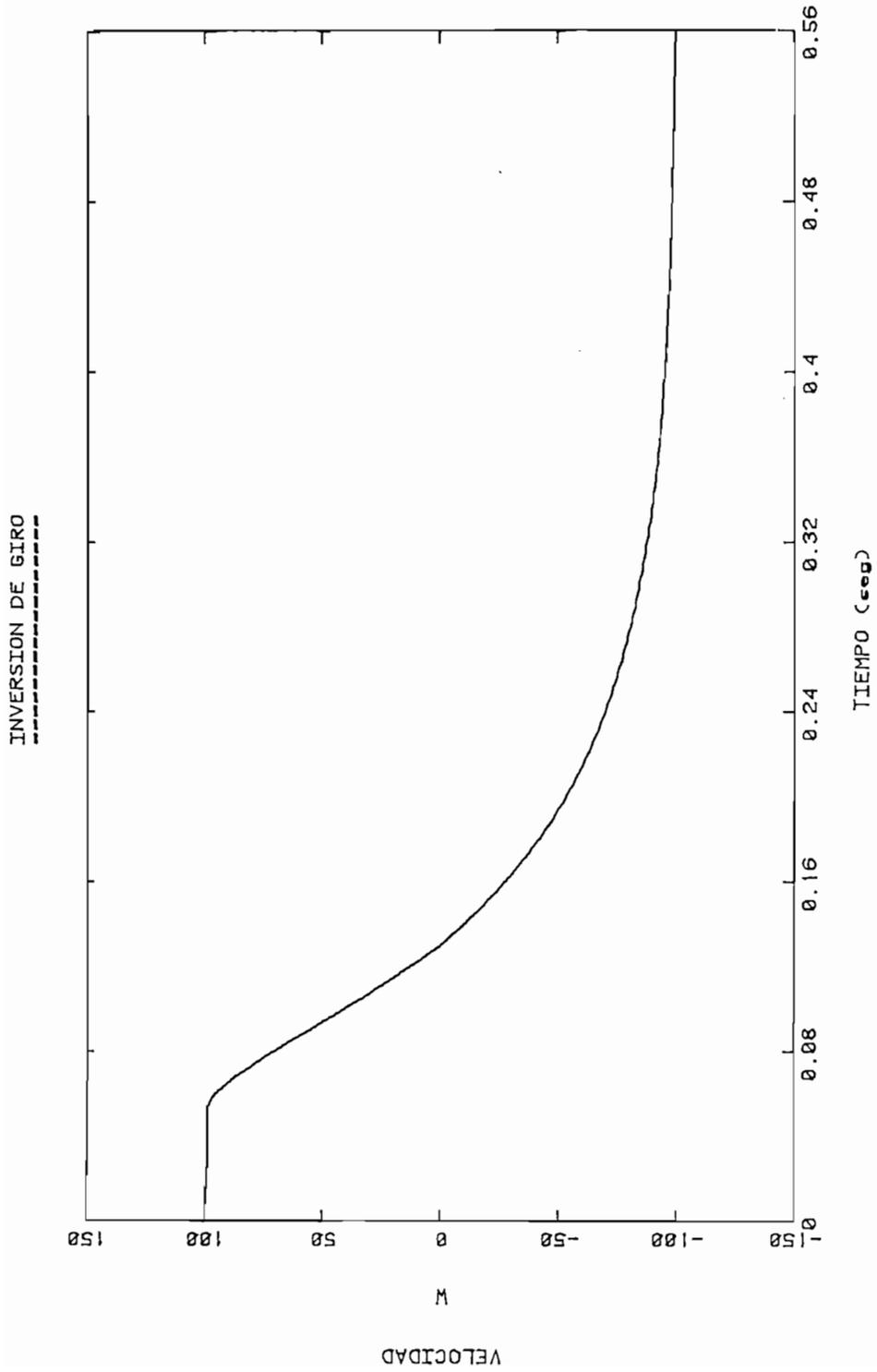
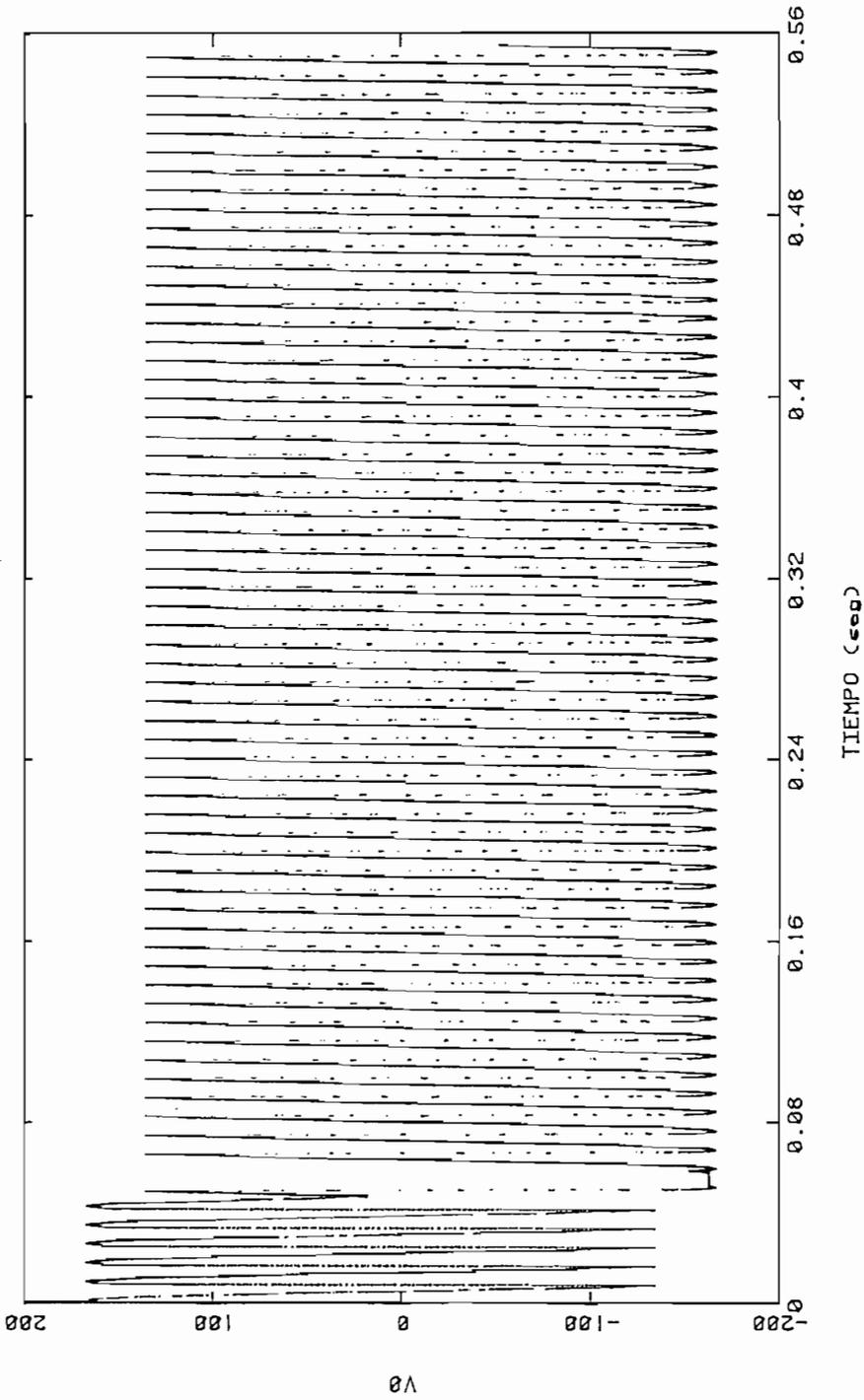


Gráfico 4.25.

INVERSION DE GIRO



TIEMPO (seg)

Gráfico 4.26.

VOLTAJE DE ARMADURA

V0

4.6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.-

Una vez presentados los resultados, se puede decir que el modelo utilizado para la simulación de la máquina D.C. así como de los circuitos conversores duales, tiene una gran aproximación a la realidad, tomando en cuenta que para la simulación se han tomado las siguientes consideraciones:

- Tiristores ideales, ya que no presentan caída de tensión en ellos y no dan problemas de conmutación.
- Pérdidas rotacionales despreciables, es decir se consideraran K_V y K_T numéricamente iguales, donde:

$$E\emptyset = K_V \cdot W$$

$$T = K_T \cdot i_a$$

$$K_V = K_T = G_q \cdot i_f$$

- No se considera el efecto de la reacción de armadura.
- Se linealiza en tres tramos la curva de magnetización y para cada tramo se calcula la inductancia rotacional correspondiente (G_q)-

Por otro lado, se tiene que con el desarrollo de éste trabajo, se ha logrado una primera aproximación a lo que en la práctica se conoce como arrancadores electrónicos controlados, en los que en el proceso de arranque, se tiene un cambio gradual del ángulo de activado. En éste trabajo se puede variar una sola vez el ángulo en el proceso de arranque, con lo que se puede obtener resultados para el caso más desfavorable. Es de agregar, que con éstas experiencias, se pueda en el futuro desarrollar un programa más elaborado pa-

ra la simulación de arranque controlado por variación gradual del ángulo de activado, que por su naturaleza, cae fuera del alcance del presente trabajo.

Además, apesar de que el trabajo desarrollado permite el tránsito por los cuatro cuadrantes para una máquina eléctrica, se tiene que el trabajo en el segundo y cuarto cuadrante son solo estados transitorios dentro de los cambios de estado estable entre el primero y el tercero. Por lo que se puede recomendar una continuación en la simulación de máquinas eléctricas trabajando con carga gravitacional, dentro del segundo y cuarto cuadrante.

Finalmente, como se tenía que el presente trabajo es continuación de la tesis "MODELACION DIGITAL DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA ALIMENTADA POR CIRCUITOS A TIRISTORES", se puede concluir, numerando los avances que se han logrado, partiendo de los presentados en el trabajo ya mencionado:

- Se puede analizar al motor, cuando este está acoplado a un generador el cual, tiene conectado en sus terminales valores varios de resistencias, es decir se podrá analizar al motor trabajando en vacío, a plena carga o con una carga intermedia.
- Así mismo, se simulan perturbaciones de torque de carga, para cuando se producen cambios, ya sea en el torque dependiente o independiente de la velocidad.
- Se podrá analizar la máquina D.C., para cuando se produce un cambio en función paso del ángulo de activado

- de los tiristores, que conforman la fuente de alimentación de la armadura.
- Se permite un análisis de tiempo, para cuando la máquina es parada ya sea invirtiendo la fuente del campo o la de la armadura, o simplemente desconectando la armadura.
 - El programa digital presentado, permite el análisis de la máquina D.C., para cuando se produce un cambio en el ángulo de activado durante el proceso de arranque.
 - Se permite, finalmente, la circulación de la corriente de armadura en los dos sentidos, es decir se permite el análisis de la máquina D.C. cuando ésta es alimentada por convertidores duales en su armadura.

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

- 1.- MARTINEZ Nicolás, "Modelación Digital de una Máquina de Corriente Continua Alimentada por Circuitos o Tiristores", Tesis de Grado, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 1983.
- 2.- SANDOVAL Luis, "Comportamiento Dinámico de Máquinas Corriente Incluida la Saturación Magnética", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1981.
- 3.- KUSKO Alexander, "Solid State D.C. Motor Drives". MIT Press-Colonial Press Inc., Massachusetts-U.S.A., 1969, Capítulo 1-8.
- 4.- SHEMANSKE Richard. "Electronic Motor Braking". IEEE Trans Industry Applications, IA-19, Nº 5, 1983, págs. 824-826.
- 5.- BANDA Hugo, "Nuevas Tendencias en el Control de la Velocidad de Motores Eléctricos", IV Jornadas sobre Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1980, págs. IP 39 - IP 45.

- 6.- KAMIYAMA K. Konishi T., "Analysis of Transient Firing Angle in Reversible Thyristor Drive Speed Regulator for Mill Motor". IEEE Trans Industry Applications, IA-15, Nº 2, 1979, págs. 165-175.
- 7.- RAMSHAW Raymond, " Electrónica de Potencia: Potencia Controlada por Tiristores para Motores Eléctricos", Marcombo-Boixarew Editores, Barcelona-España, 1972, págs. 150-153.
- 8.- KOSOW Irving L., "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Editorial Reverté, S. A., Barcelona-España, 1975, Capítulo 4.
- 9.- FITZGERALD A. E., "Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas", Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Barcelona, Capítulo 8.
- 10.- Westinghouse Electric Corporation, "Generalized Machine", Motor and Control Division, New York, 1958.
- 11.- SALA J. M., "Electrónica y Automática Industriales". Editorial Marcombo, Barcelona-España, 1981.

- 12.- FRANKLIN Paul, "Theory of the D.C. Motor Controlled by Power Pulses, Part II: Braking Methods, Commutation and Additional Losses", págs 256-262.

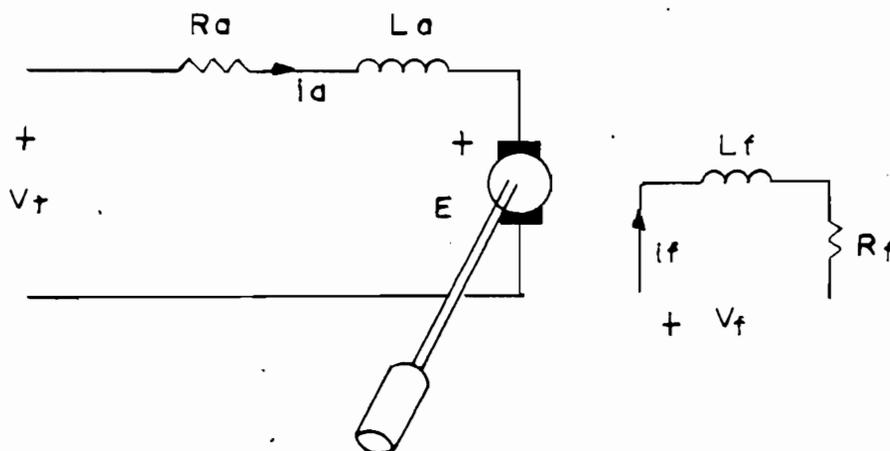
A P E N D I C E A

LA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA, SUS CARACTERISTICAS Y PARAMETROS

→ A.1. MODELO MATEMATICO DE LA MAQUINA D.C.-

La máquina de corriente continua, y específicamente la máquina de corriente continua con excitación independiente, al igual que todas las máquinas eléctricas, pueden ser representadas por modelos matemáticos.

El modelo elemental de la máquina de corriente continua que se presenta a continuación, nos sirve para obtener las ecuaciones electromecánicas que rigen el comportamiento de la máquina en cualquier instante.



→ Figura A.1. MODELO ELEMENTAL DE LA MAQUINA D.C.

* Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento dinámico de la máquina se resumen en:

$$V_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad \text{ecs. A.1.}$$

$$V_t = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E \quad \text{ecs. A.2.}$$

$$E = G_q \cdot i_f \cdot W \quad \text{ecs. A.3.}$$

Donde:

V_f = Tensión en bornes del campo de excitación.

R_f = Resistencia del campo de excitación.

i_f = Corriente através del campo.

L_f = Inductancia de campo.

V_t = Tensión en bornes de la armadura.

R_a = Resistencia de armadura.

i_a = Corriente através de la armadura.

L_a = Inductancia de la armadura.

E = Fuerza contra-electromotriz inducida.

W = Velocidad de la máquina.

G_q = Inductancia rotacional.

Al analizar las dos primeras ecuaciones, se puede ver que la A.1. es de coeficiente constantes, mientras que en la ecuación A.2. se tiene el término E, el mismo que varía de acuerdo a la velocidad de la máquina y a la corriente de campo.

A estas ecuaciones eléctricas, se debe agregar la ecuación de equilibrio mecánico, para de esta manera obtener el modelo total de la máquina, dicha ecuación viene expresada

en los siguientes términos:

$$T_e = J \cdot \frac{dW}{dt} + D \cdot W + T_L \quad \text{ecs. A.4.}$$

$$T_e = G_q \cdot i_a \cdot i_f \quad \text{ecs. A.5.}$$

Donde:

T_e = Torque electromagnético producido por la máquina.

J = Momento de inercia del eje.

W = Velocidad de la máquina.

D = Coeficiente de fricción viscosa.

T_L = Torque de la carga aplicada al eje.

Ahora, llamando Torque total (T), al torque de la carga aplicado al eje más el efecto que produce el coeficiente de fricción viscosa, y combinando las ecuaciones A.4. y A.5. se tiene:

$$G_q \cdot i_a \cdot i_f = J \cdot \frac{dW}{dt} + T$$

de donde:

$$J \cdot \frac{dW}{dt} = G_q \cdot i_a \cdot i_f - T \quad \text{ecs. A.6.}$$

Por lo tanto, se puede concluir que con la resolución de las tres ecuaciones diferenciales (A.1., A.2. y A.6.) obtenidas de éste modelo, se podrá analizar el comportamiento dinámico de la máquina D.C. en cualquier instante de su trabajo.

A.2. CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA D.C.-

A.2.1. Curva de Magnetización e Inclusión de la Saturación Magnética.-

La saturación magnética es provocada por el campo a través de la corriente de excitación, produciendo su efecto en la armadura por medio del voltaje inducido. Este voltaje inducido mantiene una relación lineal con respecto a la corriente de excitación hasta un cierto valor, valor a partir del cual se pierde dicha relación.

Al incluir el efecto de la saturación magnética en el modelo matemático, representado por las tres ecuaciones diferenciales descritas en el numeral anterior, se pierde la linealidad, lo cual, hace imposible resolverlas por medio de métodos convencionales, lo que hace que se utilicen procesos iterativos, como es el método Runge-Kutta de Cuarto Orden, proceso en el cual, se tiene que en cada paso de integración el voltaje inducido es "corregido".

Para la obtención del voltaje inducido corregido, se toma la corriente de excitación, con la cual se obtiene el voltaje inducido sobre la curva de magnetización tomada a una velocidad de referencia y, se pasa a otra curva de magnetización definida por la velocidad que se posee en ese instante, como se puede observar en la figura A.2.

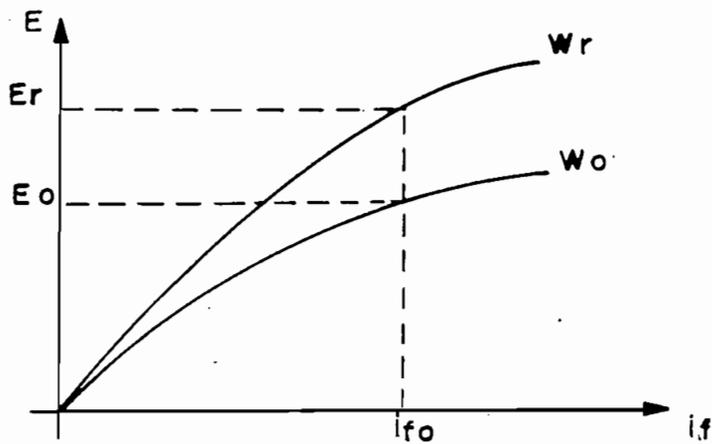


Figura A.2. INCLUSION DE LA SATURACION MAGNETICA

Se cumplen las siguientes relaciones:

$$E_r = K \cdot i_{fo} \cdot W_r$$

$$E_o = K \cdot i_{fo} \cdot W_o$$

$$\frac{E_r}{E_o} = \frac{W_r}{W_o}$$

$$E_o = \frac{W_o}{W_r} \cdot E_r \quad \text{ecs. A.7.}$$

Donde:

E_r = Voltaje inducido saturado a la velocidad de referencia.

E_o = Voltaje inducido saturado a la velocidad de la máquina.

W_r = Velocidad de referencia.

W_o = Velocidad de la máquina.

Incluyendo esta consideración al modelo matemático original, se tendrá:

$$V_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad \text{ecs. A.8.}$$

$$V_t = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E_o \quad \text{ecs. A.9.}$$

$$T_e = J \cdot \frac{dW}{dt} + T \quad \text{ecs. A.10.}$$

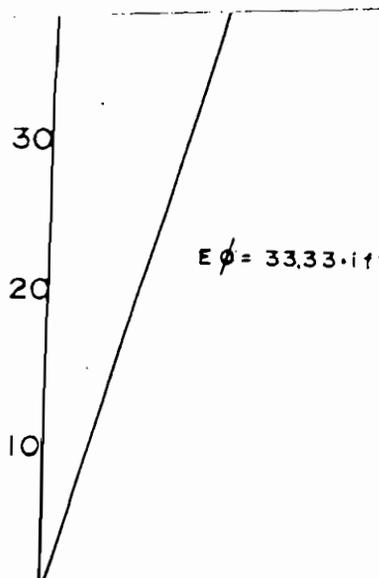
Las mismas que expresándolas en variables de estado, para poder obtener su solución con el método Runge-Kutta de Cuarto Orden, se tiene:

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{(V_f - I_f \cdot R_f)}{L_f} \quad \text{esc. A.11.}$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{(V_t - I_a \cdot R_a - E_o)}{L_a} \quad \text{esc. A.12.}$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{(T_e - T)}{J} \quad \text{esc. A.13.}$$

La curva de magnetización de la máquina utilizada para las pruebas experimentales y del programa digital se presenta en la figura A.3.



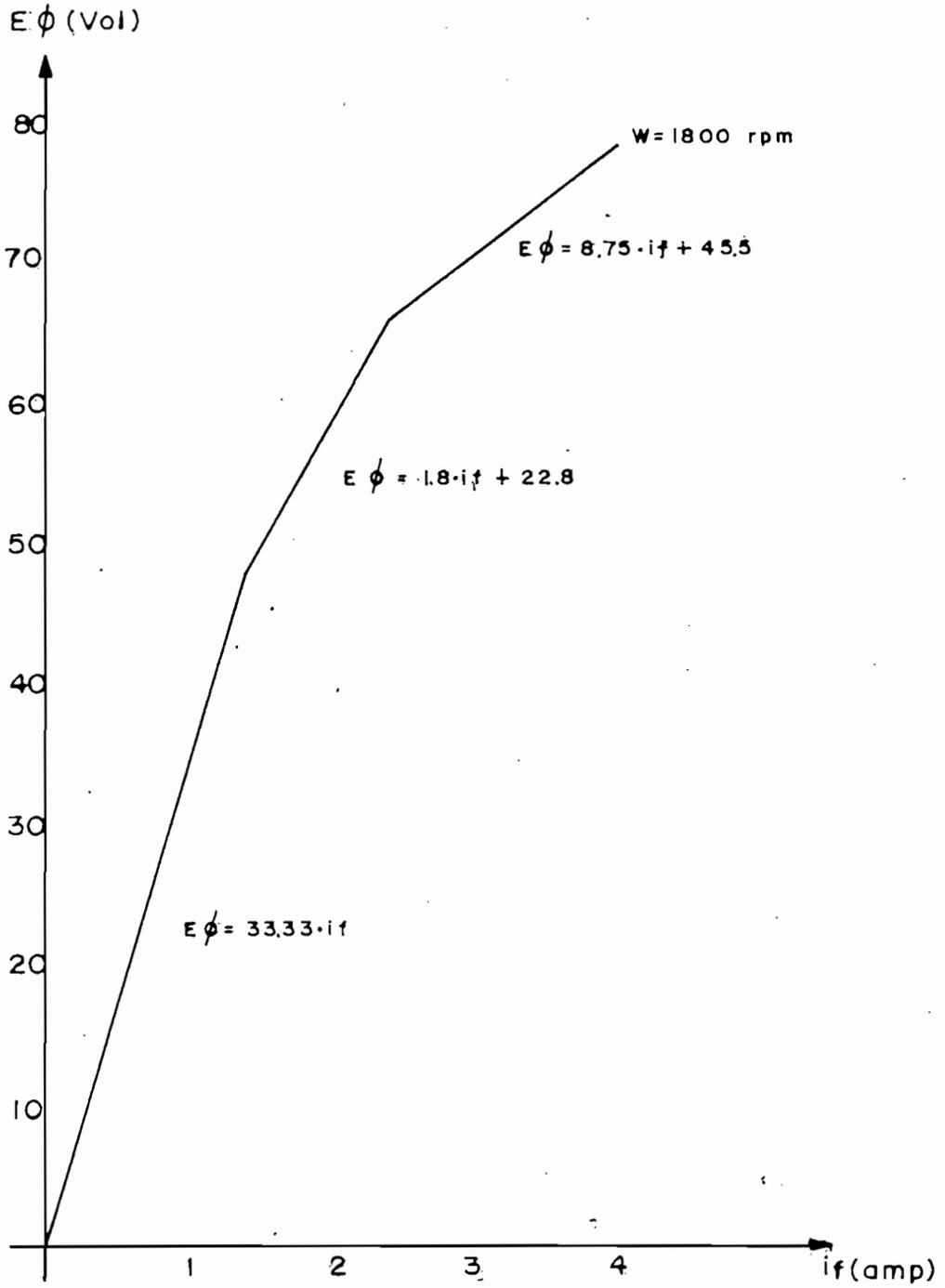


Figura A.3. CURVA DE MAGNETIZACION

A.2.2. Característica Torque de Carga - Velocidad.-

De la ecuación A.6. se tiene que para el estado estable se cumple:

$$T = G_q \cdot i_a \cdot i_f \quad \text{ecs. A.14.}$$

donde T es el torque aplicado a la carga incluido el efecto que produce el coeficiente de fricción viscosa. Para obtener ésta característica se puede seguir el siguiente método:

- Se mantiene i_f constante (para conexión de excitación independiente) en su valor nominal.
- G_q es conocida a partir de la curva de magnetización.
- Variando el voltaje que alimenta la armadura, se puede obtener diferentes valores de velocidad (de cero a valor nominal)
- Para cada valor de velocidad obtenida del paso anterior, se puede ir leyendo el valor correspondiente de la corriente de armadura i_a .
- Por último, utilizando la ecuación A.14. se puede obtener el torque de carga para cada punto de velocidad.

Para comprobar que la característica se mantiene en su linealidad, se realizó el método descrito, tanto en vacío como a plena carga, así como a un valor de carga intermedia. Los resultados obtenidos se presentan en la figura A.4.

Con respecto al método explicado anteriormente, se debe incluir el hecho de que G_q a pesar de ser una constante conocida tiene tres valores diferentes, dependiendo del valor de la corriente de campo (representa la pendiente en los tres tramos trazados en la curva de magnetización de la

figura A.3.), por lo tanto al calcular la curva torque de carga - velocidad, se debe considerar este factor. Por otro lado, ya que para motivos prácticos esta variación de G_q influye, en casi nada, la obtención de esta curva se hace en el presente trabajo la consideración de que la inductancia rotacional es fija y constante.

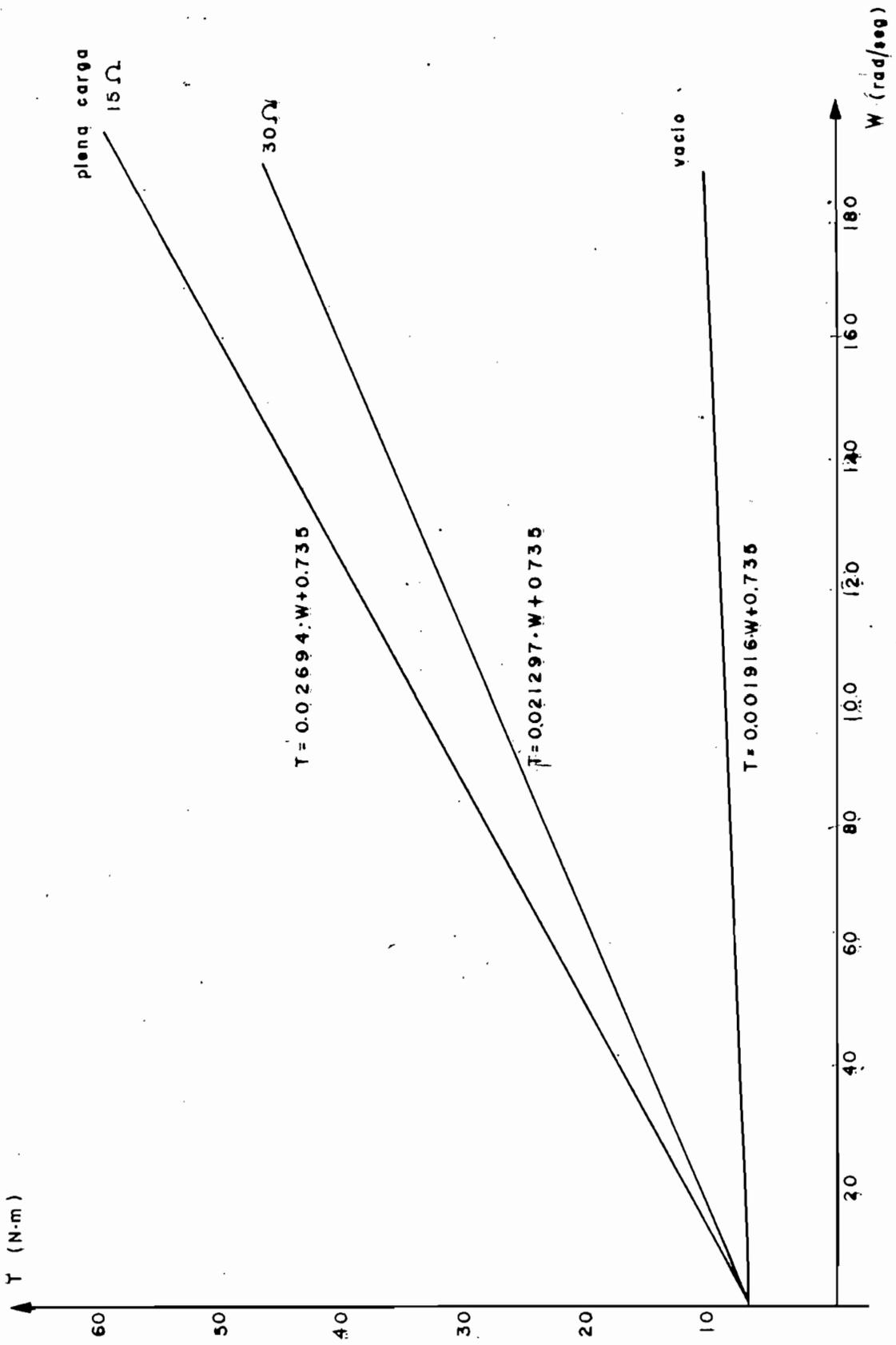


Figura A.4. CARACTERISTICA TORQUE DE CARGA vs VELOCIDAD

A.3. PARAMETROS DE LA MAQUINA D.C.-

Para la realización de pruebas, tanto experimentales como para la simulación digital, se utilizó la Máquina Generalizada Westinghouse que se dispone en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad, cuyos datos de placa se presentan a continuación:

ARMADURA:	230V - 8A (DC-AC)
CAMPO (BOBINAS EN SERIE):	230V - 3.6A (DC-AC)
CAMPO (BOBINAS EN PARALELO):	115V - 7.2A (DC-AC)

Esta máquina tiene acoplado al eje un ROTOR DRIVE MOTOR, la misma que al hacerla trabajar como generador permite cargar a la máquina impulsora; los datos de placa de ésta segunda máquina son:

ARMADURA:	240V - 10.8A (DC)
CAMPO:	240V - 0.562A (DC)

Los parámetros y características de la máquina fueron obtenidos de tesis anteriores y del manual, haciéndose además las comprobaciones correspondientes, llegando en algunos casos a cambiarlos, ya que se diferenciaban mucho de la realidad; para las comprobaciones, se realizó con anterioridad, el mantenimiento total de la máquina para que así, los valores obtenidos sean lo más confiable posible.

Dentro de los parámetros más importantes para la simulación, tenemos los correspondientes a la armadura, por lo tanto, se presenta a continuación los métodos utilizados para su obtención.

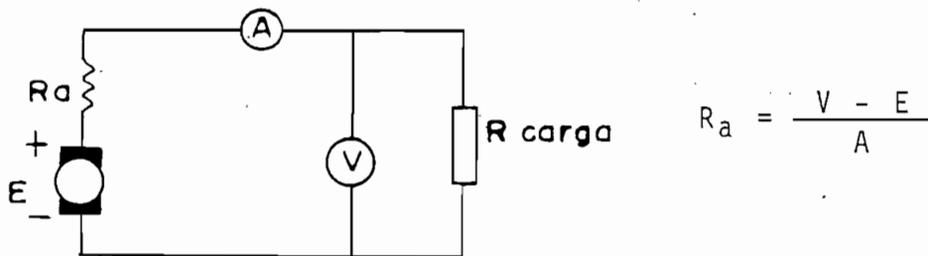
A.3.1. → Método para Calcular R_a .-

Con éste método se puede obtener el valor de la resistencia dinámica de la armadura. Los pasos a seguir se resumen en lo siguiente:

-Se hace generar en vacío la máquina D.C., a una velocidad constante y corriente de campo constante, tomando lectura del voltaje inducido (E).

-A las mismas condiciones de velocidad y corriente de campo se conecta una carga conocida, leyéndose para este caso el voltaje V y corriente A, sobre la carga.

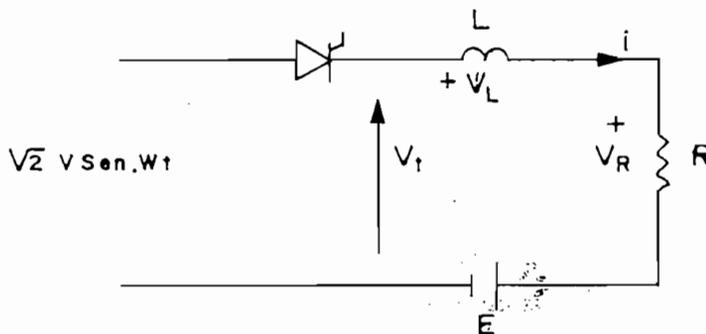
Por último se utiliza la siguiente relación:



→ Figura A.6. CALCULO DE RESISTENCIA DE ARMADURA.

A.3.2. Método para Calcular L_a .-

Para la obtención del valor dinámico de la inductancia de la armadura, partimos del siguiente modelo.



$$V_t = V_R + V_L + E \quad \text{ecs. A.15.}$$

$$V_t = iR + L \cdot \frac{di}{dt} + E \quad \text{ecs. A.16.}$$

Resolviendo para el período: $\alpha < \omega t < \alpha_e$

$$i = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{Z} \operatorname{sen}(\omega t - \phi) - \frac{m}{\cos \phi} - \left\{ B \cdot e^{-(\alpha - \omega t) / \operatorname{tag} \phi} \right\} \quad \text{esc. A.17.}$$

donde:

$$B = \frac{m}{\cos \phi} - \operatorname{sen}(\alpha - \phi) \quad \text{esc. A.18.}$$

$$m = \frac{E}{\sqrt{2} \cdot V} \quad \text{esc. A.19.}$$

$$Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2} \quad \text{esc. A.20.}$$

$$\phi = \operatorname{tag}^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad \text{esc. A.21}$$

Ahora, aplicando la condición de que en $\omega t = \alpha_e$ la corriente es cero, se tiene:

$$\frac{(m / \cos \phi) - \operatorname{sen}(\alpha_e - \phi)}{(m / \cos \phi) - \operatorname{sen}(\alpha - \phi)} = e^{-(\alpha_e - \alpha) / \operatorname{tag} \phi} \quad \text{esc. A.22.}$$

Por otro lado, se tiene que con un osciloscopio se puede observar la forma de onda de voltaje sobre la armadura, pudiendose así obtener fácilmente los valores del ángulo (α), ángulo de extinción (α_e), voltaje inducido (E) y voltaje pico ($\sqrt{2} \cdot V$), quedando como única incógnita el valor de ϕ , la cual, resolviendo la ecuación A.22. se la puede obtener.

Como ya se obtuvo anteriormente el valor de R (resistencia de armadura) y $w = 2 \cdot \pi \cdot 60$ (frecuencia angular), se podrá obtener con la ayuda de la ecuación A.21. el valor de la inductancia.

Los parámetros finalmente utilizados son:

Resistencia de Armadura: 2.71 ohm

Inductancia de Armadura: 0.05 H

Resistencia de Campo: 3.7 ohm

Inductancia de Campo: 0.4 H

Momento de Inercia: 0.011 Kg \cdot m²

Inductancia Rotacional: 0.1768 $\frac{\text{Vol} \cdot \text{seg}}{\text{A} \cdot \text{rad}}$ para $i_f < 1.4$ A

0.157893 $\frac{\text{Vol} \cdot \text{seg}}{\text{A} \cdot \text{rad}}$ para $i_f < 2.4$ A

0.118987 $\frac{\text{Vol} \cdot \text{seg}}{\text{A} \cdot \text{rad}}$ para $i_f < 4.0$ A

A P E N D I C E . B

CIRCUITO EXPERIMENTAL

Para comprobar la validez del programa digital, fue necesario el diseño y construcción de un circuito electrónico que nos permita realizar en la máquina, las mismas o por lo menos gran parte de las condiciones de trabajo que realiza el programa.

Por lo tanto, se construyó un convertidor controlado monofásico AC-DC tipo puente el mismo que permitía el trabajo ya sea como rectificador (por ángulo de activado $< 90^\circ$) o como inversor (para ángulo de activado $> 90^\circ$), además presentaba un control sobre el ángulo de activado de $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ (teóricamente) en su trabajo estable.

Para la realización de éste circuito se basó en experiencias tomadas de trabajos anteriores y de experiencias que se iban presentando a medida que se desarrollaba en mismo, razón por el cual no se presta un mayor interés en cuanto al cálculo de valores y más bien se presenta el circuito final que sirvió para las pruebas experimentales.

B.1. CIRCUITO DE DISPARO.-

La figura B.1. presenta en diagrama de tiempo las diferentes señales del circuito de disparo.

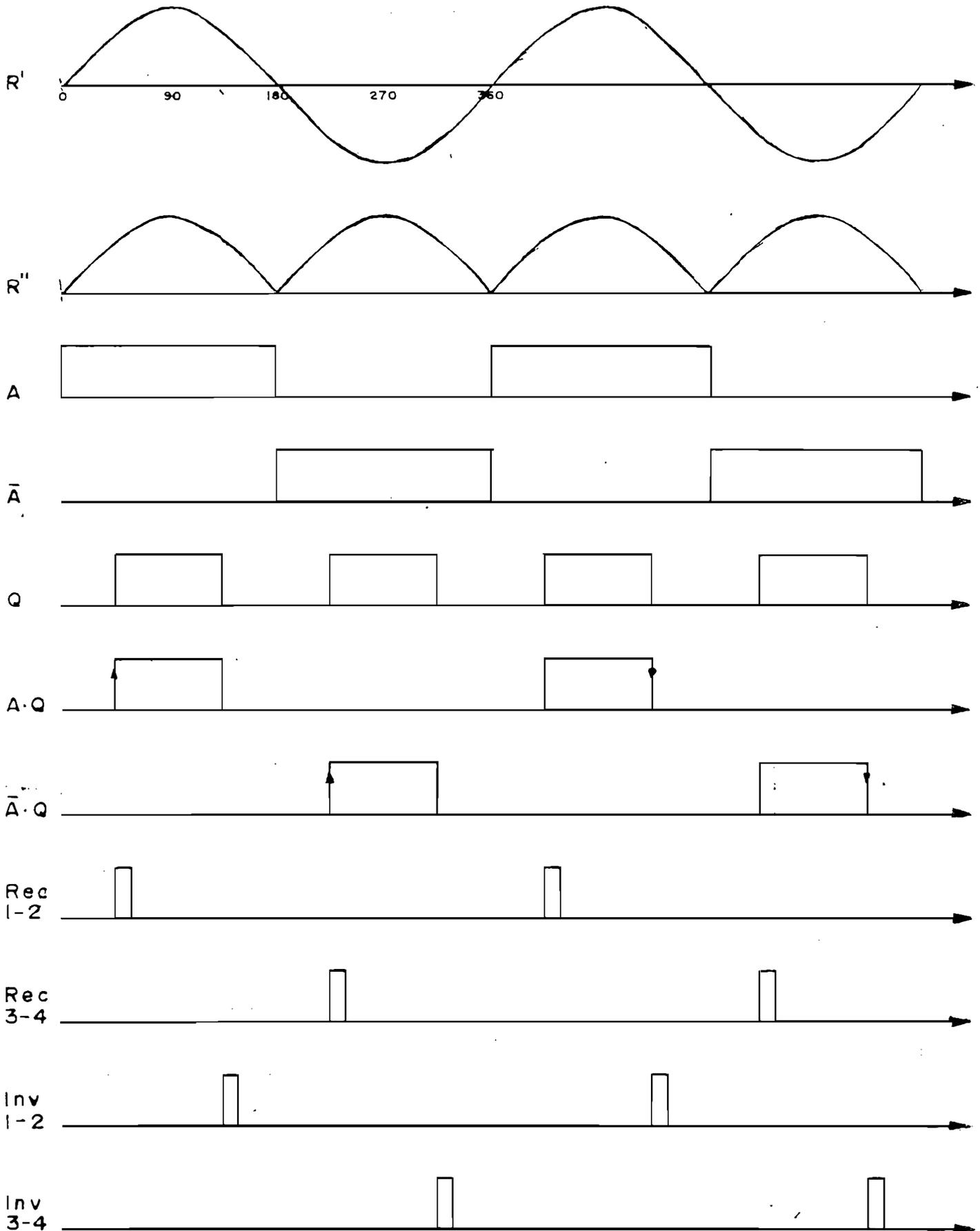
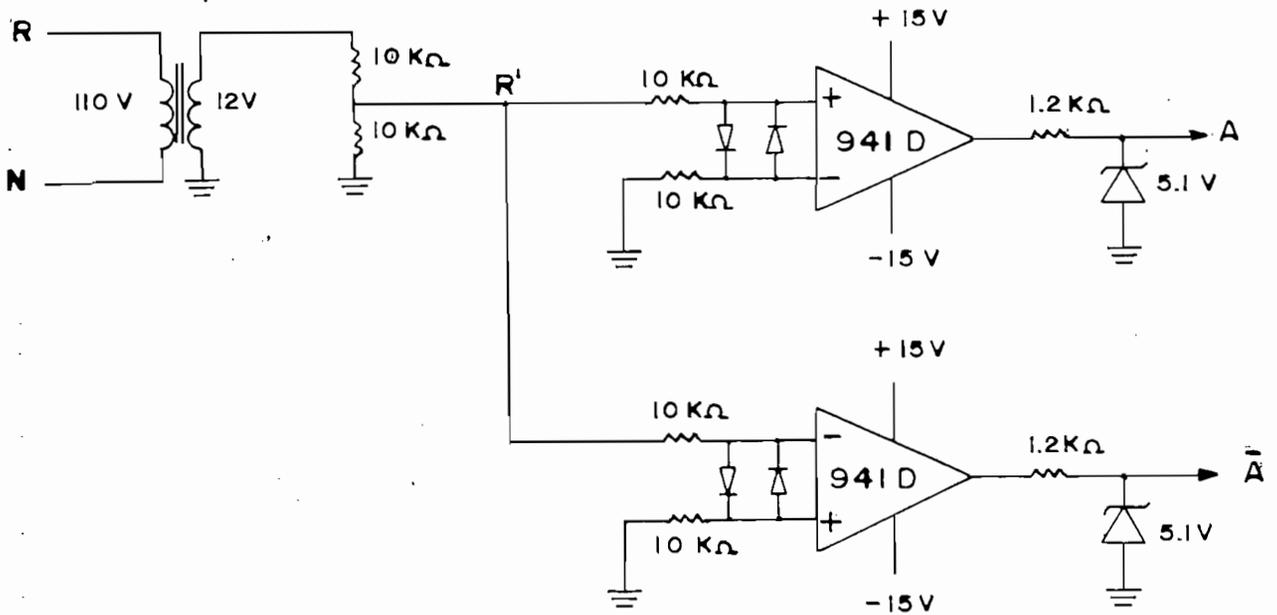
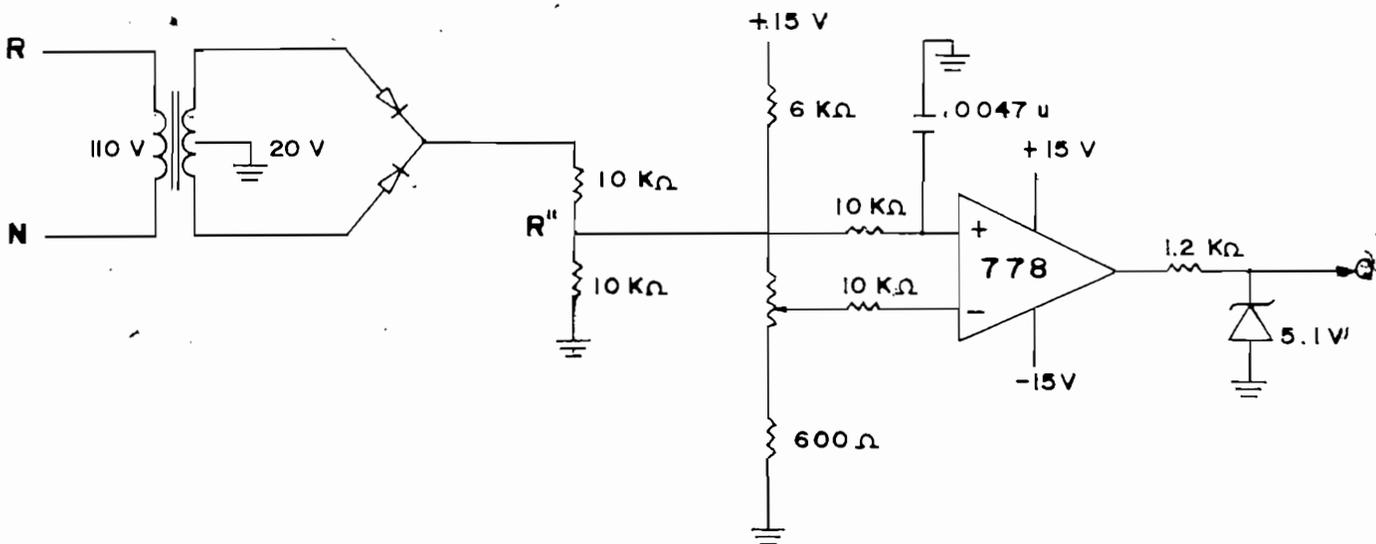


Figura B.1. DIAGRAMA DE TIEMPO DE LAS SEÑALES DE CONTROL

B.1.1. Generador de las Señales A y \bar{A} .



B.1.2. Generador de la Señal Q



Para obtener las señales $Q \cdot A$ y $Q \cdot \bar{A}$ se utiliza una compuerta TTL 7408, la misma que realiza la operación AND, como se muestra en el siguiente circuito:

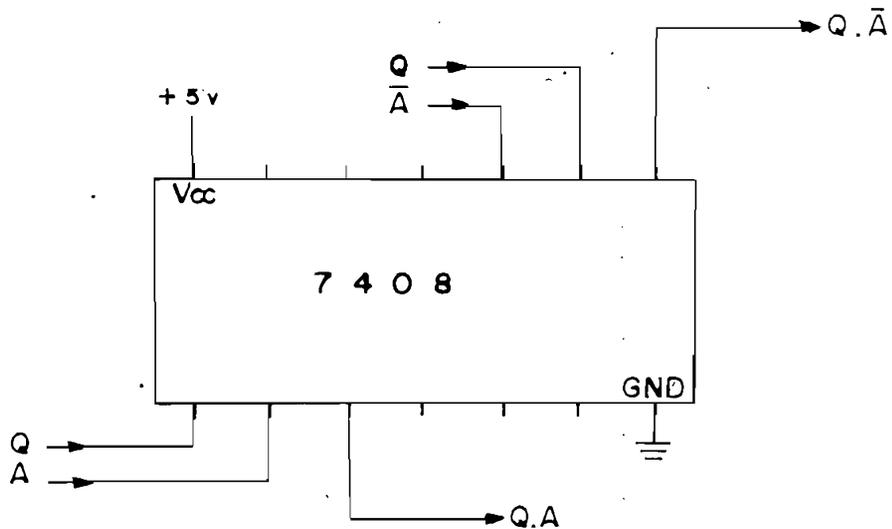


Figura B.2. CIRCUITO PARA $Q \cdot A$ Y $Q \cdot \bar{A}$

Como se puede observar en el diagrama de tiempo, los flancos positivos de las señales $Q \cdot A$ y $Q \cdot \bar{A}$ generan los pulsos de activado de los tiristores 1-2 y 3-4 respectivamente, al estar actuando el conversor controlado como rectificador. Por el contrario, los flancos negativos de las mismas señales disparan a los mismos tiristores pero actuando esta vez el conversor como inversor.

Para producir los pulsos de activado de los tiristores ya sea con los flancos positivos o negativos de las señales $Q \cdot A$ y $Q \cdot \bar{A}$, se utilizan monoestables (74121) y cuya conexión se presenta en el siguiente circuito:

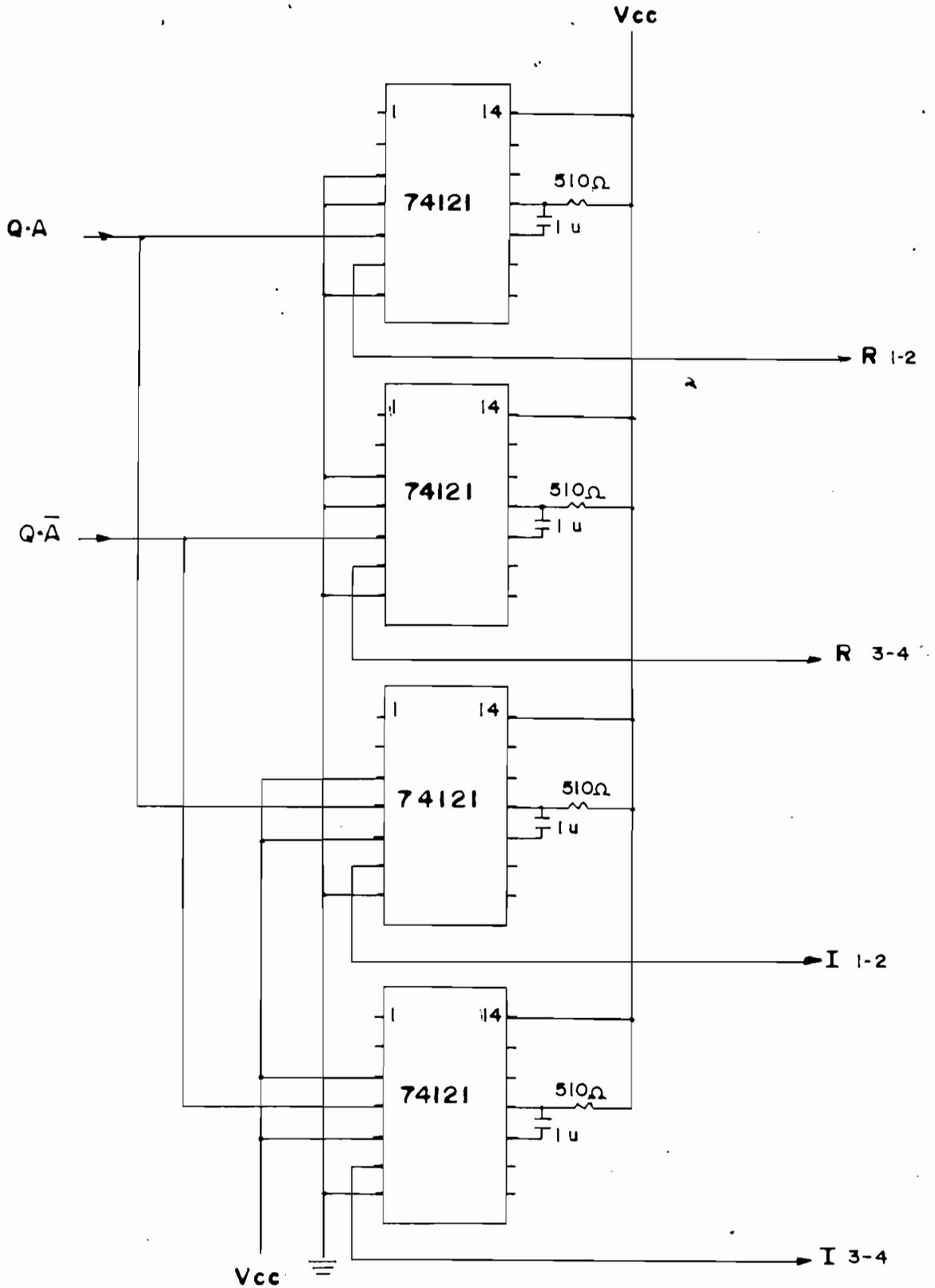


Figura B.3. CIRCUITO PARA REC 1-2, REC 3-4, INV 1-2, INV 3-4

Para poder conseguir las perturbaciones en el ángulo (cambio de rectificador o inversor) ya sea para el arranque o en su estado estable, se diseñó un circuito combinacional, el mismo que se realizó en base a multiplexer (74257), cuya tabla de funcionamiento se presenta en el cuadro B.4. y cuyo circuito de conexión se presenta en la figura B.5.

A	TIRISTORES	
	1-2	3-4
0	R ₁₋₂	R ₃₋₄
1	I ₁₋₂	I ₃₋₄

Cuadro B.4. TABLA DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO COMBINACIONAL

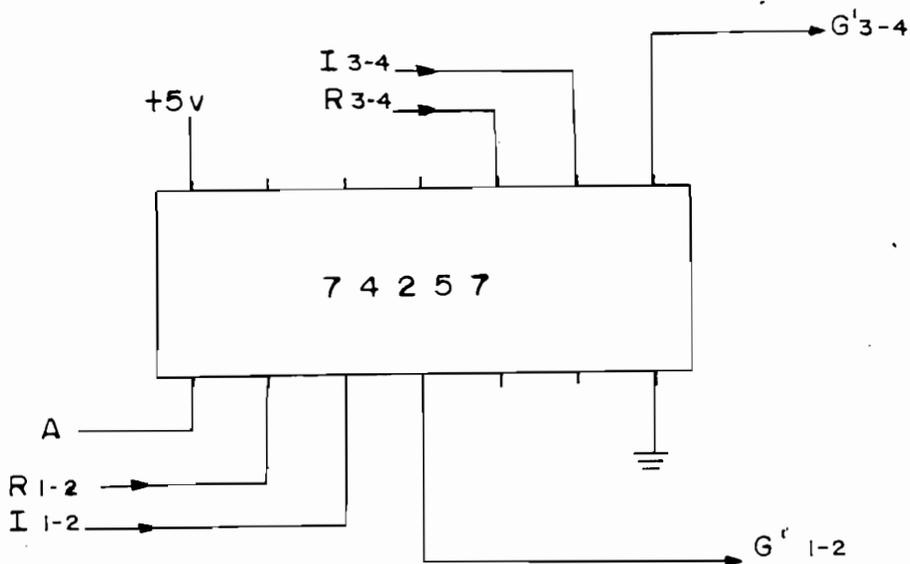


Figura B.5. CONEXION DEL CIRCUITO COMBINACIONAL

B.1.3. Circuito de Acoplamiento.-

Una vez obtenidas las señales de activado de los tiristores, se hace necesario un acoplamiento de estas señales con las compuertas de los tiristores, pero manteniendo a la vez un aislamiento eléctrico entre el circuito de disparo y el circuito de fuerza, dichas condiciones se obtienen con la utilización de optoacopladores. La figura B.8. presenta el circuito de conexión del circuito de acoplamiento.

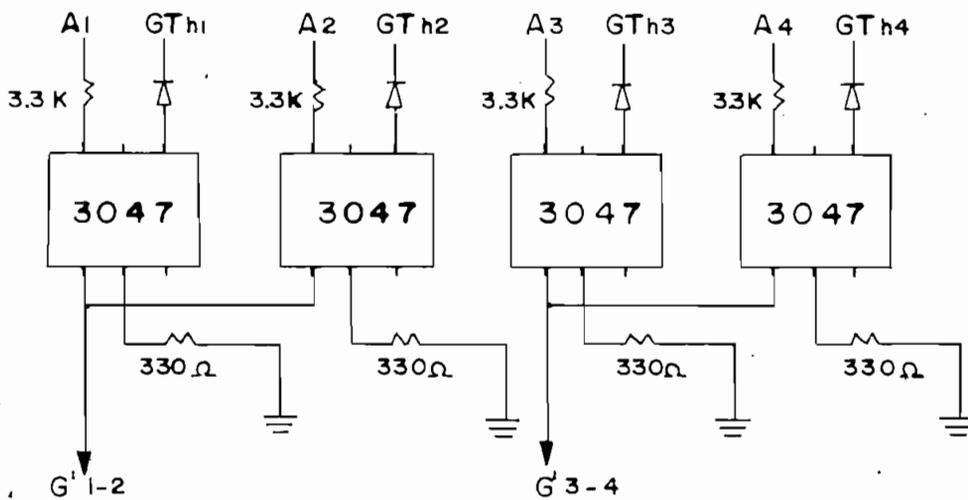


Figura B.8. CONEXION DEL CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO

B.2. CIRCUITO DE FUERZA.-

El circuito de fuerza lo constituye el puente de tiris_ tores, así como sus protecciones, como se puede ver en la fi_ gura B.9.

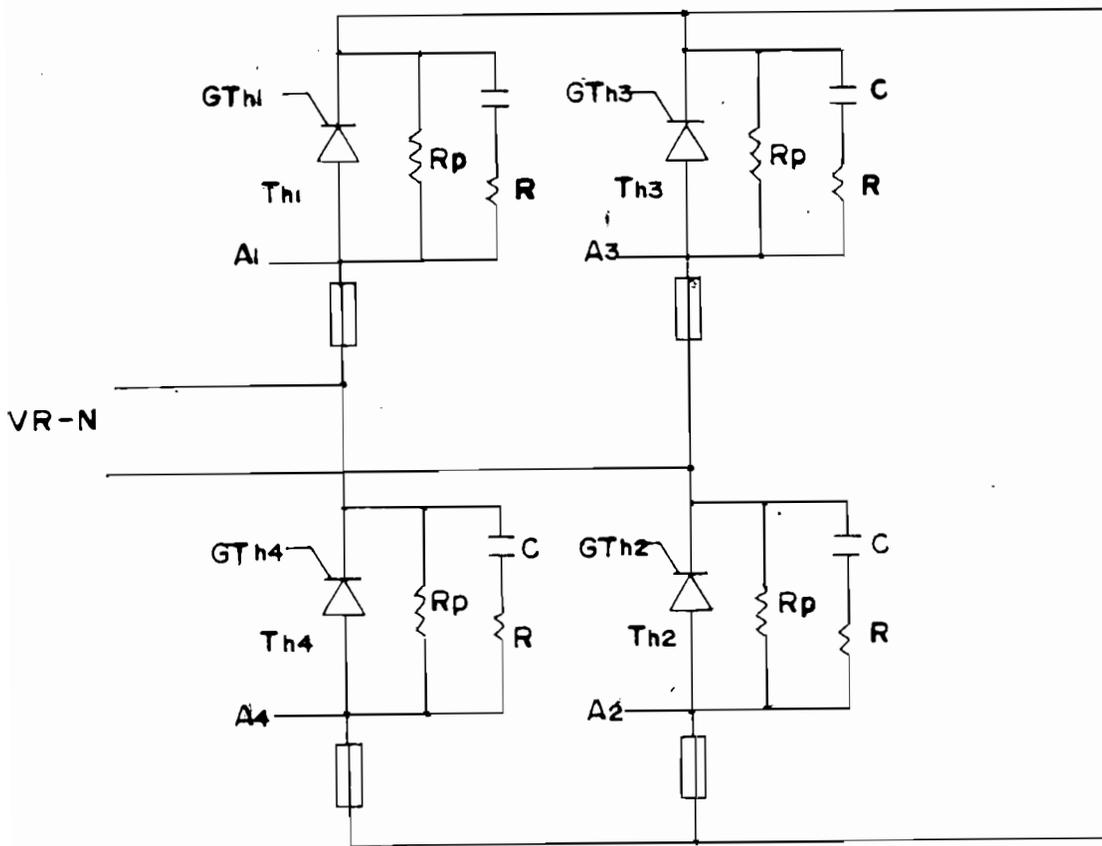


Figura B.9. CIRCUITO DE FUERZA

donde:

$$R_p = 680 \text{ K}\Omega$$

$$R = 20 \Omega$$

$$C = 0.01 \mu$$

A P E N D I C E C

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA

C.1. OBJETIVO.-

El desarrollo de este programa tiene como objetivo principal el análisis del comportamiento dinámico de una máquina de corriente continua excitada independientemente y alimentada con circuitos convertidores controlados AC-DC, los mismos que permiten a la máquina un trabajo en cuatro cuadrantes.

C.2. METODO DE SOLUCION.-

Para el análisis se utiliza un modelo matemático en función de corrientes, este modelo describe tres ecuaciones diferenciales, las mismas que se resuelven con el método Runge-Kutta de Cuarto Orden permitiendo así un cálculo iterativo con el cual se puede ir evaluando en cada paso de integración las diferentes variables.

C.3. DESCRIPCION.-

El programa digital se lo puede describir básicamente en:

- Un programa principal denominado TESIS, que sirve como enlace de ocho subprogramas, además, éste programa permite leer un archivo de parámetros de la máquina que se utilizó en la última corrida, y si se desea estos pueden ser variados.

-Ocho subprogramas, de los cuales uno es el programa FUNCION que permite seleccionar el tipo de trabajo que se desea analizar en la máquina; cuatro programas denominados: MOTOR 1 para el arranque con cualquier ángulo y para el estado estable, MOTOR 2 para el arranque con cambio de ángulo y las perturbaciones, MOTOR 3 para las paradas y, MOTOR 4 para las inversiones de giro, éstos cuatro subprogramas realizan el proceso iterativo con el método Rünge-Kutta; por último se tienen tres subprogramas que simulan a las fuentes de alimentación denominados COND2TP, COND3MO y COND3TP para el caso de estar con conversor dual monofásico tipo puente, conversor dual trifásico de media onda o conversor dual trifásico tipo puente, respectivamente.

-Además se tiene un subprograma denominado GRAFICO, que es llamado a la memoria del computador una vez terminado el proceso de cálculo y, permite la presentación de los resultados mediante gráficos así como las condiciones iniciales utilizadas.

C.4. NOMENCLATURA.-

Para un mejor manejo del programa, se presenta una lista de las principales variables utilizadas:

- A1 Angulo de retardo con que se activan los tiristores en los conversores.
- A2 Valor del nuevo ángulo de activado que se tiene al producirse la perturbación.

- D2 Momento de inercia de la máquina.
- EØ Voltaje inducido saturado..
- FØ Frecuencia de la red de alimentación.
- F(1) Derivada de la corriente de campo.
- F(2) Derivada de la corriente de armadura.
- F(3) Derivada de la velocidad.
- G1 Inductancia rotacional.
- H Intervalo de integración.
- I4 Tiempo en que deben activarse los tiristores.
- I5 Bandera que permite ir a las subrutinas de cambio de ángulo según sea su valor.
- I7 Bandera para cambiar el intervalo de integración y el valor del ángulo al producirse la perturbación.
- I8 Bandera para regresar al intervalo de integración original una vez producida la perturbación.
- J1 Seleccionador del cuadrante en que se quiere que trabaje la máquina (1ero. ó 3ero.).
- J3 Seleccionador de la fuente de alimentación.
- J5 Seleccionador del tipo de arranque.
- J6 Seleccionador del tipo de cambio de giro.
- J7 Seleccionador del tipo de parada.
- J8 Seleccionador del trabajo de la máquina.
- J9 Seleccionador del tipo de perturbación.
- KØ Seleccionador de la función sinusoidal que se aplica a la máquina.
- K1 Seleccionador de la subrutina para el caso de tener perturbación en el ángulo.

- K2 Seleccionador del programa MOTOR# que simula a la máquina (proceso Runge-Kutta).
- K3 Bandera que invierte el análisis del cruce por cero de la corriente.
- K6 Bandera que invierte la función del torque de carga al invertirse el sentido de giro del motor.
- L1 Inductancia de campo.
- L2 Inductancia de armadura.
- M Determina en que paso del proceso de integración se encuentran los cálculos.
- N Número de ecuaciones diferenciales.
- NØ Número de puntos totales a calcularse.
- N1 Número de puntos por intervalo de posible conducción.
- N2 Contador del número de puntos totales calculados.
- N3 Contador del número de puntos calculados en un período.
- N4 Puntos que faltan por ser calculados, luego de una conducción discontinua.
- N5 Número de puntos que se disminuyen para producir el nuevo intervalo de tiempo cuando se tiene una perturbación en el ángulo de activado.
- R1 Resistencia de campo.
- R2 Resistencia de armadura.
- R3 Resistencia en serie con el campo.
- R4 Resistencia en serie con la armadura.
- T Tiempo simulado. Tiempo del proceso Runge-Kutta.
- T3 Torque de carga.

- T5 Valor del torque independiente de la velocidad que entra al producirse la perturbación.
- T7 Tiempo en el cual se produce la perturbación.
- T8 Valor del torque dependiente de la velocidad que entra al producirse la perturbación.
- VØ Voltaje de alimentación de la red.
- V1 Voltaje de alimentación del campo.
- V2 Voltaje de alimentación de la armadura.
- V3 Voltaje de campo invertido.
- W Frecuencia angular.
- Y(1) Corriente de campo.
- Y(2) Corriente de armadura.
- Y(3) Velocidad.

Dentro del programa digital se tiene un número mayor de banderas, las cuales no han sido definidas ya que son para uso propio de la ejecución del programa y a las que el uuario no tiene acceso alguno.

C.5. INGRESO DE DATOS.-

Al realizar la ejecución del programa, el usuario deberá ir proporcionando la información de valores y de condiciones de trabajo al computador. El orden y la forma de dar esta información se esquematiza en los siguientes pasos:

- Luego de la introducción en la que se define la unidad de disco que está siendo utilizada, así como la presentación del tema, autor, fecha, objetivo y método, se presentan los parámetros de la máquina que se

utilizó en la corrida anterior. Se pregunta si se de sea cambiarlos, si la respuesta es afirmativa, el programa pregunta por los nuevos parámetros, en la siguiente forma:

Resistencia de armadura (ohm)

Resistencia de campo (ohm)

Inductancia de campo (henrios)

Inductancia de armadura (henrios)

Inductancia rotacional (Vol.seg/amp.rad)

Momento de inercia del rotor (Kg.m²)

Resistencia de arranque del campo (ohm)

Dentro de éste grupo de parámetros que ingresan al programa, se debe tener en cuenta que, el valor de la inductancia rotacional no tiene importancia, ya que éste es redefinido dentro del programa mismo, por lo tanto, si se desea simular otra máquina, se tendrá que hacer los cambios en la subrutina de la inclusión de la saturación magnética. Por otro lado, en cuanto al momento de inercia se refiere, el valor que se ingresa para éste caso es el momento de inercia del conjunto motor-generador, ya que las perturbaciones de carga simuladas se realizan con un cambio en la carga resistiva conectada a los terminales del generador, por lo tanto si se desea simular una perturbación con carga mecánica, se tendrá que ingresar el momento de inercia del motor y el de la carga. Por último, en cuanto a los valores de resistencias de arranque que

se conectan en serie con el campo y con la armadura, son las resistencias que se tienen para limitar la corriente de campo en su valor nominal, para el primer caso, y para limitar el pico de la corriente de arranque en la armadura, en el segundo, pero para la simulación, ésta segunda resistencia es igual a cero ya que el pico de la corriente se la limita con el ángulo inicial de activado de los tiristores de la fuente.

-Luego de ésto, se pregunta por el cuadrante en que se quiere el trabajo de la máquina:

1. Trabajo en primer cuadrante.
2. Trabajo en tercer cuadrante.

Para el trabajo estable de la máquina, se escoge únicamente entre el primer y tercer cuadrante, ya que la máquina al funcionar con carga rotacional, trabaja en el segundo y cuarto solo como estado transitorio en los procesos de parada y cambio de giro.

-Se selecciona el trabajo de la máquina entre los siguientes casos:

1. Arranque
 - Con cualquier ángulo fijo
 - Con cambio de ángulo durante el proceso
2. Estado Estable
3. Perturbaciones
 - Incremento brusco de carga
 - Cambio de ángulo de disparo
4. Paradas
 - Con inversión en el campo
 - Con desconexión de la armadura
 - Con inversión en la armadura
5. Cambio de Giro
 - Con inversión en el campo
 - Con inversión en la armadura

-Una vez seleccionado entre los casos anteriores se pregunta:

Corriente de campo (amp)

Corriente de armadura (amp)

Velocidad (rad/seg)

Voltaje de alimentación del campo (volt)

Solo para el caso del arranque el programa hace automáticamente la encerrada en los valores de corrientes y velocidad. Al seleccionar una perturbación en la carga, se preguntan los nuevos valores del torque, de pendiente (B), e independiente (K) de la velocidad, pero se debe tener en cuenta que para la simulación realizada, el valor que ingresa es la diferencia entre el nuevo valor de torque y el original, debido a que al producirse la perturbación de torque, se suma el valor ingresado con el que se tenía originalmente; por otro lado si se desea simular una perturbación en el ángulo de activado, se pregunta por el nuevo valor del ángulo, para ambos casos de perturbación se pregunta después, por el tiempo en el cual se produce la perturbación. Para el caso de estar en paradas o en cambio de giro, se pregunta por el tiempo en que se produce la parada o el cambio de giro respectivamente.

-Se selecciona entre los tipos de alimentación disponibles:

1. Conversor dual monofásico tipo puente.
2. Conversor dual trifásico de media onda.
3. Conversor dual trifásico tipo puente.

-Una vez seleccionada la alimentación se pregunta:

Voltaje de alimentación de armadura (volt)

Frecuencia de la red (1/seg)

Número de puntos

Número de puntos por intervalo de conducción

Angulo de disparo.

-Por último se da el nombre del archivo en donde se guardarán los resultados, si ese archivo ya ha sido creado en corridas anteriores, se pregunta si se desea destruirlo.

C.6. UTILIZACION.-

Para trabajar con éste programa en el computador Tektronix 4051 que se dispone en la Facultad, se inserta el disco que está con el nombre LEOPOLDO SANCHEZ en cualquier unidad, y se lo carga en la memoria del computador con la instrucción

```
CALL "MOUNT", Ø, X$
```

Luego se llama al programa principal con las siguientes instrucciones

```
OLD "@ POLO /TESIS"
```

```
RUN
```

Los pasos que siguen luego de ésta última instrucción ya han sido explicados anteriormente en éste mismo apéndice.

Una vez terminado el proceso iterativo, se llama nuevamente a la memoria, el archivo de datos, y se pregunta qué gráfico se desea:

1. Corriente de campo
2. Corriente de armadura
3. Velocidad
4. Voltaje de alimentación de la armadura

A partir de ésto el programa informa los valores máximos y mínimos de la variable seleccionada y del tiempo, para luego pedir que sean definidos los parámetros del WINDOW y VIOWPORT, así como las marcas en los ejes.

Luego se pregunta si se desea el gráfico en pantalla o en plotter, con la opción de aumentar comentarios y de pedir otro gráfico. Se tiene además, que para cada gráfico se presentan las condiciones iniciales utilizadas, con la misma opción de poder ser presentadas en pantalla o en papel.

C.7. RESTRICCIONES.-

Para observar las limitaciones de éste programa, se realizaron varias pruebas en las que se variaron los diferentes parámetros, llegando a las siguientes conclusiones:

- Para la armadura.- El valor de la resistencia de armadura no influye en la ejecución del programa, teniendo su efecto solamente en el pico de la corriente. Por otro lado, para que el programa trabaje normalmente se debe poner una inductancia de armadura mayor a los 0.001 H.
- Para el campo.- Al igual que para la armadura, se puede trabajar para cualquier valor de resistencia de campo y para una inductancia de campo de 0.001 H.

- Para el momento de inercia.- Este valor debe ser mayor a los $1 \cdot 10^{-9}$ Kg.m² para que el programa trabaje normalmente.
- Para la fuente de alimentación.- En cuanto al voltaje de alimentación para condiciones nominales no debe ser menor a los 80 voltios, en cambio, para el arranque se puede trabajar con un voltaje de alimentación mayor a 0.1 voltio con el problema de que se tendrá señal de voltaje y corriente, pero obviamente la máquina permanecerá detenida. En cuanto a la frecuencia de la fuente, el valor ingresado deberá ser mayor a 10 (1/seg) y no mayor a 500 (1/seg), observándose que para valores más grandes de lo normal (60 1/seg) se tiene que el tiempo de integración es muy pequeño. Por otro lado, el número de puntos por intervalo de conducción en que se divide la curva deberá estar comprendido entre los valores de 10 y 30 ya que para valores más pequeños la onda se deforma y para valores más grandes, el proceso de integración dura mucho. En cuanto al ángulo de activado, el programa tiene como limitación el producir errores para cuando se trabaja con ángulos menores a 30 grados y mayores a 150. Estos errores son propios de las limitaciones físicas del computador utilizado.
- Para condiciones iniciales.- Al poner el voltaje de la fuente de campo igual a cero, la velocidad aumenta, lo cual, en la realidad se toma como un embalamiento de la máquina.

C.8. EJEMPLO.-

Para el ejemplo vamos a suponer, que se desea simular un estado estable.

Una vez ejecutado el comando OLD "Ⓢ POLO/TESIS" es necesario iniciar el funcionamiento con el comando RUN, posteriormente aparecen los siguientes mensajes:

INGRESE LA UNIDAD DE DISCOS (0,1,2):? 0

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL

TESIS DE GRADO

TITULO: SIMULACION DIGITAL DE CONTROL DE MAQUINA D.C.
EN CUATRO CUADRANTES

AUTOR: LEOPOLDO SANCHEZ GARCIA

FECHA: FEBRERO DE 1985

RETURN (para continuar)

OBJETIVO: Estudiar el comportamiento dinámico de la máquina excitada independientemente, ya sea en su estado estable o cuando sobre ella se tiene una perturbación, estando esta controlada en cuatro cuadrantes.

METODO: Se utiliza un modelo matemático en función de

corrientes. Las ecuaciones diferenciales se resuelven por el método RUNGE-KUTTA de Cuatro Orden.

RETURN (para continuar)

LOS PARAMETROS ANTERIORMENTE UTILIZADOS FUERON:

RESISTENCIA DE CAMPO (ohm)	3.7
RESISTENCIA DE ARMADURA (ohm)	2.71
INDUCTANCIA DE CAMPO (henrios)	0.4
INDUCTANCIA DE ARMADURA (henrios)	0.005
RESISTENCIA DE ARRANQUE DE CAMPO (ohm)	1.8
RESISTENCIA DE ARRANQUE DE ARMADURA (ohm)	0.0
INDUCTANCIA ROTACIONAL (volt.seg/amp.rad)	0.1768
MOMENTO DE INERCIA DEL ROTOR (kg.m ²)	0.011

DESEA CAMBIAR (si ó no) ? NO

SELECCION DEL FUNCIONAMIENTO ESTABLE DE LA MAQUINA

1. TRABAJO EN PRIMER CUADRANTE
2. TRABAJO EN TERCER CUADRANTE

ESCOJA ? 1

SELECCION DEL TRABAJO DE LA MAQUINA

1. ARRANQUE
2. ESTADO ESTABLE
3. PERTURBACION
4. PARADA
5. CAMBIO DE GIRO

ESCOJA ? 2

CORRIENTE DE CAMPO (amp) ? 4
CORRIENTE DE ARMADURA (amp) ? 0
VELOCIDAD (rad/seg) ? 220
- VOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (volt) ? 22

SELECCION DEL TIPO DE ALIMENTACION DISPONIBLES

1. CONVERTOR DUAL MONOFASICO TIPO PUENTE
2. CONVERTOR DUAL TRIFASICO DE MEDIA ONDA
3. CONVERTOR DUAL TRIFASICO TIPO PUENTE

ESCOJA ? 1

VOLTAJE DE ALIMENTACION DE LA ARMADURA (volt) ? 118
FRECUENCIA DE LA RED (1/seg) ? 60
NUMERO DE PUNTOS ? 100
NUMERO DE PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION ? 15
ANGULO DE DISPARO (deg) ? 66

NOMBRE DEL ARCHIVO ? POLO

Luego de haber ingresado todos estos datos, el programa tarda en su ejecución aproximadamente 5 minutos.

Posteriormente se procede a la graficación, la que puede ser presentada en pantalla o en plotter así como la presentación de las condiciones iniciales.

Los resultados obtenidos para este ejemplo se presentan en los gráficos 4.9., 4.10., 4.11. y 4.12. del Cap. IV.

Es necesario aclarar, que en el ejemplo presentado, el carácter después del signo de interrogación es el dato ingresado por el usuario.

A P E N D I C E D

L I S T A D O

D E L

P R O G R A M A

```

100 PRINT "LJJJINGRESE LA UNIDAD DE DISCOS (0,1,2): ";
110 INPUT UO
120 CALL "UNIT",UO
130 PRINT "LJJ
140 PRINT "
150 PRINT "JJ
160 PRINT "
170 PRINT "JJ
180 PRINT "
190 PRINT "JJTITULO:
200 PRINT "
210 PRINT "JJAUTOR:
220 PRINT "JJFECHA:
230 PRINT "JJJ
240 INPUT X$
250 PRINT "LJJOBJETIVO:
260 PRINT "
270 PRINT "
280 PRINT "
290 PRINT "
300 PRINT "JJJMETODO:
310 PRINT "
320 PRINT "
330 PRINT "JJJJJ
340 INPUT X$
350 CALL "USERLIB","POLO"
360 DIM F(4),P0(4),Y(4),S0(4),Z(3,4),Z1(3,4),Z2(3,4)
370 DIM A3(3,3),B1(3,1),X(3,1)
380 DIM A4(3,3),B2(3,1),X3(3,1)
390 FOR X0=1 TO 4
400 FOR X1=1 TO 3
410 Z(X1,X0)=0
420 Z1(X1,X0)=0
430 Z2(X1,X0)=0
440 NEXT X1
450 NEXT X0
460 REM CARGA DEL PROCESO ITERATIVO EN LA LINEA 7500
470 REM LECTURA DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR SELECCIONADO
480 OPEN "PARAMED";1,"R",X$
490 READ #1:R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4
500 CLOSE
510 PRINT "LJJ
520 PRINT "
530 PRINT "JJJRESISTENCIA DE CAMPO (ohm)
540 PRINT "RESISTENCIA DE ARMADURA (ohm)
550 PRINT "INDUCTANCIA DE CAMPO (ohm)
560 PRINT "INDUCTANCIA DE ARMADURA (henrios)
570 PRINT "RESISTENCIA DE ARRANQUE CAMPO (ohm)
580 PRINT "RESISTENCIA DE ARRANQUE ARMADURA (ohm)
590 PRINT "INDUCTANCIA ROTACIONAL (vol.ses/amp)
600 PRINT "MOMENTO DE INERCIA DEL ROTOR (kg.m^2)
610 PRINT "JJJJIIDESEA CAMBIAR (si o no)G";
620 INPUT X$
630 IF X$="SI" OR X$="S" THEN 660

```

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
 DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL
 TESIS DE GRADO

 SIMULACION DIGITAL DE CONTROL DE MAQUINA D.C. EN CUATRO CUADRANTES
 LEOPOLDO SANCHEZ GARCIA
 FEBRERO DE 1985
 RETURN (para continuar)

Estudiar el comportamiento dinamico de la maquina excitada independientemente, ya sea en su estado estable o cuando sobre ella se tiene una perturbacion, estando esta controlada en cuatro cuadrantes

Se utiliza un modelo matematico en funcion de corrientes. Las ecuaciones diferenciales se resuelven por el metodo RUNGE-KUTTA de Cuarto Orden
 RETURN (para continuar)

LOS PARAMETROS ANTERIORMENTE UTILIZADOS FUERON:

JJJRESISTENCIA DE CAMPO (ohm) ;R1
 RESISTENCIA DE ARMADURA (ohm) ;R2
 INDUCTANCIA DE CAMPO (ohm) ;L1
 INDUCTANCIA DE ARMADURA (henrios) ;L2
 RESISTENCIA DE ARRANQUE CAMPO (ohm) ;R3
 RESISTENCIA DE ARRANQUE ARMADURA (ohm) ;R4
 INDUCTANCIA ROTACIONAL (vol.ses/amp) ;G1
 MOMENTO DE INERCIA DEL ROTOR (kg.m^2) ;D2

```

640 GO TO 1050
650 REM INGRESO DE LOS NUEVOS PARAMETROS
660 REM
670 PRINT *LJRESISTENCIA DE ARMADURA (ohm)          *;
680 INPUT R2
690 IF R2=>0 THEN 710
700 GO TO 670
710 PRINT *RESISTENCIA DE CAMPO (ohm)                *;
720 INPUT R1
730 IF R1=>0 THEN 750
740 GO TO 710
750 PRINT *INDUCTANCIA DEL CAMPO (henrios)          *;
760 INPUT L1
770 IF L1>0 THEN 790
780 GO TO 750
790 PRINT *INDUCTANCIA DE ARMADURA (henrios)      *;
800 INPUT L2
810 IF L2>0 THEN 830
820 GO TO 790
830 PRINT *INDUCTANCIA ROTACIONAL (vol.seg/amp)     *;
840 INPUT G1
850 IF G1=>0 THEN 870
860 GO TO 830
870 PRINT *MOMENTO DE INERCIA DEL ROTOR (kg.m^2)    *;
880 INPUT D2
890 IF D2>0 THEN 910
900 GO TO 870
910 PRINT *RESISTENCIA DE ARRANQUE DEL CAMPO (ohm)  *;
920 INPUT R3
930 IF R3=>0 THEN 950
940 GO TO 910
950 PRINT *RESISTENCIA DE ARRANQUE DE LA ARMADURA (ohm)*;
960 INPUT R4
970 IF R4=>0 THEN 990
980 GO TO 950
990 KILL *PARAMED*
1000 CREATE *PARAMED*;195,U0
1010 OPEN *PARAMED*;1,*F*,X#
1020 WRITE #1;R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4
1030 CLOSE
1040 REM SELECCION DEL FUNCIONAMIENTO ESTABLE DE LA MAQUINA
1050 PRINT "LJJJ 1.- TRABAJO EN PRIMER CUADRANTE"
1060 PRINT "JJ 2.- TRABAJO EN TERCER CUADRANTE"
1070 PRINT "JJG          ESCOJA *;
1080 INPUT J1
1090 Z9=MEMORY
1100 APPEND *FUNCION*;1110
1110 REM *****
5000 GO TO K2 OF 5010,5040,5070,5100
5010 Z9=MEMORY
5020 APPEND *MOTOR1*;7500
5030 GO TO 5120
5040 Z9=MEMORY
5050 APPEND *MOTOR2*;7500

```

```

5060 GO TO 5120
5070 Z9=MEMORY
5080 APPEND "MOTOR3";7500
5090 GO TO 5120
5100 Z9=MEMORY
5110 APPEND "MOTOR4";7500
5120 PRINT "LJJ SELECCION DEL TIPO DE ALIMENTACION DISPONIBLES"
5130 PRINT " *****"
5140 PRINT "JJ 1.-CONVERSOR DUAL MONOFASICO TIPO PUENTE"
5150 PRINT "JJ 2.-CONVERSOR DUAL TRIFASICO DE MEDIA ONDA"
5160 PRINT "JJ 3.-CONVERSOR DUAL TRIFASICO TIPO PUENTE"
5170 PRINT "JJJG          ESCOJA  ";
5180 INPUT J3
5190 IF J3=1 OR J3=2 OR J3=3 THEN 5210
5200 GO TO 5170
5210 GO TO J3 OF 5220,5250,5280
5220 Z9=MEMORY
5230 APPEND "COND2TP";5320
5240 GO TO 5310
5250 Z9=MEMORY
5260 APPEND "COND3MO";5320
5270 GO TO 5310
5280 Z9=MEMORY
5290 APPEND "COND3TP";5320
5300 GO TO 5310
5310 DELETE 360,5310
5320 REM *****
7500 REM ***** LINEA 7500

```

```

100 REM SUBPROGRAMA FUNCION
110 REM SELECCION DEL TRABAJO DE LA MAQUINA
120 PRINT "LJJ SELECCION DEL TRABAJO DE LA MAQUINA"
130 PRINT " *****"
140 PRINT "JJ 1.-ARRANQUE"
150 PRINT "JJ 2.-ESTADO ESTABLE"
160 PRINT "JJ 3.-PERTURBACION"
170 PRINT "JJ 4.-PARADA"
180 PRINT "JJ 5.-CAMBIO DE GIRO"
190 PRINT "JJJJ ESCOJAG ";
200 INPUT J8
210 I5=2
220 K3=1
230 IF J8=1 OR J8=2 OR J8=3 OR J8=4 OR J8=5 THEN 250
240 GO TO 190
250 GO TO J8 OF 260,610,840,1340,1710
260 PRINT "LJJ SELECCION DEL TIPO DE ARRANQUE"
270 PRINT " *****"
280 PRINT "JJ 1.-ARRANQUE CON ANGULO FIJO (>= 30)"
290 PRINT "JJ 2.-ARRANQUE CON CAMBIO DE ANGULO DURANTE EL PROCESO"
300 PRINT "JJJJ ESCOJAG ";
310 INPUT J5
320 IF J5=1 OR J5=2 THEN 340
330 GO TO 300
340 PRINT "LJJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (vol) ";
350 INPUT V1
360 IF V1=>0 THEN 380
370 GO TO 340
380 Y(1)=0
390 Y(2)=0
400 Y(3)=0
410 M=0
420 N2=0
430 N=3
440 GO TO J5 OF 450,480
450 J9=3
460 K2=1
470 GO TO 5000
480 PRINT "JJTIEMPO AL CUAL SE PRODUCE EL CAMBIO DEL ANGULO ";
490 INPUT T7
500 IF T7>0 THEN 520
510 GO TO 480
520 PRINT "JJVALOR FINAL DEL ANGULO ";
530 INPUT A2
540 A8=A2
550 IF A2>0 THEN 570
560 GO TO 520
570 A2=A2*PI/180
580 J9=2
590 K2=2
600 GO TO 5000
610 PRINT "LJJCORRIENTE DE CAMPO (amp) ";
620 INPUT Y(1)
630 IF Y(1)=>0 THEN 650

```

```

640 GO TO 610
650 PRINT 'JJCORRIENTE DE ARMADURA (AMP)      ';
660 INPUT Y(2)
670 IF Y(2)=>0 THEN 690
680 GO TO 650
690 PRINT 'JJVELOCIDAD (rad/seg)              ';
700 INPUT Y(3)
710 IF Y(3)=>0 THEN 730
720 GO TO 690
730 Y(3)=-Y(3)
740 PRINT 'JJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (vol)  ';
750 INPUT V1
760 IF V1=>0 THEN 780
770 GO TO 740
780 M=0
790 N2=0
800 N=3
810 K2=1
820 J9=3
830 GO TO 5000
840 PRINT 'LJJ          SELECCION DEL TIPO DE PERTURBACION'
850 PRINT '          *****'
860 PRINT 'JJJ1.-INCREMENTO BRUSCO DE CARGA'
870 PRINT 'JJ2.-CAMBIO DEL ANGULO DE DISPARO DE LOS TIRISTORES'
880 PRINT 'JJJ          ESCOJA      ';
890 INPUT J9
900 K2=2
910 IF J9=1 OR J9=2 THEN 930
920 GO TO 880
930 N=3
940 N2=0
950 M=0
960 PRINT 'LJJCORRIENTE DE CAMPO (amp)          ';
970 INPUT Y(1)
980 IF Y(1)=>0 THEN 1000
990 GO TO 960
1000 PRINT 'JJCORRIENTE DE ARMADURA (amp)          ';
1010 INPUT Y(2)
1020 IF Y(2)=>0 THEN 1040
1030 GO TO 1000
1040 PRINT 'JJVELOCIDAD (rad/seg)              ';
1050 INPUT Y(3)
1060 IF Y(3)=>0 THEN 1080
1070 GO TO 1040
1080 Y(3)=-Y(3)
1090 PRINT 'JJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (vol)  ';
1100 INPUT V1
1110 IF V1=>0 THEN 1130
1120 GO TO 1090
1130 GO TO J9 OF 1140,1230
1140 PRINT 'JJVALOR DEL TORQUE INDEPENDIENTE DE W      ';
1150 INPUT T5
1160 IF T5=>0 THEN 1180
1170 GO TO 1140

-----
1460 IF Y(1)=>0 THEN 1480
1470 GO TO 1440
1480 PRINT 'JJCORRIENTE DE ARMADURA (amp)          ';
1490 INPUT Y(2)
1500 IF Y(2)=>0 THEN 1520
1510 GO TO 1480
1520 PRINT 'JJVELOCIDAD (rad/seg)              ';
1530 INPUT Y(3)
1540 IF Y(3)=>0 THEN 1560
1550 GO TO 1520
1560 Y(3)=-Y(3)
1570 PRINT 'JJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (vol)  ';
1580 INPUT V1
1590 IF V1=>0 THEN 1610
1600 GO TO 1570
1610 V3=-V1
1620 PRINT 'JJJTIEMPO AL CUAL SE PRODUCE LA PARADA (seg)  ';
1630 INPUT T7

```

```

1180 PRINT "JJVALOR DEL TORQUE DEPENDIENTE DE W      ";
1190 INPUT T8
1200 IF T8=>0 THEN 1220
1210 GO TO 1180
1220 GO TO 1290
1230 PRINT "JJJCUAL ES EL NUEVO VALOR DEL ANGULO      ";
1240 INPUT A2
1250 A8=A2
1260 IF A2=>0 THEN 1280
1270 GO TO 1230
1280 A2=A2*PI/180
1290 PRINT "JJTIEMPO AL CUAL SE PRODUCE LA PERTURBACION (seg)  ";
1300 INPUT T7
1310 IF T7=>0 THEN 1330
1320 GO TO 1290
1330 GO TO 5000
1340 PRINT "LJJ              SELECCION DEL TIPO DE PARADA"
1350 PRINT "              *****"
1360 PRINT "JJJ1.-CON INVERSION EN EL CAMPO"
1370 PRINT "JJ2.-CON DESCONEXION EN LA ARMADURA"
1380 PRINT "JJ3.-CON INVERSION EN LA ARMADURA"
1390 PRINT "JJJ              ESCOJA      ";
1400 INPUT J7
1410 K2=3
1420 IF J7=1 OR J7=2 OR J7=3 THEN 1440
1430 GO TO 1390
1440 PRINT "LJJCORRIENTE DE CAMPO      (amp)      ";
1450 INPUT Y(1)
1460 IF Y(1)>0 THEN 1480
1470 GO TO 1440
1480 PRINT "JJCORRIENTE DE ARMADURA      (amp)      ";
1490 INPUT Y(2)
1500 IF Y(2)>0 THEN 1520
1510 GO TO 1480
1520 PRINT "JJVELOCIDAD      (rad/seg)      ";
1530 INPUT Y(3)
1540 IF Y(3)>0 THEN 1560
1550 GO TO 1520
1560 Y(3)=-Y(3)
1570 PRINT "JJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO (vol)      ";
1580 INPUT V1
1590 IF V1=>0 THEN 1610
1600 GO TO 1570
1610 V3=-V1
1620 PRINT "JJJTIEMPO AL CUAL SE PRODUCE LA PARADA (seg)  ";
1630 INPUT T7
1640 IF T7=>0 THEN 1660
1650 GO TO 1620
1660 N=3
1670 N2=0
1680 M=0
1690 J9=3
1700 GO TO 5000
1710 PRINT "LJJ              SELECCION DEL TIPO DE CAMBIO DE GIRO"

```

```
1720 PRINT " *****"
1730 PRINT "JJJ1.-CON INVERSION EN EL CAMPO"
1740 PRINT "JJ2.-CON INVERSION EN LA ARMADURA"
1750 PRINT "JJJ          ESCOJA          ";
1760 INPUT J6
1770 K2=4
1780 IF J6=1 OR J6=2 THEN 1800
1790 GO TO 1750
1800 PRINT "LJJCORRIENTE DE CAMPO (amp)          ";
1810 INPUT Y(1)
1820 IF Y(1)=>0 THEN 1840
1830 GO TO 1800
1840 PRINT "JJCORRIENTE DE ARMADURA (amp)          ";
1850 INPUT Y(2)
1860 IF Y(2)=>0 THEN 1880
1870 GO TO 1840
1880 PRINT "JJVELOCIDAD (rad/ses)          ";
1890 INPUT Y(3)
1900 IF Y(3)=>0 THEN 1920
1910 GO TO 1880
1920 Y(3)=-Y(3)
1930 PRINT "JJVOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO          ";
1940 INPUT V1
1950 IF V1=>0 THEN 1970
1960 GO TO 1930
1970 V3=-V1
1980 PRINT "JJJTIEMPO AL CUAL SE PRODUCE LA INVERSION DE GIRO ";
1990 INPUT T7
2000 IF T7=>0 THEN 2020
2010 GO TO 1980
2020 N=3
2030 N2=0
2040 M=0
2050 J9=3
2060 K6=1
```

```

100 REM SUBPROGRAMA CONDI2TP
110 REM CONVERTOR DUAL MONOFASICO TIPO FUENTE
120 REM INGRESO DATOS : V0,F0,N0,N1,A1
130 PRINT "LJJVOLTAJE DE ALIMENTACION DE LA ARMADURA (voltios) ";
140 INPUT V0
150 V4=V0
160 IF V0>0 THEN 180
170 GO TO 130
180 V0=SQR(2)*V0
190 PRINT "JJFRECUENCIA DE LA RED (1/seg) ";
200 INPUT F0
210 IF F0>10 THEN 230
220 GO TO 190
230 W=2*PI*F0
240 PRINT "JJNUMERO DE PUNTOS ";
250 INPUT N0
260 IF N0=>0 THEN 280
270 GO TO 240
280 PRINT "JJNUMERO DE PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION ";
290 INPUT N1
300 IF N1>10 AND N1<30 THEN 320
310 GO TO 280
320 PRINT "JJANGULO DE DISPARO (deg) ";
330 INPUT A1
340 IF A1>0 THEN 360
350 GO TO 320
360 REM CREACION DEL ARCHIVO DE DATOS
370 PRINT "JGLNOMBRE DEL ARCHIVO ";
380 INPUT X$
390 CALL "FILE",U0,X$,Y$
400 IF Y$="" THEN 450
410 PRINT "JJEXISTE ESE ARCHIVO DESEA DESTRUIRLO (si o no) ";
420 INPUT Y$
430 IF Y$="NO" OR Y$="N" THEN 370
440 KILL X$
450 CREATE X$(N0*10+160)*1.2,U0
460 OPEN X$;1,"F",Y$
470 IF K2=2 THEN 500
480 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,V1,K2,J9
490 GO TO 540
500 IF J9=1 THEN 530
510 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,V1,K2,J9,A8
520 GO TO 540
530 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,V1,K2,J9,T8,T5
540 D0=0
550 K0=0
560 I7=1
570 I8=1
580 A1=A1*PI/180
590 T=A1/W
600 F1=1.0E-6
610 I2=2
620 GO TO 1100
630 REM HA TERMINADO RUNGE? OCURRE EL PROXIMO DISPARO?

```

```

640 IF M=0 AND ABS(T-I4)≤P1 THEN 700
650 REM EXISTE CONDUCCION CONTINUA?
660 GO TO I1 OF 680,1300
670 REM SELECCIONA LA FUNCION SINUSOIDAL DE ALIMENTACION
680 GO TO K0 OF 1250,1270
690 REM MINIMIZA EL ERROR DEL TIEMPO
700 T=I4
710 IF K2=2 AND J9=2 THEN 730
720 GO TO 1060
730 IF A1=>A2 AND I5=2 THEN 770
740 K1=1
750 I5=1
760 GO TO 790
770 K1=2
780 I5=2
790 N5=INT(A2*N1/A1)
800 GO TO K1 OF 810,940
810 IF T7<T AND I8=1 THEN 840
820 IF T7<T AND I7=2 THEN 900
830 GO TO 1060
840 H=(A2-A1)/W/10
850 N1=N1+10
860 I8=2
870 A1=A2
880 I7=2
890 GO TO 1200
900 N1=N1-10
910 H=PI/W/N1
920 I7=1
930 GO TO 1060
940 IF T7<T AND I8=1 THEN 970
950 IF T7<T AND I7=2 THEN 1030
960 GO TO 1060
970 H=(PI-A1+A2)/W/N5
980 N1=N1-N5
990 I8=2
1000 A1=A2
1010 I7=2
1020 GO TO 1110
1030 N1=N1+N5
1040 H=PI/W/N1
1050 I7=1
1060 IF I3=1 AND E0=>ABS(V0*SIN(W*I4)) THEN 1080
1070 GO TO 1100
1080 IF I6=2 THEN 1350
1090 REM CAMBIO FUNCION SINUSOIDAL
1100 H=PI/W/N1
1110 K0=K0+1
1120 REM CAMBIO DE PERIODO DE POSIBLE CONDUCCION
1130 D0=D0+1
1140 REM POSIBLE CAMBIO DE LAS BANDERAS SEGUN EL ESTADO DEL MOTOR
1150 I1=1
1160 N3=0
1170 I3=2

```

```

1180 I6=2
1190 REM DETERMINACION DEL TIEMPO DEL PROXIMO DISPARO
1200 I4=(PI*ID0+A1)/W
1210 IF K0<=2 THEN 1230
1220 K0=1
1230 GO TO 680
1240 REM FUNCIONES SINUSOIDALES Y CAMBIO DE ESTADO BANDERA I3
1250 V2=V0*SIN(W*T)
1260 GO TO 1280
1270 V2=-V0*SIN(W*T)
1280 GOSUB 7500
1290 GO TO 640
1300 I3=1
1310 REM VA AL PROCESO ITERATIVO
1320 GOSUB 7500
1330 GO TO 640
1340 REM SUBROUTINA DE CAMBIO DE ANGULO
1350 FOR J=1 TO 3
1360 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1370 Z1(J,2)=Z(J,4)
1380 Z1(J,3)=1
1390 Z1(J,4)=Z2(J,1)
1400 NEXT J
1410 GOSUB 1570
1420 T1=-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1430 T1=T1/2/Z1(1,4)
1440 T2=-Z1(2,4)+SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1450 T2=T2/2/Z1(1,4)
1460 IF T1>T THEN 1500
1470 H=T2-T
1480 GO TO 1510
1490 REM CAMBIO DE H,I4,A1
1500 H=T1-T
1510 I6=1
1520 I4=I4+H
1530 IF K2=2 AND J9=2 THEN 1550
1540 A1=A1+W*H
1550 GOSUB 7500
1560 GO TO 640
1570 FOR X0=1 TO 3
1580 FOR X1=1 TO 3
1590 A4(X0,X1)=Z1(X0,X1)
1600 NEXT X1
1610 NEXT X0
1620 FOR X0=1 TO 3
1630 B2(X0,1)=Z1(X0,4)
1640 NEXT X0
1650 FOR X0=1 TO 2
1660 FOR X2=X0+1 TO 3
1670 F2=-A4(X2,X0)/A4(X0,X0)
1680 FOR X1=X0 TO 3
1690 A4(X2,X1)=A4(X2,X1)+F2*A4(X0,X1)
1700 NEXT X1
1710 B2(X2,1)=B2(X2,1)+F2*B2(X0,1)

```

```
1720 NEXT X2
1730 NEXT X0
1740 X3(3,1)=B2(3,1)/A4(3,3)
1750 FOR X0=2 TO 1 STEP -1
1760 S=0
1770 FOR X2=X0+1 TO 3
1780 S=S+A4(X0,X2)*X3(X2,1)
1790 NEXT X2
1800 X3(X0,1)=(B2(X0,1)-S)/A4(X0,X0)
1810 NEXT X0
1820 FOR X0=1 TO 3
1830 Z1(X0,4)=X3(X0,1)
1840 NEXT X0
1850 RETURN
```

```

100 REM SUBPROGRAMA COND3MO
110 REM CONVERTOR DUAL TRIFASICO DE MEDIA ONDA
120 REM SEMEJANTE A COND2TP
130 REM CAMBIA VALOR POSIBLE DE KO
140 REM     FUNCIONES SINUSOIDALES DE ALIMENTACION Y DE I4
150 REM     VOLTAJE MAXIMO V0
160 PRINT 'LJJVOLTAJE DE ALIMENTACION DE ARMADURA (voltios)      ';
170 INPUT V0
180 V4=V0
190 IF V0>0 THEN 210
200 GO TO 160
210 V0=SQR(2)*V0
220 PRINT 'FRECUENCIA DE LA RED (1/seg)                          ';
230 INPUT F0
240 IF F0>10 THEN 260
250 GO TO 220
260 W=2*PI*F0
270 PRINT 'NUMERO DE PUNTOS                                       ';
280 INPUT N0
290 IF N0>0 THEN 310
300 GO TO 270
310 PRINT 'NUMERO DE PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION          ';
320 INPUT N1
330 IF N1>10 AND N1<=30 THEN 350
340 GO TO 310
350 PRINT 'ANGULO DE DISPARO (deg)                                  ';
360 INPUT A1
370 IF A1=>0 THEN 390
380 GO TO 350
390 PRINT 'LJGNOMBRE DEL ARCHIVO                                     ';
400 INPUT X$
410 CALL 'FILE',U0,X$,Y$
420 IF Y$="" THEN 470
430 PRINT 'JJEXISTE ESE ARCHIVO DESEA DESTRUIRLO (si o no)      ';
440 INPUT Y$
450 IF Y$='NO' OR Y$='N' THEN 390
460 KILL X$
470 CREATE X$;(N0*10+160)*1.2,U0
480 OPEN X$;1,'F',Y$
490 IF K2=2 THEN 520
500 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9
510 GO TO 560
520 IF J9=1 THEN 550
530 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9,A8
540 GO TO 560
550 WRITE #1:N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9,T8,T5
560 D0=0
570 K0=0
580 I7=1
590 I8=1
600 A1=A1*PI/180
610 T=(A1+PI/6)/W
620 P1=1.0E-6
630 I2=2

```

```

640 GO TO 1070
650 IF M=0 AND ABS(T-I4)<=P1 THEN 680
660 GO TO I1 OF 670,1250
670 GO TO K0 OF 1180,1200,1220
680 T=I4
690 IF K2=2 AND J9=2 THEN 710
700 GO TO 1040
710 IF A1=>A2 AND I5=2 THEN 750
720 K1=1
730 I5=1
740 GO TO 770
750 K1=2
760 I5=2
770 N5=A2*N1/A1
780 GO TO K1 OF 790,920
790 IF T7<T AND I8=1 THEN 820
800 IF T7<T AND I7=2 THEN 880
810 GO TO 1040
820 H=(A2-A1)/W/10*2/3
830 N1=N1+10
840 I8=2
850 A1=A2
860 I7=2
870 GO TO 1140
880 N1=N1-10
890 H=PI/W/N1*2/3
900 I7=1
910 GO TO 1040
920 IF T7<T AND I8=1 THEN 950
930 IF T7<T AND I7=2 THEN 1010
940 GO TO 1040
950 H=(PI-A1+A2)/W/N5*2/3
960 N1=N1-N5
970 I8=2
980 A1=A2
990 I7=2
1000 GO TO 1080
1010 N1=N1+N5
1020 H=2*PI/3/W/N1
1030 I7=1
1040 IF I3=1 AND E0>ABS(V0*SIN(W*I4)) THEN 1060
1050 GO TO 1070
1060 IF I6=2 THEN 1280
1070 H=2*PI/3/W/N1
1080 K0=K0+1
1090 D0=D0+1
1100 I1=1
1110 N3=0
1120 I6=2
1130 I3=2
1140 I4=(PI/6*(1+4*D0)+A1)/W
1150 IF K0<=3 THEN 1170
1160 K0=1
1170 GO TO 670

```

```

1180 V2=V0*SIN(W*T)
1190 GO TO 1230
1200 V2=V0*SIN(W*T-PI*2/3)
1210 GO TO 1230
1220 V2=V0*SIN(W*T+PI*2/3)
1230 GOSUB 7500
1240 GO TO 650
1250 I3=1
1260 GOSUB 7500
1270 GO TO 650
1280 FOR J=1 TO 3
1290 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1300 Z1(J,2)=Z(J,4)
1310 Z1(J,3)=1
1320 Z1(J,4)=Z2(J,1)
1330 NEXT J
1340 Z1=INV(Z1)
1350 T1=-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1360 T1=T1/2/Z1(1,4)
1370 T2=-Z1(2,4)+SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1380 T2=T2/2/Z1(1,4)
1390 IF T1>T THEN 1420
1400 H=T2-T
1410 GO TO 1430
1420 H=T1-T
1430 I6=1
1440 I4=I4+H
1450 IF K2=2 AND J9=2 THEN 1460
1460 A1=A1+W*H
1470 GOSUB 7500
1480 GO TO 650

```

```

100 REM SUBPROGRAMA COND3TP
110 REM CONVERTOR DUAL TRIFASICO TIPO FUENTE
120 REM SEMEJANTE COND2TP. CAMBIA MISMOS PARAMETROS QUE EN COND3MO
130 PRINT "LJJVOLTAJE DE ALIMENTACION DE ARMADURA (voltios)           ";
140 INPUT V0
150 IF V0>0 THEN 170
160 GO TO 130
170 V4=V0
180 V0=SQR(2)*V0
190 PRINT "FRECUENCIA DE LA RED (1/seg)                               ";
200 INPUT F0
210 IF F0>10 THEN 230
220 GO TO 190
230 W=2*PI*F0
240 PRINT "NUMERO DE PUNTOS                                           ";
250 INPUT N0
260 IF N0>0 THEN 280
270 GO TO 240
280 PRINT "NUMERO DE PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION             ";
290 INPUT N1
300 IF N1>10 AND N1<30 THEN 320
310 GO TO 280
320 PRINT "ANGULO DE DISPARO (deg)                                         ";
330 INPUT A1
340 IF A1>0 THEN 360
350 GO TO 320
360 PRINT "JLGNOMBRE DEL ARCHIVO                                           ";
370 INPUT X$
380 CALL "FILE",0,X$,Y$
390 IF Y$="" THEN 440
400 PRINT "JEXISTE ESE ARCHIVO DESEA DESTRUIRLO (si o no)             ";
410 INPUT Y$
420 IF Y$="NO" OR Y$="N" THEN 360
430 KILL X$
440 CREATE X$;(N0*10+160)*1,2,U0
450 OPEN X$;1,"F",Y$
460 IF K2=2 THEN 490
470 WRITE #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9
480 GO TO 530
490 IF J9=1 THEN 520
500 WRITE #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9,A8
510 GO TO 530
520 WRITE #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,V4,F0,N1,U1,K2,J9,T8,T5
530 D0=0
540 K0=0
550 A1=A1*PI/180
560 T=(A1+PI/6)/W
570 F1=1.0E-6
580 I2=2
590 GO TO 1020
600 IF M=0 AND ABS(T-I4)<=F1 THEN 630
610 GO TO I1 OF 620,1260
620 GO TO K0 OF 1130,1150,1170,1190,1210,1230
630 T=I4

```

```

640 IF K2=2 AND J9=2 THEN 660
650 GO TO 990
660 IF A1=>A2 AND I5=2 THEN 700
670 K1=1
680 I5=1
690 GO TO 720
700 K1=2
710 I5=2
720 N5=INT(A2*N1/A1)
730 GO TO K1 OF 740,870
740 IF T7<T AND I8=1 THEN 770
750 IF T7<T AND I7=2 THEN 830
760 GO TO 990
770 H=(A2-A1)/3/W/10
780 N1=N1+10
790 I8=2
800 A1=A2
810 I7=2
820 GO TO 1090
830 N1=N1-10
840 H=PI/3/W/N1
850 I7=1
860 GO TO 990
870 IF T7<T AND I8=1 THEN 900
880 IF T7<T AND I7=2 THEN 960
890 GO TO 990
900 H=(PI-A1+A2)/3/W/N5
910 N1=N1-N5
920 I8=2
930 A1=A2
940 I7=2
950 GO TO 1030
960 N1=N1+N5
970 H=PI/3/W/N1
980 I7=1
990 IF I3=1 AND E0>ABS(V0*SIN(W*I4)) THEN 1010
1000 GO TO 1020
1010 IF I6=2 THEN 1290
1020 H=PI/3/W/N1
1030 K0=K0+1
1040 D0=D0+1
1050 I1=1
1060 N3=0
1070 I3=2
1080 I6=2
1090 I4=(PI/6*(1+2*D0)+A1)/W
1100 IF K0<=6 THEN 1120
1110 K0=1
1120 GO TO 620
1130 V2=V0*SIN(W*T+PI/6)
1140 GO TO 1240
1150 V2=V0*SIN(W*T-PI/6)
1160 GO TO 1240
1170 V2=V0*SIN(W*T-PI/2)

```

```

1180 GO TO 1240
1190 V2=V0*SIN(W*T-5*PI/6)
1200 GO TO 1240
1210 V2=V0*SIN(W*T+5*PI/6)
1220 GO TO 1240
1230 V2=V0*SIN(W*T+PI/2)
1240 GOSUB 7500
1250 GO TO 600
1260 I3=1
1270 GOSUB 7500
1280 GO TO 600
1290 FOR J=1 TO 3
1300 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1310 Z1(J,2)=Z(J,4)
1320 Z1(J,3)=1
1330 Z1(J,4)=Z2(J,1)
1340 NEXT J
1350 Z1=INV(Z1)
1360 T1=-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1370 T1=T1/2/Z1(1,4)
1380 T2=-Z1(2,4)+SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*(Z1(3,4)-ABS(V0*SIN(W*I4))))
1390 T2=T2/2/Z1(1,4)
1400 IF T1>T THEN 1430
1410 H=T2-T
1420 GO TO 1440
1430 H=T1-T
1440 I4=1
1450 I4=I4+H
1460 IF K2=2 AND J9=2 THEN 1480
1470 A1=A1+W*H
1480 GOSUB 7500
1490 GO TO 600

```

```

100 REM SUBPROGRAMA MOTOR1
110 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MOTOR Y PROCESO RUNGE
120 REM SE PRODUCE EL ARRANQUE Y ESTADO ESTABLE
130 Y3=ABS(Y(3))
140 T3=0.001916*Y3+0.735
150 IF T3<=G1*Y(1)*Y(2) THEN 180
160 T3=G1*Y(1)*Y(2)
170 REM INTRODUCCION DE LA SATURACION
180 GOSUB 900
190 REM EXISTE CONDUCCION CONTINUA? SE FORZA LA CORRIENTE ARMADURA A 0
200 IF I3=1 THEN 220
210 GO TO 240
220 V2=E0
230 REM ECUACIONES CON QUE SE MODELA LA MAQUINA
240 F(1)=(V1-(R1+R3)*Y(1))/L1
250 F(2)=(V2-E0-(R2+R4)*Y(2))/L2
260 F(3)=(T3-G1*Y(1)*Y(2))/D2
270 REM RUNGE-KUTTA
280 M=M+1
290 GO TO M OF 300,370,420,480
300 FOR J=1 TO N
310 S0(J)=Y(J)
320 P0(J)=F(J)
330 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
340 NEXT J
350 T=T+0.5*H
360 RETURN
370 FOR J=1 TO N
380 P0(J)=P0(J)+2*F(J)
390 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
400 NEXT J
410 RETURN
420 FOR J=1 TO N
430 P0(J)=P0(J)+2*F(J)
440 Y(J)=S0(J)+H*F(J)
450 NEXT J
460 T=T+0.5*H
470 RETURN
480 FOR J=1 TO N
490 Y(J)=S0(J)+(P0(J)+F(J))*H/6
500 NEXT J
510 M=0
520 REM ALMACENAMIENTO DE LOS 3 ULTIMOS VALORES DE LAS VARIABLES
530 FOR J=1 TO 3
540 Z(1,J)=Z(2,J)
550 Z(2,J)=Z(3,J)
560 Z(3,J)=Y(J)
570 NEXT J
580 Z(1,4)=Z(2,4)
590 Z(2,4)=Z(3,4)
600 Z(3,4)=T
610 REM CRUZO LA CORRIENTE DE ARMADURA POR CERO?
620 IF I1=1 AND Y(2)<=0 THEN 640
630 GO TO 650

```

```

640 IF I2=2 THEN 1110
650 IF I2=2 THEN 730
660 REM CAMBIO DEL INTERVALO EN CASO DE CONDUCCION DISCONTINUA
670 N4=N1-N3
680 H=(I4-T)/N4
690 I2=2
700 Y(2)=0
710 I1=2
720 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS TOTALES
730 N2=N2+1
740 IF N2>N0 THEN 1560
750 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS POR PERIODO
760 N3=N3+1
770 REM SE CAMBIAN LOS VALORES PARA TERCER CUADRANTE
780 IF J1=1 THEN 820
790 Y(2)=-Y(2)
800 Y(3)=-Y(3)
810 V2=-V2
820 WRITE #1:Y(1),Y(2),Y(3),V2,T
830 IF J1=1 THEN 870
840 Y(2)=-Y(2)
850 Y(3)=-Y(3)
860 V2=-V2
870 RETURN
880 REM SUBROUTINA QUE INTRODUCE LA SATURACION
890 REM Y LA DEFINICION DE Ga
900 Y4=ABS(Y(3))
910 Y5=ABS(Y(1))
920 IF Y5<1.4 THEN 970
930 IF Y5<=2.4 THEN 1000
940 E0=(8.75*Y5+44.5)*Y4/188.49
950 G1=0.118987
960 GO TO 1020
970 E0=33.33*Y5*Y4/188.49
980 G1=0.1768
990 GO TO 1020
1000 E0=(18*Y5+22.8)*Y4/188.49
1010 G1=0.157893
1020 Z2(1,1)=Z2(2,1)
1030 Z2(2,1)=Z2(3,1)
1040 Z2(3,1)=E0
1050 IF SGN(Y(1))=SGN(Y(3)) THEN 1070
1060 RETURN
1070 E0=-E0
1080 RETURN
1090 REM SUBROUTINA CON LA CUAL SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE
1100 REM EL CRUCE DE LA CORRIENTE POR CERO
1110 FOR J=1 TO 3
1120 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1130 Z1(J,2)=Z(J,4)
1140 Z1(J,3)=1
1150 Z1(J,4)=Z(J,2)
1160 NEXT J
1170 GOSUB 1270

```

```

1180 T1=(-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*Z1(3,4)))/2/Z1(1,4)
1190 FOR J=1 TO 3
1200 Y(J)=Z(2,J)
1210 NEXT J
1220 T=Z(2,4)
1230 I2=1
1240 H=T1-T
1250 RETURN
1260 REM SUBROUTINA DEL CALCULO DE LA INVERSA DE LA MATRIZ
1270 FOR X0=1 TO 3
1280 FOR X1=1 TO 3
1290 A3(X0,X1)=Z1(X0,X1)
1300 NEXT X1
1310 NEXT X0
1320 FOR X0=1 TO 3
1330 B1(X0,1)=Z1(X0,4)
1340 NEXT X0
1350 FOR X0=1 TO 2
1360 FOR X2=X0+1 TO 3
1370 F1=-A3(X2,X0)/A3(X0,X0)
1380 FOR X1=X0 TO 3
1390 A3(X2,X1)=A3(X2,X1)+F1*A3(X0,X1)
1400 NEXT X1
1410 B1(X2,1)=B1(X2,1)+F1*B1(X0,1)
1420 NEXT X2
1430 NEXT X0
1440 X(3,1)=B1(3,1)/A3(3,3)
1450 FOR X0=2 TO 1 STEP -1
1460 S=0
1470 FOR X2=X0+1 TO 3
1480 S=S+A3(X0,X2)*X(X2,1)
1490 NEXT X2
1500 X(X0,1)=(B1(X0,1)-S)/A3(X0,X0)
1510 NEXT X0
1520 FOR X0=1 TO 3
1530 Z1(X0,4)=X(X0,1)
1540 NEXT X0
1550 RETURN
1560 CLOSE
1570 DELETE 10,1570
1580 QUIT '@POLO/GRAFICO'
1590 RUN

```

```

100 REM SUBPROGRAMA MOTOR2
110 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MOTOR Y PROCESO RUNGE
120 REM SE PRODUCE LAS PERTURBACIONES
130 IF T7>T THEN 180
140 GO TO J9 OF 150,180
150 Y3=ABS(Y(3))
160 T3=(T8+0.001916)*Y3+(T5+0.735)
170 GO TO 230
180 Y3=ABS(Y(3))
190 T3=0.001916*Y3+0.735
200 IF T3<=G1*Y(1)*Y(2) THEN 220
210 T3=G1*Y(1)*Y(2)
220 REM INTRODUCCION DE LA SATURACION
230 GOSUB 950
240 REM EXISTE CONDUCCION CONTINUA? SE FORZA LA CORRIENTE ARMADURA A 0
250 IF I3=1 THEN 270
260 GO TO 290
270 V2=E0
280 REM ECUACIONES CON QUE SE MODELA LA MAQUINA
290 F(1)=(V1-(R1+R3)*Y(1))/L1
300 F(2)=(V2-E0-(R2+R4)*Y(2))/L2
310 F(3)=(T3-G1*Y(1)*Y(2))/D2
320 REM RUNGE-KUTTA
330 M=M+1
340 GO TO M OF 350,420,470,530
350 FOR J=1 TO N
360 S0(J)=Y(J)
370 P0(J)=F(J)
380 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
390 NEXT J
400 T=T+0.5*H
410 RETURN
420 FOR J=1 TO N
430 P0(J)=P0(J)+2*F(J)
440 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
450 NEXT J
460 RETURN
470 FOR J=1 TO N
480 P0(J)=P0(J)+2*F(J)
490 Y(J)=S0(J)+H*F(J)
500 NEXT J
510 T=T+0.5*H
520 RETURN
530 FOR J=1 TO N
540 Y(J)=S0(J)+(P0(J)+F(J))*H/6
550 NEXT J
560 M=0
570 REM ALMACENAMIENTO DE LOS 3 ULTIMOS VALORES DE LAS VARIABLES
580 FOR J=1 TO 3
590 Z(1,J)=Z(2,J)
600 Z(2,J)=Z(3,J)
610 Z(3,J)=Y(J)
620 NEXT J
630 Z(1,4)=Z(2,4)

```

```

640 Z(2,4)=Z(3,4)
650 Z(3,4)=T
660 REM CRUZO LA CORRIENTE DE ARMADURA POR CERO?
670 IF I1=1 AND Y(2)<=0 THEN 690
680 GO TO 700
690 IF I2=2 THEN 1160
700 IF I2=2 THEN 780
710 REM CAMBIO DEL INTERVALO EN CASO DE CONDUCCION DISCONTINUA
720 N4=N1-N3
730 H=(I4-T)/N4
740 I2=2
750 Y(2)=0
760 I1=2
770 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS TOTALES
780 N2=N2+1
790 IF N2>N0 THEN 1620
800 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS POR PERIODO
810 N3=N3+1
820 REM CAMBIO DE SIGNO PARA EL TERCER CUADRANTE
830 IF J1=1 THEN 870
840 Y(2)=-Y(2)
850 Y(3)=-Y(3)
860 V2=-V2
870 WRITE #1:Y(1),Y(2),Y(3),V2,T
880 IF J1=1 THEN 920
890 Y(2)=-Y(2)
900 Y(3)=-Y(3)
910 V2=-V2
920 RETURN
930 REM SUBROUTINA QUE INTRODUCE LA SATURACION
940 REM Y LA DEFINICION DE Ga
950 Y4=ABS(Y(3))
960 Y5=ABS(Y(1))
970 IF Y5<1.4 THEN 1020
980 IF Y5<=2.4 THEN 1050
990 E0=(8.75*Y5+45.5)*Y4/188.49
1000 G1=0.118987
1010 GO TO 1070
1020 E0=33.33*Y5*Y4/188.49
1030 G1=0.1768
1040 GO TO 1070
1050 E0=(18*Y5+22.8)*Y4/188.49
1060 G1=0.157893
1070 Z2(1,1)=Z2(2,1)
1080 Z2(2,1)=Z2(3,1)
1090 Z2(3,1)=E0
1100 IF SGN(Y(1))=SGN(Y(3)) THEN 1120
1110 RETURN
1120 E0=-E0
1130 RETURN
1140 REM SUBROUTINA CON LA CUAL SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE
1150 REM EL CRUCE DE LA CORRIENTE POR CERO
1160 FOR J=1 TO 3
1170 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)

```

```

1180 Z1(J,2)=Z(J,4)
1190 Z1(J,3)=1
1200 Z1(J,4)=Z(J,2)
1210 NEXT J
1220 GOSUB 1320
1230 T1=(-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*Z1(3,4)))/2/Z1(1,4)
1240 FOR J=1 TO 3
1250 Y(J)=Z(2,J)
1260 NEXT J
1270 T=Z(2,4)
1280 I2=1
1290 H=T1-T
1300 RETURN
1310 REM SUBROUTINA DEL CALCULO DE LA INVERSA DE LA MATRIZ
1320 FOR X0=1 TO 3
1330 FOR X1=1 TO 3
1340 A3(X0,X1)=Z1(X0,X1)
1350 NEXT X1
1360 NEXT X0
1370 FOR X0=1 TO 3
1380 B1(X0,1)=Z1(X0,4)
1390 NEXT X0
1400 FOR X0=1 TO 2
1410 FOR X2=X0+1 TO 3
1420 F1=-A3(X2,X0)/A3(X0,X0)
1430 FOR X1=X0 TO 3
1440 A3(X2,X1)=A3(X2,X1)+F1*A3(X0,X1)
1450 NEXT X1
1460 B1(X2,1)=B1(X2,1)+F1*B1(X0,1)
1470 NEXT X2
1480 NEXT X0
1490 X(3,1)=B1(3,1)/A3(3,3)
1500 FOR X0=2 TO 1 STEP -1
1510 S=0
1520 FOR X2=X0+1 TO 3
1530 S=S+A3(X0,X2)*X(X2,1)
1540 NEXT X2
1550 X(X0,1)=(B1(X0,1)-S)/A3(X0,X0)
1560 NEXT X0
1570 FOR X0=1 TO 3
1580 Z1(X0,4)=X(X0,1)
1590 NEXT X0
1600 RETURN
1610 REM
1620 CLOSE
1630 DELETE 10,1630
1640 OLD '@FOLO/GRAFICO'
1650 RUN

```

```

100 REM SUBPROGRAMA MOTOR3
110 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MOTOR Y PROCESO RUNGE
120 REM SE PRODUCE LAS PARADAS
130 IF T7>T THEN 270
140 GO TO J7 OF 150,190,230
150 V1=V3
160 Y3=ABS(Y(3))
170 T3=3*0.026941*Y3+0.735
180 GO TO 290
190 V2=E0
200 Y3=ABS(Y(3))
210 T3=3*0.026941*Y3+0.735
220 GO TO 290
230 V2=-V2
240 Y3=ABS(Y(3))
250 T3=3*0.026941*Y3+0.735
260 GO TO 290
270 Y3=ABS(Y(3))
280 T3=0.001916*Y3+0.735
290 REM INTRODUCCION DE LA SATURACION
300 GOSUB 1100
310 REM EXISTE CONDUCCION CONTINUA? SE FORZA LA CORRIENTE ARMADURA A 0
320 IF I3=1 AND J7=3 AND T7<T THEN 360
330 IF I3=1 THEN 350
340 GO TO 370
350 V2=E0
360 REM ECUACIONES CON QUE SE MODELA LA MAQUINA
370 F(1)=(V1-(R1+R3)*Y(1))/L1
380 F(2)=(V2-E0-(R2+R4)*Y(2))/L2
390 F(3)=(T3-G1*Y(1)*Y(2))/D2
400 REM RUNGE-KUTTA
410 M=M+1
420 GO TO M OF 430,500,550,610
430 FOR J=1 TO N
440 S0(J)=Y(J)
450 F0(J)=F(J)
460 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
470 NEXT J
480 T=T+0.5*H
490 RETURN
500 FOR J=1 TO N
510 F0(J)=F0(J)+2*F(J)
520 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
530 NEXT J
540 RETURN
550 FOR J=1 TO N
560 F0(J)=F0(J)+2*F(J)
570 Y(J)=S0(J)+H*F(J)
580 NEXT J
590 T=T+0.5*H
600 RETURN
610 FOR J=1 TO N
620 Y(J)=S0(J)+(F0(J)+F(J))*H/6
630 NEXT J

```

```

640 M=0
650 REM ALMACENAMIENTO DE LOS 3 ULTIMOS VALORES DE LAS VARIABLES
660 FOR J=1 TO 3
670 Z(1,J)=Z(2,J)
680 Z(2,J)=Z(3,J)
690 Z(3,J)=Y(J)
700 NEXT J
710 Z(1,4)=Z(2,4)
720 Z(2,4)=Z(3,4)
730 Z(3,4)=T
740 REM CRUZO LA CORRIENTE DE ARMADURA POR CERO?
750 IF J7=3 THEN 780
760 IF I1=1 AND Y(2)<=0 THEN 840
770 GO TO 850
780 IF I1=1 AND K3=1 AND Y(2)<=0 THEN 810
790 IF I1=1 AND K3=2 AND Y(2)=>0 THEN 830
800 GO TO 850
810 IF T7>T THEN 830
820 K3=2
830 IF I2=2 AND J7=3 THEN 1410
840 IF I2=2 THEN 1290
850 IF I2=2 THEN 930
860 REM CAMBIO DEL INTERVALO EN CASO DE CONDUCCION DISCONTINUA
870 N4=N1-N3
880 H=(I4-T)/N4
890 I2=2
900 IF J7=3 AND T7<T THEN 920
910 Y(2)=0
920 I1=2
930 REM SE PARA LA EJECUCION DEL PROGRAMA PARA W=0
940 IF Y(3)=>0 THEN 1850
950 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS POR PERIODO
960 N3=N3+1
970 REM SE CAMBIAN LOS VALORES PARA EL TERCER CUADRANTE
980 IF J1=1 THEN 1020
990 Y(2)=-Y(2)
1000 Y(3)=-Y(3)
1010 V2=-V2
1020 WRITE #1;Y(1),Y(2),Y(3),V2,T
1030 IF J1=1 THEN 1070
1040 Y(2)=-Y(2)
1050 Y(3)=-Y(3)
1060 V2=-V2
1070 RETURN
1080 REM SUBROUTINA QUE INTRODUCE LA SATURACION Y REDEFINE Ga
1090 REM Y DE LA DEFINICION DE Ga
1100 Y4=ABS(Y(3))
1110 Y5=ABS(Y(1))
1120 IF Y5<1.4 THEN 1170
1130 IF Y5<=2.4 THEN 1200
1140 E0=(8.75*Y5+44.5)*Y4/188.49
1150 G1=0.118987
1160 GO TO 1220
1170 E0=33.33*Y5*Y4/188.49

```

```

1180 G1=0.1768
1190 GO TO 1220
1200 E0=(18*Y5+22.8)*Y4/188.49
1210 G1=0.157893
1220 Z2(1,1)=Z2(2,1)
1230 Z2(2,1)=Z2(3,1)
1240 Z2(3,1)=E0
1250 IF SGN(Y(1))=SGN(Y(3)) THEN 1270
1260 RETURN
1270 E0=-E0
1280 RETURN
1290 REM SUBROUTINA CON LA CUAL SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE
1300 REM EL CRUCE POR CERO DE LA CORRIENTE
1310 FOR J=1 TO 3
1320 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1330 Z1(J,2)=Z(J,4)
1340 Z1(J,3)=1
1350 Z1(J,4)=Z(J,2)
1360 NEXT J
1370 GOSUB 1560
1380 T1=(-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*Z1(3,4)))/2/Z1(1,4)
1390 GO TO 1480
1400 REM SUBROUTINA DEL CRUCE POR CERO CON REGRESION LINEAL
1410 Z3=Z(1,4)+Z(2,4)+Z(3,4)
1420 Z4=Z(1,2)+Z(2,2)+Z(3,2)
1430 Z5=Z(1,4)^2+Z(2,4)^2+Z(3,4)^2
1440 Z6=Z(1,4)+Z(1,2)+(Z(2,4)+Z(2,2))+(Z(3,4)+Z(3,2))
1450 Z8=(3*Z6-Z4*Z3)/(3*Z5-Z3^2)
1460 Z7=(Z4-Z8*Z3)/3
1470 T1=-Z7/Z8
1480 FOR J=1 TO 3
1490 Y(J)=Z(2,J)
1500 NEXT J
1510 T=Z(2,4)
1520 I2=1
1530 H=T1-T
1540 RETURN
1550 REM SUBROUTINA PARA CALCULAR LA INVERSA DE LA MATRIZ
1560 FOR X0=1 TO 3
1570 FOR X1=1 TO 3
1580 A3(X0,X1)=Z1(X0,X1)
1590 NEXT X1
1600 NEXT X0
1610 FOR X0=1 TO 3
1620 B1(X0,1)=Z1(X0,4)
1630 NEXT X0
1640 FOR X0=1 TO 2
1650 FOR X2=X0+1 TO 3
1660 F1=-A3(X2,X0)/A3(X0,X0)
1670 FOR X1=X0 TO 3
1680 A3(X2,X1)=A3(X2,X1)+F1*A3(X0,X1)
1690 NEXT X1
1700 B1(X2,1)=B1(X2,1)+F1*B1(X0,1)
1710 NEXT X2

```

```
1720 NEXT X0
1730 X(3,1)=B1(3,1)/A3(3,3)
1740 FOR X0=2 TO 1 STEP -1
1750 S=0
1760 FOR X2=X0+1 TO 3
1770 S=S+A3(X0,X2)*X(X2,1)
1780 NEXT X2
1790 X(X0,1)=(B1(X0,1)-S)/A3(X0,X0)
1800 NEXT X0
1810 FOR X0=1 TO 3
1820 Z1(X0,4)=X(X0,1)
1830 NEXT X0
1840 RETURN
1850 CLOSE
1860 DELETE 10,1860
1870 OLI '@POLO/GRAFICO'
1880 RUN
```

```

100 REM SUBPROGRAMA MOTOR4
110 REM ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MOTOR Y PROCESO RUNGE
120 REM SE PRODUCE LAS INVERSIONES DE GIRO
130 IF T7>T THEN 180
140 GO TO J6 OF 150,170
150 V1=V3
160 GO TO 180
170 V2=-V2
180 Y3=ABS(Y(3))
190 T3=0.026941*Y3+0.735
200 IF Y(3)=>0 THEN 220
210 GO TO 230
220 K6=2
230 IF K6=2 THEN 250
240 GO TO 260
250 T3=-T3
260 REM INTRODUCCION DE LA SATURACION
270 GOSUB 1080
280 REM EXISTE CONDUCCION CONTINUA? SE FORZA LA CORRIENTE ARMADURA A 0
290 IF I3=1 AND J6=2 AND T7<T THEN 330
300 IF I3=1 THEN 320
310 GO TO 340
320 V2=E0
330 REM ECUACIONES CON QUE SE MODELA LA MAQUINA
340 F(1)=(V1-(R1+R3)*Y(1))/L1
350 F(2)=(V2-E0-(R2+R4)*Y(2))/L2
360 F(3)=(T3-G1*Y(1)*Y(2))/D2
370 REM RUNGE-KUTTA
380 M=M+1
390 GO TO M OF 400,470,520,580
400 FOR J=1 TO N
410 S0(J)=Y(J)
420 F0(J)=F(J)
430 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
440 NEXT J
450 T=T+0.5*H
460 RETURN
470 FOR J=1 TO N
480 F0(J)=F0(J)+2*F(J)
490 Y(J)=S0(J)+0.5*H*F(J)
500 NEXT J
510 RETURN
520 FOR J=1 TO N
530 F0(J)=F0(J)+2*F(J)
540 Y(J)=S0(J)+H*F(J)
550 NEXT J
560 T=T+0.5*H
570 RETURN
580 FOR J=1 TO N
590 Y(J)=S0(J)+(F0(J)+F(J))*H/6
600 NEXT J
610 M=0
620 REM ALMACENAMIENTO DE LOS 3 ULTIMOS VALORES DE LAS VARIABLES
630 FOR J=1 TO 3

```

```

640 Z(1,J)=Z(2,J)
650 Z(2,J)=Z(3,J)
660 Z(3,J)=Y(J)
670 NEXT J
680 Z(1,4)=Z(2,4)
690 Z(2,4)=Z(3,4)
700 Z(3,4)=T
710 REM CRUZO LA CORRIENTE DE ARMADURA POR CERO?
720 IF J6=2 THEN 750
730 IF I1=1 AND Y(2)<=0 THEN 810
740 GO TO 820
750 IF I1=1 AND K3=1 AND Y(2)<=0 THEN 780
760 IF I1=1 AND K3=2 AND Y(2)=>0 THEN 800
770 GO TO 820
780 IF T7>T THEN 810
790 K3=2
800 IF I2=2 AND J6=2 THEN 1390
810 IF I2=2 THEN 1290
820 IF I2=2 THEN 910
830 REM CAMBIO DEL INTERVALO EN CASO DE CONDUCCION DISCONTINUA
840 N4=N1-N3
850 H=(I4-T)/N4
860 I2=2
870 IF J6=2 AND T7<T THEN 890
880 Y(2)=0
890 I1=2
900 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS TOTALES
910 N2=N2+1
920 IF N2>N0 THEN 1830
930 REM CONTADOR DEL NUMERO DE PUNTOS POR PERIODO
940 N3=N3+1
950 REM SE CAMBIAN LOS VALORES PARA TERCER CUADRANTE
960 IF J1=1 THEN 1000
970 Y(2)=-Y(2)
980 Y(3)=-Y(3)
990 V2=-V2
1000 WRITE #1:Y(1),Y(2),Y(3),V2,T
1010 IF J1=1 THEN 1050
1020 Y(2)=-Y(2)
1030 Y(3)=-Y(3)
1040 V2=-V2
1050 RETURN
1060 REM SUBROUTINA QUE INTRODUCE LA SATURACION
1070 REM Y LA DEFINICION DE Ga
1080 Y4=ABS(Y(3))
1090 Y5=ABS(Y(1))
1100 IF Y5<1.4 THEN 1150
1110 IF Y5<=2.4 THEN 1180
1120 E0=(8.75*Y5+45.5)*Y4/188.49
1130 G1=0.118987
1140 GO TO 1200
1150 E0=33.33*Y5*Y4/188.48
1160 G1=0.1768
1170 GO TO 1200

```

```

1180 E0=(18*Y5+22.8)*Y4/188.49
1190 G1=0.157893
1200 Z2(1,1)=Z2(2,1)
1210 Z2(2,1)=Z2(3,1)
1220 Z2(3,1)=E0
1230 IF SGN(Y(1))=SGN(Y(3)) THEN 1250
1240 RETURN
1250 E0=-E0
1260 RETURN
1270 REM SUBROUTINA CON LA CUAL SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE
1280 REM EL CRUCE POR CERO DE LA CORRIENTE
1290 FOR J=1 TO 3
1300 Z1(J,1)=Z(J,4)*Z(J,4)
1310 Z1(J,2)=Z(J,4)
1320 Z1(J,3)=1
1330 Z1(J,4)=Z(J,2)
1340 NEXT J
1350 GOSUB 1540
1360 T1=(-Z1(2,4)-SQR(Z1(2,4)^2-4*Z1(1,4)*Z1(3,4)))/2/Z1(1,4)
1370 GO TO 1460
1380 REM SUBROUTINA DEL CRUCE POR CERO CON REGRESION LINEAL
1390 Z3=Z(1,4)+Z(2,4)+Z(3,4)
1400 Z4=Z(1,2)+Z(2,2)+Z(3,2)
1410 Z5=Z(1,4)^2+Z(2,4)^2+Z(3,4)^2
1420 Z6=Z(1,4)*Z(1,2)+Z(2,4)*Z(2,2)+Z(3,4)*Z(3,2)
1430 Z8=(3*Z6-Z4*Z3)/(3*Z5-Z3^2)
1440 Z7=(Z4-Z8*Z3)/3
1450 T1=-Z7/Z8
1460 FOR J=1 TO 3
1470 Y(J)=Z(2,J)
1480 NEXT J
1490 T=Z(2,4)
1500 I2=1
1510 H=T1-T
1520 RETURN
1530 REM SUBROUTINA PARA CALCULAR LA INVERSA DE LA MATRIZ
1540 FOR X0=1 TO 3
1550 FOR X1=1 TO 3
1560 A3(X0,X1)=Z1(X0,X1)
1570 NEXT X1
1580 NEXT X0
1590 FOR X0=1 TO 3
1600 B1(X0,1)=Z1(X0,4)
1610 NEXT X0
1620 FOR X0=1 TO 2
1630 FOR X2=X0+1 TO 3
1640 F1=-A3(X2,X0)/A3(X0,X0)
1650 FOR X1=X0 TO 3
1660 A3(X2,X1)=A3(X2,X1)+F1*A3(X0,X1)
1670 NEXT X1
1680 B1(X2,1)=B1(X2,1)+F1*B1(X0,1)
1690 NEXT X2
1700 NEXT X0
1710 X(3,1)=B1(3,1)/A3(3,3)

```

```

1720 FOR X0=2 TO 1 STEP -1
1730 S=0
1740 FOR X2=X0+1 TO 3
1750 S=S+A3(X0,X2)*X(X2,1)
1760 NEXT X2
1770 X(X0,1)=(B1(X0,1)-S)/A3(X0,X0)
1780 NEXT X0
1790 FOR X0=1 TO 3
1800 Z1(X0,4)=X(X0,1)
1810 NEXT X0
1820 RETURN
1830 CLOSE
1840 DELETE 10,1840
1850 OLD "@POLO/GRAFICO"
1860 RUN

```

```

100 REM          ***** GRAFICO          *****
110 PRINT 'LJJJJ          GRAFICO '
120 PRINT 'JJ          NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS ? G';
130 INPUT W$
140 OPEN W$;1,'R',Y$
150 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9
160 IF K2=2 THEN 180
170 GO TO 240
180 CLOSE 1
190 OPEN W$;1,'R',Y$
200 IF J9=1 THEN 230
210 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,A8
220 GO TO 240
230 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,T8,T5
240 DELETE Y,X,Z
250 I3=1
260 DIM Y(5),X(5),Z(5)
270 FOR J=1 TO 5
280 X(J)=0
290 Y(J)=0
300 NEXT J
310 FOR J=1 TO NO
320 FOR K=1 TO 4
330 ON EOF (1) THEN 440
340 READ #1:T
350 IF K<>3 THEN 370
360 T=-T
370 IF X(K)=>T THEN 390
380 X(K)=T
390 IF Y(K)<=T THEN 410
400 Y(K)=T
410 NEXT K
420 READ #1:T
430 NEXT J
440 CLOSE 1
450 PRINT 'JJ1.-GRAFICO DE CORRIENTE DE CAMPO '
460 PRINT '2.-GRAFICO DE CORRIENTE DE ARMADURA '
470 PRINT '3.-GRAFICO DE VELOCIDAD '
480 PRINT '4.-GRAFICO DE VOLTAJE DE ALIMENTACION '
490 PRINT '          JJ ESCOJA OPCION G';
500 INPUT J
510 IF J=1 OR J=2 OR J=3 OR J=4 THEN 530
520 GO TO 490
530 PRINT 'L'
540 PRINT 'JJL          DATO MIN.:';Y(J)
550 PRINT '          DATO MAX.:';X(J)
560 PRINT 'JJ          TIEMPO MIN. :0'
570 PRINT '          TIEMPO MAX.:';T
580 PRINT 'JJ          PARAMETROS DEL WINDOW '
590 PRINT '          EN EL EJE X ? G ';
600 INPUT W3,W4
610 PRINT '          EN EL EJE Y ? G ';
620 INPUT W5,W6
630 PRINT 'JJ          INTERVALO DE MARCAS '

```

```

930 PRINT 'LJJ          TITULO DEL GRAFICO ? G';
940 INPUT A$
950 PRINT 'JJ          VARIABLE QUE SE GRAFIZA EN EL EJE Y ' ;
960 INPUT S$
970 PAGE
980 GOSUB 2130
990 OPEN W$;1,'R',Y$
1000 IF K2=2 THEN 1030
1010 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9
1020 GO TO 1070
1030 IF J9=1 THEN 1060
1040 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,A8
1050 GO TO 1070
1060 READ #1:NO,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,T8,T5
1070 READ #1:Z(1),Z(2),Z(3),Z(4),T9
1080 Z(3)=-Z(3)
1090 T1=T9
1100 MOVE @U3:0,Z(J)

```

```

640 PRINT 'J          EN EL EJE X ? G ' ;
650 INPUT M1
660 PRINT 'J          EN EL EJE Y ? G ' ;
670 INPUT M2
680 M3=0
690 M4=0
700 PRINT 'LJJJJ      DESEA GRAFICO EN LA PANTALLA (SI o NO) ? G' ;
710 INPUT A$
720 IF A$='SI' OR A$='S' THEN 830
730 PRINT 'LG        PREPARE EL GRAFIZADOR (RETURN PARA CONTINUAR)'
740 INPUT X$
750 U3=1
760 P8=51
770 IF I3=1 THEN 790
780 GO TO 800
790 GOSUB 2190
800 X9=0.8*1.792
810 Y9=0.8*2.816
820 GO TO 900
830 U3=32
840 P8=32
850 IF I3=1 THEN 870
860 GO TO 880
870 GOSUB 2190
880 X9=0.8*2.328
890 Y9=0.8*3.072
900 PRINT @1,17;X9,Y9
910 A5=(W4-W3)/M1+1
920 A6=(W6-W5)/M2+1
930 PRINT 'LJJ      TITULO DEL GRAFICO ? G' ;
940 INPUT A$
950 PRINT 'JJ      VARIABLE QUE SE GRAFIZA EN EL EJE Y   ' ;
960 INPUT S$
970 PAGE
980 GOSUB 2130
990 OPEN W$;1,'R',Y$
1000 IF K2=2 THEN 1030
1010 READ #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9
1020 GO TO 1070
1030 IF J9=1 THEN 1060
1040 READ #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,A8
1050 GO TO 1070
1060 READ #1;N0,R1,R2,L1,L2,G1,D2,R3,R4,A1,U4,F0,N1,U1,K2,J9,T8,T5
1070 READ #1;Z(1),Z(2),Z(3),Z(4),T9
1080 Z(3)=-Z(3)
1090 T1=T9
1100 MOVE @U3;0,Z(J)
1110 FOR J2=1 TO N0-1
1120 ON EOF (1) THEN 1180
1130 READ #1;Z(1),Z(2),Z(3),Z(4),T9
1140 Z(3)=-Z(3)
1150 T9=T9-T1
1160 DRAW @U3:T9,Z(J)
1170 NEXT J2

```

```

1180 CLOSE 1
1190 GOSUB 2130
1200 MOVE @U3:W3,W5
1210 FOR J=1 TO A5
1220 DRAW @U3:W3+(J-1)*M1,W5
1230 SCALE 1,1
1240 RDRAW @U3:0,1
1250 Y$=STR(W3+(J-1)*M1)
1260 Y$=REP(" ",1,1)
1270 RMOVE @U3:-LEN(Y$)/2*X9,-1.5*Y9
1280 PRINT @U3:Y$;
1290 GOSUB 2130
1300 MOVE @U3:W3+(J-1)*M1,W5
1310 NEXT J
1320 MOVE @U3:W3,W5
1330 FOR J=1 TO A6
1340 DRAW @U3:W3,W5+(J-1)*M2
1350 SCALE 1,1
1360 RDRAW @U3:1,0
1370 Y$=STR(W5+(J-1)*M2)
1380 Y$=REP(" ",1,1)
1390 RMOVE @U3:-Y9,-LEN(Y$)/2*X9
1400 PRINT @1,25:90
1410 PRINT @U3:Y$;
1420 PRINT @1,25:0
1430 GOSUB 2130
1440 MOVE @U3:W3,W5+(J-1)*M2
1450 NEXT J
1460 AXIS @U3:M1,M2,W4,W6
1470 A9=LEN(A$)
1480 A1=-A9/2*X9
1490 MOVE @U3:(W3+W4)/2,W6
1500 SCALE 1,1
1510 RMOVE @U3:A1,3*Y9
1520 PRINT @U3:A$;
1530 GOSUB 2130
1540 MOVE @U3:(W3+W4)/2,W6
1550 SCALE 1,1
1560 RMOVE @U3:A1,2.1*Y9
1570 FOR J=1 TO A9
1580 PRINT @U3:"=";
1590 NEXT J
1600 GOSUB 2130
1610 R$="TIEMPO (seg)"
1620 MOVE @U3:(W3+W4)/2,W5
1630 SCALE 1,1
1640 RMOVE @U3:-LEN(R$)/2*X9,-3.5*Y9
1650 PRINT @U3:R$
1660 GOSUB 2130
1670 R$=S$
1680 MOVE @U3:W3,(W5+W6)/2
1690 SCALE 1,1
1700 RMOVE @U3:-3.2*Y9,-LEN(R$)/2*X9
1710 PRINT @1,25:90

```

```

1720 PRINT @U3:R$
1730 PRINT @1,25:0
1740 GOSUB 2130
1750 MOVE @U3:W3,W6
1760 PRINT "JJ          DESEA ESCRIBIR LEYENDAS (SI o NO):G ";
1770 INPUT C$
1780 IF C#="NO" OR C#="N" THEN 2040
1790 PRINT "JJ          TITULO DE LA LEYENDA:G ";
1800 INPUT D$
1810 PRINT "JJ          DIRECCION DE ESCRITURA REFERIDA AL EJE X:G "
1820 PRINT "J          LADO INFERIOR: 1"
1830 PRINT "J          LADO LATERAL IZQUIERDO: 2"
1840 PRINT "JJ          ESCOJA:G ";
1850 INPUT X0
1860 A2=-LEN(D$)/2*X9
1870 GOSUB 2130
1880 GO TO X0 OF 1940,1890
1890 MOVE @U3:W3,(W5+W6)/2
1900 SCALE 1,1
1910 RMOVE @U3:-6*Y9,A2
1920 PRINT @1,25:90
1930 GO TO 1970
1940 MOVE @U3:(W3+W4)/2,W5
1950 SCALE 1,1
1960 RMOVE @U3:A2,-6.3*Y9
1970 PRINT @U3:D$;
1980 PRINT @1,25:0
1990 GOSUB 2130
2000 MOVE @U3:W3,W6
2010 PRINT "JJ          DESEA ESCRIBIR LEYENDAS (SI O NO):G ";
2020 INPUT C$
2030 IF C#="SI" OR C#="S" THEN 1790
2040 GOSUB 2130
2050 MOVE @U3:W3,W6
2060 PRINT "LJJJ          DESEA OTRO GRAFICO ? G";
2070 INPUT R$
2080 IF R#="SI" OR R#="S" THEN 2100
2090 END
2100 I3=2
2110 GO TO 450
2120 REM *** SUBROUTINA DE WINDOW Y VIEWPORT ***
2130 IF U3=32 THEN 2160
2140 VIEWPORT 15,140,15,90
2150 GO TO 2170
2160 VIEWPORT 20,120,20,90
2170 WINDOW W3,W4,W5,W6
2180 RETURN
2190 REM SUBROUTINA DE PRESENTACION DE VALORES INICIALES
2200 PRINT @F8:"LJ ESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
2210 PRINT @F8:" FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
2220 PRINT @F8:" DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL"
2230 PRINT @F8:" TESIS DE GRADO"
2240 PRINT @F8:"JJJ          LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA UTILIZADA SON:"
2250 PRINT @F8:"          *****"

```

```

2260 PRINT @P8:"JJ      RESISTENCIA DE ARMADURA (ohm)           :";R2
2270 PRINT @P8:"JJ      RESISTENCIA DE CAMPO (ohm)           :";R1
2280 PRINT @P8:"JJ      INDUCTANCIA DE ARMADURA (H)         :";L2
2290 PRINT @P8:"JJ      INDUCTANCIA DE CAMPO (H)             :";L1
2300 PRINT @P8:"JJ      RESISTENCIA DE ARRANQUE DE ARMADURA (ohm) :";R4
2310 PRINT @P8:"JJ      RESISTENCIA DE ARRANQUE DE CAMPO (ohm) :";R3
2320 PRINT @P8:"JJ      INDUCTANCIA ROTACIONAL (vol.ses/amp)   :";G1
2330 PRINT @P8:"JJ      MOMENTO DE INERCIA (k.s,m^2)          :";D2
2340 IF K2=2 THEN 2460
2350 PRINT @P8:"JJJ      LAS CONDICIONES INICIALES FUERON:"
2360 PRINT @P8:"      *****
2370 PRINT @P8:"JJ      ANGULO DE ACTIVADO DE LOS TIRISTORES   :";A1
2380 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE LINEA CONECTADO AL CONVERTOR :";V4
2390 PRINT @P8:"JJ      FRECUENCIA DE LA RED                   :";F0
2400 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO     :";V1
2410 PRINT @P8:"JJ      PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION    :";N1
2420 PRINT @P8:"JJ      NUMERO DE PUNTOS GRAFICADOS           :";N0
2430 PRINT @32:"JJG      RETURN (para continuar) ";
2440 INPUT X$
2450 RETURN
2460 IF J9=1 THEN 2590
2470 PRINT @P8:"JJJ      LAS CONDICIONES INICIALES FUERON:"
2480 PRINT @P8:"      *****
2490 PRINT @P8:"JJ      ANGULO INICIAL DE ACTIVADO             :";A1
2500 PRINT @P8:"JJ      ANGULO FINAL DE ACTIVADO              :";A8
2510 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE LINEA CONECTADO AL CONVERTOR :";V4
2520 PRINT @P8:"JJ      FRECUENCIA DE LA RED                   :";F0
2530 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO     :";V1
2540 PRINT @P8:"JJ      PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION    :";N1
2550 PRINT @P8:"JJ      NUMERO DE PUNTOS GRAFICADOS           :";N0
2560 PRINT @32:"JJG      RETURN (para continuar) ";
2570 INPUT X$
2580 RETURN
2590 PRINT @P8:"JJJ      LAS CONDICIONES INICIALES FUERON:"
2600 PRINT @P8:"      *****
2610 PRINT @P8:"JJ      ANGULO DE ACTIVADO                     :";A1
2620 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE LINEA CONECTADO AL CONVERTOR :";V4
2630 PRINT @P8:"JJ      FRECUENCIA DE LA RED                   :";F0
2640 PRINT @P8:"JJ      VOLTAJE DE ALIMENTACION DEL CAMPO     :";V1
2650 PRINT @P8:"JJ      TORQUE CONSTANTE PUESTO EN EL EJE      :";T5
2660 PRINT @P8:"JJ      TORQUE DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD    :";T8
2670 PRINT @P8:"JJ      PUNTOS POR INTERVALO DE CONDUCCION    :";N1
2680 PRINT @P8:"JJ      NUMERO DE PUNTOS GRAFICADOS           :";N0
2690 PRINT @32:"JJG      RETURN (para continuar) ";
2700 INPUT X$
2710 RETURN

```